

## تأثیر هندسه بر رفتار و مدهای شکست اتصال T شکل پانل های ساندویچی تحت بار گذاری عرضی

آیدین غزنوی اسگوی<sup>۱\*</sup>، سید محمد رضا خلیلی<sup>۲</sup> و امین غزنوی اسگوی<sup>۴</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> اتصال T شکل، پانل ساندویچی، مد شکست، روش المان محدود، اتصالات چسبی.</p>	<p>از جمله معایب صفحات ساندویچی، اتصالات آن‌ها می‌باشد که به طور کلی بازده و راندمان سازه ای که در ساخت آن از این صفحات استفاده شده است، تحت تاثیر قرار می‌دهد. به دلیل کاربرد گسترده اتصال T شکل در صنعت، بررسی خواص و مقاومت اتصال مذکور و مدهای شکست آن تحت بارگذاری‌های مختلف ضروری می‌باشد. از این‌رو در این تحقیق رفتار اتصال با دقت بالایی در نرم افزار ANSYS مدل شده تا بتوان به تاثیر پارامترهای مختلفی از قبیل هندسه اتصال در رفتار آن تحت بار عرضی پی برد. گفتنی است برای صحت‌گذاری نتایج حل عددی از نتایج تست تجربی موجود در مراجع گذشته استفاده شده است. از طرفی با تعریف قابلیت شکست مواد اتصال و گسیختگی چسب در مدل عددی ساخته شده، مدهای شکست اتصال مذکور نیز در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در مجموع می‌توان گفت که تغییر نوع بارگذاری و هندسه اتصال باعث تغییر مد شکست اتصال می‌شود. از طرفی تغییر هندسه اتصال باعث افزایش ۲۳۰ درصدی نیروی شکست اتصال می‌شود. در نهایت مستحکم‌ترین مدل تحت بار کششی، مدل با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه می‌باشد در حالی‌که در بارگذاری عرضی مدل با زاویه فوم مثلثی ۶۰ درجه دارای بیشترین استحکام می‌باشد.</p>

### ۱- مقدمه

اطمینان و راندمان سازه‌های مختلف همچون کشتی‌ها و قایق‌های تندرو باید به بررسی اتصال T شکل صفحات ساندویچی که از چسب برای اتصال آن‌ها استفاده شده است، پرداخت. به خاطر اهمیت موضوع، اتصال T شکل کامپوزیت‌های چند لایه [۱-۱۱] و صفحات ساندویچی [۱۲-۲۶] توسط محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. مقاومت اتصال به مقاومت این دو عضو بستگی دارد. مطالعات شنوی و هاوکین [۱] بر روی اتصال T شکل کامپوزیت‌های چند لایه نشان داد که شعاع‌های زیاد چندلایه متصل کننده (بزرگتر از ۷۵ میلیمتر) باعث کاهش ماکزیمم تنش در صفحه و در طول ضخامت فیلت

یکی از انواع اتصالاتی که در صنایع مختلف به خصوص صنایع دریایی کاربرد فراوانی دارد، اتصال T شکل صفحات ساندویچی می‌باشد. به همین دلیل برای افزایش ضریب

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: aidin.ghaznavi@yahoo.com

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲. مرکز طراحی و توسعه فناوری توربین های بادی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
۳. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۴. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران

ساندویچی نیز افزایش یابد. تافتگارد و لیسترپ [۱۵] طرح جدیدی برای اتصال T شکل صفحات ساندویچی ارائه کردند که منجر به کاهش وزن اتصال گردید. آن‌ها برای اتصال از دو فوم مثلثی استفاده کردند. در نهایت اتصال پیشنهادی آن‌ها ۲۰٪ قوی تر از اتصالات متداول قبلی بوده در حالی که در حدود ۴۰٪ سبک تر از آن‌ها می‌باشد. نکته قابل توجه این است که در این اتصال مد شکست، شکست برشی هسته می‌باشد و قبل از این که خود اتصال دچار مشکل شود، هسته گسیخته شده است. به همین دلیل مقاومت نهایی خود اتصال اندازه گرفته نشد [۱۵].

در اکثر مطالعات عددی انجام شده چسب و شکست برشی هسته پانل ساندویچی مدل نشده است. لذا مدل‌های ساخته شده توانایی مدلسازی و بررسی مدهای شکست را نداشته و درضمن قادر به پیش بینی ماکزیمم نیروی شکست نبوده اند. از طرفی بدلیل این که تافتگارد و لیسترپ [۱۵]، در ساخت پانل های ساندویچی به کار رفته در اتصال از فومی با مقاومت برشی نسبتا پایین استفاده کردند، اتصال بر اثر شکست برشی هسته دچار گسیختگی شد و نهایتا ماکزیمم نیروی شکست خود اتصال بدست نیامد. خلیلی و غزنوی [۱۶-۱۹] اتصال پیشنهادی تافتگارد و لیسترپ را که دارای مقاومت بیشتری نسبت به اتصالات متداول بود را به روش عددی مدلسازی کرده و با افزایش مقاومت برشی هسته صفحات ساندویچی به بررسی مقاومت نهایی خود اتصال تحت بار کششی پرداختند. آن‌ها در مدلسازی پانل‌های ساندویچی، از چهار فوم Divinycell H100, H160, H250, HCP70 استفاده کردند و کارایی اتصال در شرایط مختلف موادی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از فوم Divinycell HCP70 باعث افزایش مقاومت نهایی اتصال می‌شود. گفتنی است که در کلیه تحقیقات انجام شده توسط تافتگارد و لیسترپ [۱۵] و هم چنین خلیلی و غزنوی [۱۶-۱۹] اتصال مذکور تحت بار کششی قرار گرفته است.

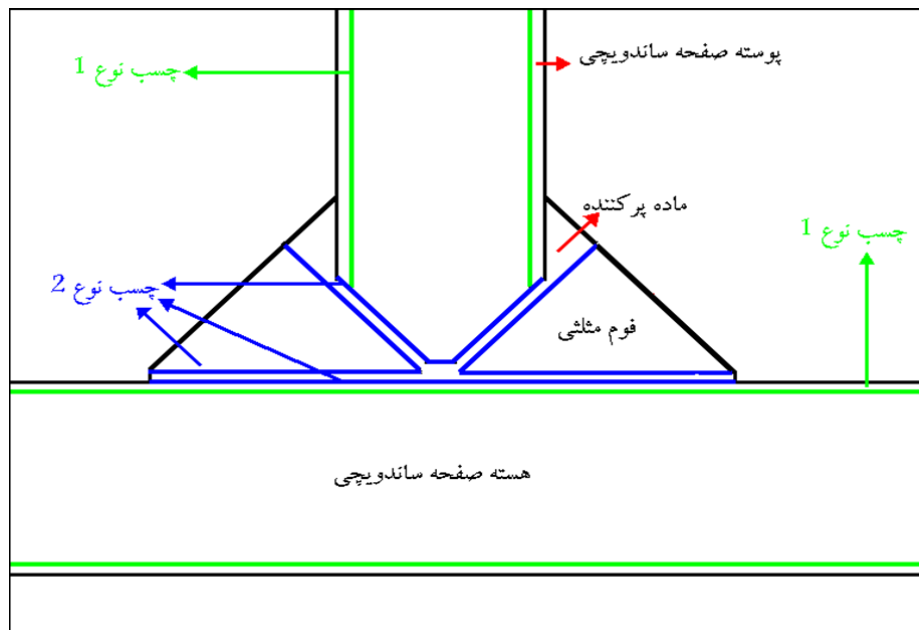
و چندلایه متصل کننده می‌شود. بلیک و همکارانش [۲] در سال ۱۹۹۹ مطالعاتی برای بهبود اتصال با مواد بسیار نرم و ارتجاعی برای فیلت انجام دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که مواد بسیار نرم به عنوان فیلت، بار را بین دو عضو اتصال به خوبی انتقال نمی‌دهند و چنین اتصالاتی در عمل همچون اتصال بدون فیلت رفتار می‌کنند. همچنین شنوی و همکارانش [۳] نشان دادند که مکانیزم شکست اتصال T شکل تحت بارگذاری استاتیکی و خستگی ثابت است. چون مسیر رشد ترک در هر دو نوع بارگذاری یکسان است. فیلیپس و شنوی [۴ و ۵] نیز به بررسی رفتار اتصال T شکل کامپوزیت چند لایه پرداختند. آنان نیز اتصال دایروی با OL را مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان کردند که بارهایی که بر اتصال T شکل در واقعیت وارد می‌شود را می‌توان با دو نوع بارگذاری مدل کرد. این دو نوع بارگذاری عبارتند از: ۱- کشش خالص تحت زاویه ۴۵ درجه و ۲- خمش ۳ نقطه‌ای. استیکلر و همکارانش [۶]، [۷] نیز از الیاف عرضی برای افزایش مقاومت اتصال تحت بارگذاری‌های مختلف استفاده کردند. آنان دریافتند که در بارگذاری خمشی تعداد ردیف‌های الیاف تقویتی تاثیر چشمگیری در افزایش مقاومت خمشی اتصال دارد. شنوی و دیگر همکارانش [۸] نیز تاثیر 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. سان و توراگا [۱۲] اشکال متنوعی را برای اتصال T شکل صفحات ساندویچی بررسی کردند. در مجموع آنها ۶ شکل مختلف را برای اتصال T شکل صفحات ساندویچی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از پیچ و قطعات U شکل آلومینیومی برای تقویت اتصال استفاده کردند. تئوتو کوگلو [۱۳] طی تحقیقاتی که انجام داد دریافت که ضخامت و طول چندلایه باعث تغییر مد شکست اتصال می‌شود. همچنین او دریافت که وزن چندلایه متصل کننده بیشتر از هندسه آن در مقاومت اتصال تاثیرگذار است و برای افزایش مقاومت اتصال علاوه بر افزایش مقاومت چندلایه باید مقاومت هسته صفحه

ANSYS، شکست برشی در هسته پانل ساندویچی نیز مدل سازی شده است. همچنین نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تست تجربی موجود در مقالات گذشته صحه گذاری شدند.

## ۲- بسط مدل اجزای محدود

در ساخت اتصال T شکل صفحات ساندویچی مواد مختلفی استفاده می شود که همه آنها به تفکیک در مدل المان محدود شبیه سازی شده اند. این مواد عبارتند از: ۱. پوسته صفحه ساندویچی، ۲. هسته صفحه ساندویچی، ۳. فوم مثلثی، ۴. ماده پرکننده، ۵. چسب نوع ۱ (متصل کننده بین پوسته و هسته) و ۶. چسب نوع ۲ (متصل کننده بین اجزای مختلف اتصال). نحوه استفاده این مواد در شکل ۱ نشان داده شده است.

به بیان دیگر مقاومت اتصال مورد نظر در بارگذاریهای عرضی بررسی نشده است. به همین منظور، در این مقاله رفتار اتصال T شکل صفحات ساندویچی تحت بار عرضی بررسی شده است و با نتایج بدست آمده از تحلیل اتصال تحت بار کششی مقایسه شده است. گفتنی است که در حل عددی اتصال در هر دو بارگذاری مذکور، جنس هسته پانل ساندویچی از نوع Divinycell HCP70 می باشد که از مقاومت بیشتری نسبت به سایر فومهای بررسی شده برخوردار می باشد. لازم بذکر است که با تغییر زاویه فوم مثلثی ۹ مدل هندسی متفاوت ایجاد شده است که رفتار همه آنها تحت بار کششی و عرضی تحلیل و مقایسه شده است تا در نهایت بتوان مدل هندسی مناسب را تحت شرایط کاری مختلف شناسایی کرد. برای مدل سازی چسب از المانهای تماسی به همراه مدل ماده منطقه چسبنده استفاده شده است تا بتوان گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال از یکدیگر را به خوبی مدل کرد. همین طور با استفاده از کد نویسی در نرم افزار



شکل ۱- نحوه به کار گیری مواد مختلف در اتصال T شکل صفحات ساندویچی

دقت تحلیلها، مواد به صورت غیر خطی در نرم افزار مدل سازی شده اند. هرچند در جدول مذکور صرفاً خواص

همچنین خلاصه ای از خواص مکانیکی مواد استفاده شده در آنالیزها در جدول ۱ آورده شده است. برای افزایش

مدول الاستیسیته ماده مورد نظر در جهت X و Y و مدول برشی آن در صفحه XY می باشد. همچنین X و Y نیز نشان دهنده مقاومت ماده در جهات X و Y و S نیز بیانگر مقاومت برشی ماده می باشد.

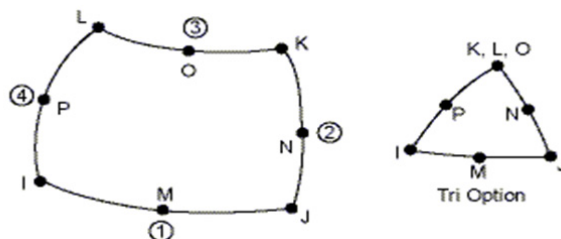
خطی مواد ارائه شده است. در ضمن تمامی آنالیزها نیز به صورت غیر خطی انجام شده اند و فرض تغییر شکل بزرگ در تمام آن ها در نظر گرفته شده است. لازم بذکر است که  $E_x$ ،  $E_y$  و  $G_{xy}$  در جدول ۱ به ترتیب نشان دهنده

جدول ۱- خواص مواد به کار رفته در مدلسازی اتصال T شکل صفحات ساندویچی

vxxy	S(MPa)	Gxy(MPa)	Y(MPa)	Ey(MPa)	X(MPa)	Ex(MPa)	نوع مواد	مواد مختلف
۰/۱۴	۳۱/۴	۴۴۰۰	۹	۱۱۵۰۰	۴۱۷	۲۶۱۰۰	L1Vinylester infusion [۱۵]	پوسته صفحات ساندویچی
۰/۴۷	۸/۷	۱۷۰	۱۵	۵۰۰	۱۵	۵۰۰	Crestomer 1152 PA [۱۵]	ماده پر کننده
۰/۳	۴/۱	۱۱۰	۶/۲	۲۸۰	۶/۲	۲۸۰	Divinycell HD250 PVC [۱۹]	فوم مثلثی
۰/۳	۵/۲	۱۴۰	۱۱	۴۵۰	۱۱	۴۵۰	Divinycell HCP70 PVC [۲۱]	هسته صفحات ساندویچی

بفرد این المان این است که از آن می توان هم در حالت مستطیلی و هم در حالت مثلثی استفاده کرد [۲۷]. لذا دقت مش بندی با کمک این المان افزایش می یابد. برای المان بندی چسب نیز از المان های تماسی CONTA172 و TARGE169 استفاده شده است.

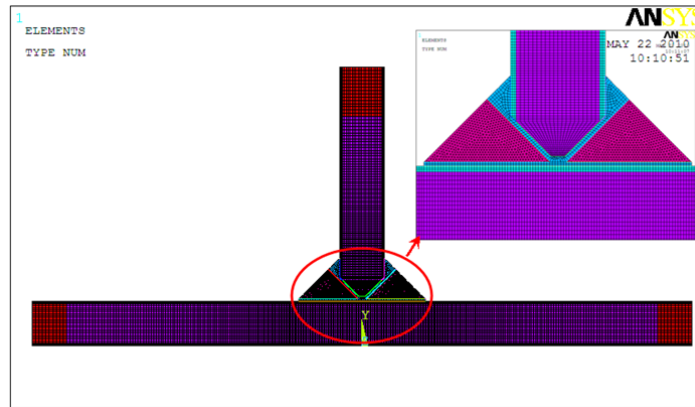
برای المان بندی بخش های مختلف اتصال همچون پوسته ها، هسته ها، فوم های مثلثی و ماده پر کننده، از المان دو بعدی غیر خطی Plane 82 استفاده شده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این المان به صورت مستطیلی با ۸ نود می باشد. ویژگی منحصر



شکل ۲- المان دو بعدی غیر خطی plane 82 در دو حالت مستطیلی و مثلثی [۲۷]

سرعت تحلیل ها را تا حد امکان افزایش داد. نمونه اتصال المان بندی شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در نهایت برای تحلیل اتصال از ۱۶۳۱۹ المان و ۴۵۱۶۹ گره استفاده شده است.

مش بندی اتصال به صورت منظم انجام شده است به طوری که در نواحی دورتر اتصال از المان های بزرگ تر و در نواحی نزدیک تر به اتصال که از حساسیت بیشتری برخوردارند، از المان های کوچکتری برای مش بندی استفاده شده است تا علاوه بر حفظ دقت نتایج، بتوان



شکل ۳: مش بندی منظم اتصال T شکل صفحات ساندویچی

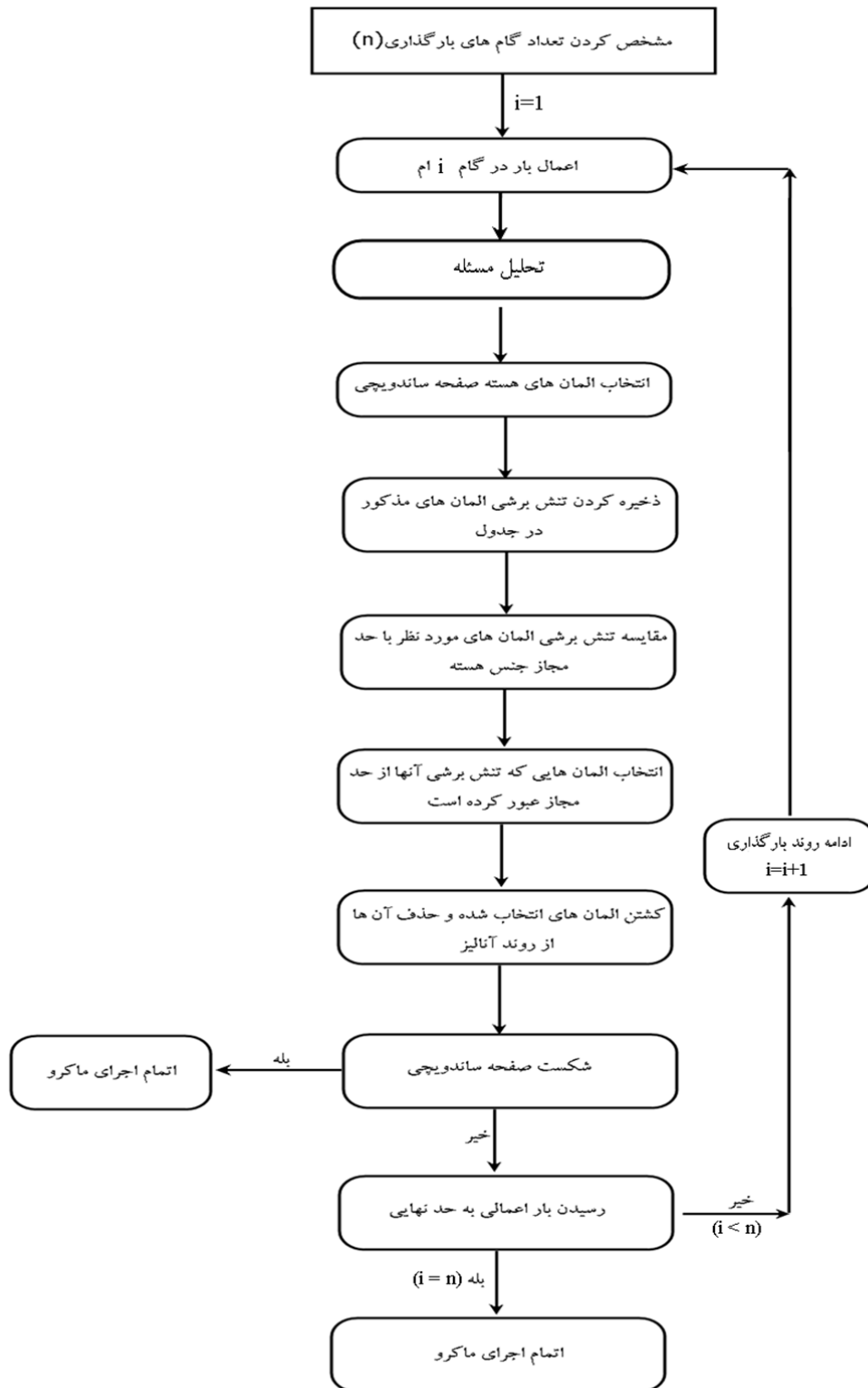
## ۱-۲- مدل‌سازی شکست برشی هسته (مد اول شکست اتصال)

برای مدل‌سازی شکست برشی هسته صفحات ساندویچی، یک کد ماکرو در نرم افزار ANSYS نوشته شده است. از طریق اجرای این کد، بارگذاری در چندین مرحله انجام می‌شود. بین این مراحل تمام المان‌های هسته پانل‌های ساندویچی انتخاب می‌شوند و مقدار تنش برشی آن‌ها در جدولی ذخیره می‌شود. سپس تنش برشی آن‌ها با مقدار تنش برشی مجاز ماده مورد نظر مقایسه شده و المان‌هایی که تنش برشی آنها از حد مجاز بیشتر باشد، انتخاب می‌گردند. در مرحله بعد، با استفاده از قابلیت تولد و مرگ المان، المان‌های انتخاب شده از روند آنالیز حذف می‌شوند و بارگذاری بدون المان‌های حذف شده ادامه پیدا می‌کند. این روند تا شکست کامل سازه و یا رسیدن به ماکزیمم بار وارده به سازه ادامه می‌یابد. برای دقیق بودن جواب کد مذکور، باید از المان‌های کوچک جهت مش‌بندی نواحی حساس اتصال استفاده کرد تا المان‌ها به تدریج وارد محدوده غیر مجاز شوند. همچنین باید بار وارده به اتصال را به تدریج افزایش داد (تعداد مراحل بارگذاری و تعداد حلقه‌های کد زیاد باشد) تا بتوان تاثیر افزایش بار را به خوبی مشاهده کرد. مراحل کلی کد مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است.

## ۲-۲- مدل‌سازی گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال

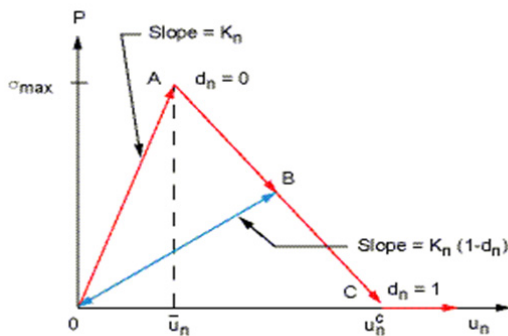
برای مدل‌سازی چسب، از المان‌های تماسی TARGE169 و CONTA172 و مدل ماده مخصوص ناحیه چسب استفاده شده است. مدل ماده ناحیه چسب، رفتار چسب و گسیختگی آن را به صورت خطی در نظر می‌گیرد [۲۷ و ۲۸]. در حالت کلی سه مدل شکست برای گسیختگی چسب تعریف شده است. این مدل‌ها عبارتند از:

- مدل شکست اول: گسیختگی چسب در حالتی که چسب در اثر تنش‌های عمودی گسیخته می‌شود و کرنش‌های عمودی بسیار بزرگتر از کرنش‌های برشی چسب می‌باشند.
- مدل شکست دوم: گسیختگی چسب در حالتی که چسب در اثر تنش‌های برشی گسیخته می‌شود و کرنش‌های برشی بسیار بزرگتر از کرنش‌های عمودی چسب می‌باشند.
- مدل شکست ترکیبی: حالتی است که چسب هم به خاطر نیروهای برشی و هم به خاطر نیروهای کششی گسیخته می‌شود. به عبارت دیگر هم کرنش عمودی و هم کرنش برشی در چسب از اهمیت بالایی برخوردار است. این مدل شکست به مدل شکست ترکیبی مشهور است.



شکل ۴- مراحل کلی کد نوشته شده در نرم افزار برای تعریف قابلیت شکست در نرم افزار

تنش-جابجایی در حالت بارگذاری به صورت خطی بوده و از خط  $OA$  تبعیت می‌کند. همین طور این نسبت در حالت بار برداری نیز خطی بوده و از خط  $AC$  تبعیت می‌کند. بیشترین تنش تماسی عمودی نیز در نقطه  $A$  رخ می‌دهد. برای مثال در مد اول که جدایش فقط به تنش نرمال بستگی دارد، شکست در نقطه  $A$  شروع شده و در نقطه  $C$ ، هنگامی که تنش نرمال صفر می‌شود، تکمیل می‌شود. بعد از این لحظه ادامه جدایش بدون ایجاد هیچ تنش عمودی می‌باشد. سطح زیر نمودار  $OAC$ ، نشان دهنده انرژی آزاد شده در طول شکست چسب می‌باشد که انرژی بحرانی شکست عمودی نام دارد [۲۸]. شیب خط  $OA$  مشخص کننده کرنش عمودی ایجاد شده در اثر حداکثر تنش عمودی می‌باشد. گفتنی است که هنگامی که شکست شروع شود، فرض می‌شود که هرگونه بارگذاری و باربرداری از روی خط  $OB$  (با شیب کمتر) انجام می‌شود. مزیت استفاده از این نوع مدل برای شبیه سازی رفتار چسب، ایجاد امکان بررسی کمی و کیفی تنش‌ها، کرنش‌ها، جابجایی ایجاد شده در چسب و سایر پارامترهای مورد نیاز می‌باشد. به عنوان نمونه می‌توان به کانتور جابجایی ایجاد شده و تنش تماسی حاصله در چسب در یکی از مدل‌ها که در شکل شماره ۶ نشان داده شده است، اشاره کرد.



شکل ۵: رفتار تنش عمودی در مقابل جابجایی عمودی در مدل ماده مخصوص ناحیه چسب [۲۳].

از آنجا که در اتصال  $T$  شکل صفحات ساندویچی بار وارده به چسب هم دارای مولفه عمودی و هم دارای مولفه برشی می‌باشد، لذا در مدلسازی چسب در اتصال  $T$  شکل صفحات ساندویچی از حالت مد شکست ترکیبی استفاده شده است. به همین دلیل در زیر روابط مربوط به جدایش چسب در این حالت بیان می‌شوند. این مدل تنش‌های تماسی را به صورت زیر تعریف می‌کند [۲۸]:

$$p = k_n u_n (1 - d) \quad (۱)$$

$$\tau_y = k_t u_y (1 - d) \quad (۲)$$

$$\tau_z = k_t u_z (1 - d) \quad (۳)$$

که در آن  $p$  تنش تماسی عمودی (کششی)،  $\tau_i$  تنش تماسی مماسی در جهت  $i$  ( $i=y, z$ )،  $k_n$  سفتی تماسی عمودی،  $k_t$  سفتی تماسی مماسی،  $u_n$  فاصله عمودی تماس،  $u_i$  فاصله لغزشی تماس در جهت  $i$  ( $i=y, z$ ) و  $d$  پارامتر جدایش می‌باشد. در حالت مد شکست ترکیبی، جدایش هنگامی کامل می‌شود که معیار انرژی برآورده شده باشد. این معیار با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$\left(\frac{G_n}{G_{cn}}\right) + \left(\frac{G_t}{G_{ct}}\right) = 1 \quad (۴)$$

که در آن پارامترهای فوق عبارتند از:

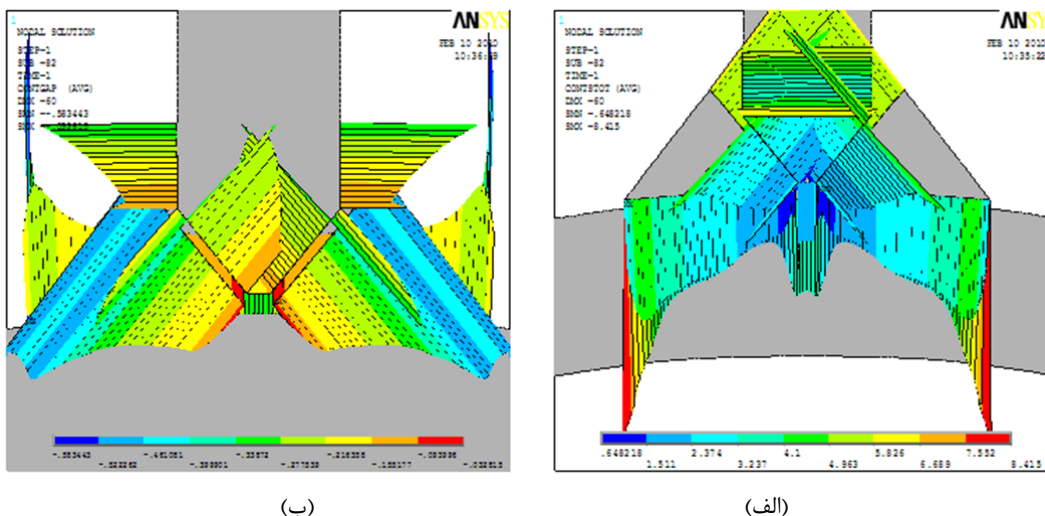
$$G_n = \int p dU_n \quad (۵)$$

$$G_t = \int \sqrt{\tau_y^2 + \tau_z^2} dU_t \quad (۶)$$

$$G_{cn} = \frac{1}{2} \sigma_{max} u_n^c \quad (۷)$$

$$G_{ct} = \frac{1}{2} \tau_{max} u_t^c \quad (۸)$$

در ادامه به طور اختصار به نحوه محاسبه تنش عمودی ایجاد شده در چسب (رابطه شماره ۱) پرداخته می‌شود. نحوه محاسبه روابط ۲ و ۳ نیز مشابه همین رابطه می‌باشد. رفتار تنش عمودی و جابجایی عمودی مدل ماده ناحیه چسبیده (CZM) در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نسبت



شکل ۶: (الف) کانتور تنش تماسی حاصله در چسب، (ب) کانتور جدایش تماسی حاصله در چسب

### ۳-۲- مدل های هندسی ساخته شده برای بررسی اثر هندسه اتصال بر رفتار آن

تافتگارد و همکارانش [۱۵] طی تحقیقاتی که انجام دادند دریافتند که در اتصال مثلثی زاویه اصلی فوم های مثلثی مهم ترین عامل هندسی تاثیر گذار در رفتار و مقاومت اتصال می باشد. لذا در این مقاله برای بررسی دقیق تر این موضوع ۹ مدل هندسی مختلف با زوایای فوم مثلثی ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۷۰ درجه ساخته شده است. گفتنی است که برای بررسی هر چه دقیق تر اثر زاویه فوم مثلثی بر عملکرد اتصال، هر ۹ مدل هندسی طوری ساخته شدند که مقدار کل ماده پر کننده بکار رفته در تمام آن ها یکسان می باشد. این کار به این منظور انجام شد تا بتوان در نهایت عملکرد مدل ها را با یکدیگر مقایسه کرد. به خاطر همین موضوع در ابتدا به بررسی روابط پارامترهای مختلف هندسی با یکدیگر پرداخته و با توجه به تاثیر آنها در یکدیگر، در نهایت در حالی که سطح ماده پر کننده ثابت می باشد، زاویه فوم مثلثی تغییر کرده است.

### ۴-۲- بارگذاری و شرایط مرزی

اتصال T شکل صفحات ساندویچی تحت دو نوع بارگذاری مختلف قرار گرفته و تاثیر پارامتر هندسه اتصال در هر دو

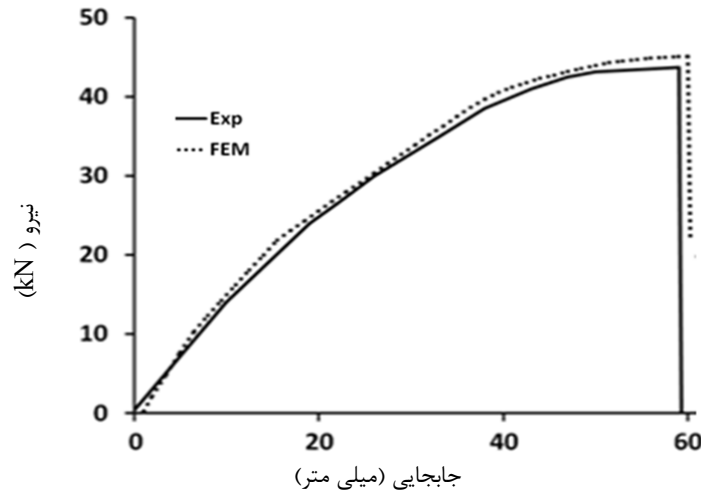
نوع بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. یکی از این بارگذاری ها حالت کشیدن (کشش خالص) است. در این بارگذاری که اغلب محققین اتصالات مختلف را تحت آن مورد بررسی قرار داده اند، لبه های صفحه ساندویچی افقی توسط تکیه گاه های ساده مهار شده و لبه بالایی صفحه ساندویچی عمودی در راستای عمود کشیده می شود. حالت دوم که محققین آن را کمتر مورد توجه قرار داده اند، بارگذاری عرضی می باشد. در این بارگذاری لبه بالایی صفحه ساندویچی عمودی، تحت جابجایی جانبی قرار می گیرد. نتایج حاصل از این بارگذاری از نظر جدید بودن دارای اهمیت فراوان می باشد.

چرا که این نوع اتصال T شکل صفحات ساندویچی تحت این بارگذاری قرار نگرفته و رفتار آن و تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد آن نیز در این نوع بارگذاری مورد بررسی قرار نگرفته است. از طرفی نتایج بدست آمده نشان دادند که عملکرد اتصال در دو حالت بارگذاری کاملا متفاوت می باشد. شرایط مرزی اعمال شده و نحوه اعمال نیروها در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود برای مهار صفحه ساندویچی افقی از تکیه گاه های ساده استفاده شده است. در ضمن برای جلوگیری از حرکت اتصال در راستای عمود به راستای بارگذاری نیز، یک نقطه از آن مقید شده است.



### ۳- صحنه گذاری نتایج بدست آمده از حل عددی

شکل ۸ نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از حل عددی را با نمودار حاصله از تست تجربی مقایسه می‌کند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمودار بدست آمده از حل عددی تطابق بسیار مناسبی با نمودار حاصله



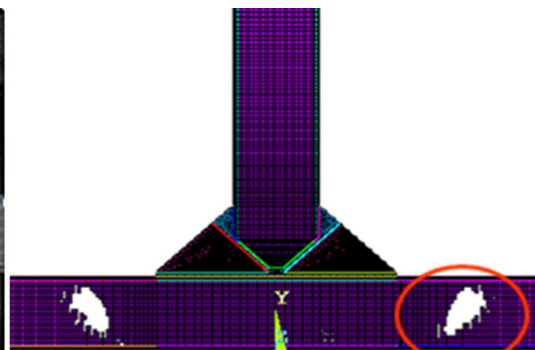
شکل ۸: نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از تست تجربی [۱۵] و حل عددی

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود المان‌های حذف شده، شکستی با زاویه تقریباً ۴۵ درجه را مدلسازی می‌کنند که محل آن کمی دورتر از ناحیه اتصال می‌باشد. شکل (۹-ب) نیز نشان دهنده نمونه آزمایشگاهی بعد از اتمام بارگذاری و شکست می‌باشد.

این نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است. شکل (۹-الف) المان‌هایی را نشان می‌دهد که در مراحل مختلف بارگذاری انتخاب شده و از روند آنالیز حذف شده اند. این المان‌ها، المان‌هایی هستند که تنش برشی آن‌ها از تنش برشی مجاز هسته پانل ساندویچی بیشتر شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۹: مد و محل شکست اتصال T شکل در اثر تست کشش، الف) نتیجه حاصل از حل عددی، ب) نتیجه حاصل از تست تجربی

[۱۵]

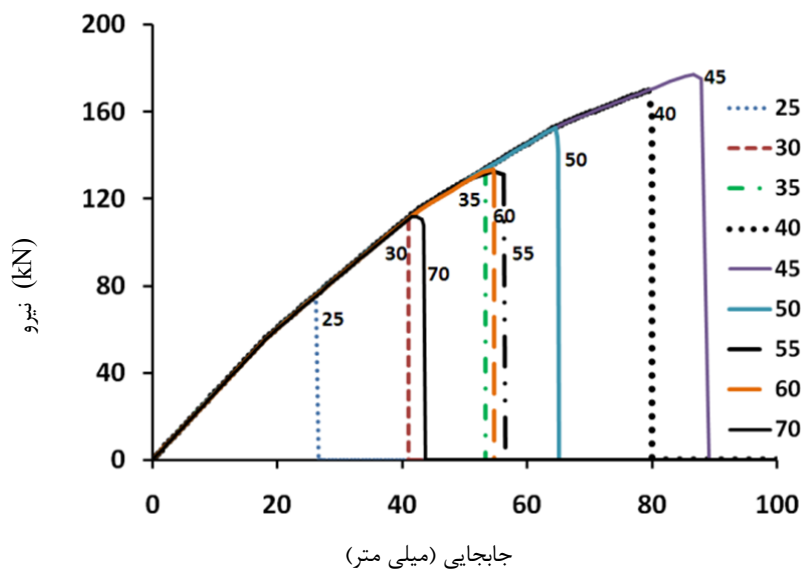
شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اتصال با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه بیشترین و اتصال با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه کمترین نیروی شکست را دارند. برخی از اتصالات نیز رفتاری مشابه و نزدیک به هم از خود نشان دادند. به عنوان نمونه می‌توان به اتصال‌های با زاویه فوم مثلثی ۳۰ و ۷۰ درجه اشاره کرد که تقریباً دارای نیروی شکست یکسانی تحت بار کششی می‌باشند. گفتنی است که مد شکست تمام مدل‌هایی که جنس هسته آن‌ها Divinycell HCP70 می‌باشد، گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال است. به بیان دیگر، فوم Divinycell HCP70 در برابر بارهای وارده مقاومت کرده و در نتیجه در نهایت نیروی شکست خود اتصال برای تمام زاویه‌ها محاسبه شده است.

شکست حاصل از تست تجربی نیز به صورت برشی و کمی دورتر از محل اتصال می‌باشد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مد شکست پیش بینی شده توسط حل المان محدود اتصال همان مد شکستی است که در تست تجربی رخ داده است.

#### ۴- تحلیل نتایج

##### ۴-۱- بررسی اثر هندسه اتصال بر رفتار اتصال در بارگذاری کششی

۹ مدل هندسی مختلف اتصال T شکل صفحه ساندویچی، تحت بار کششی قرار گرفتند. نمودار نیرو-تغییر مکان مدل‌های مختلف هندسی اتصال تحت بار کششی در

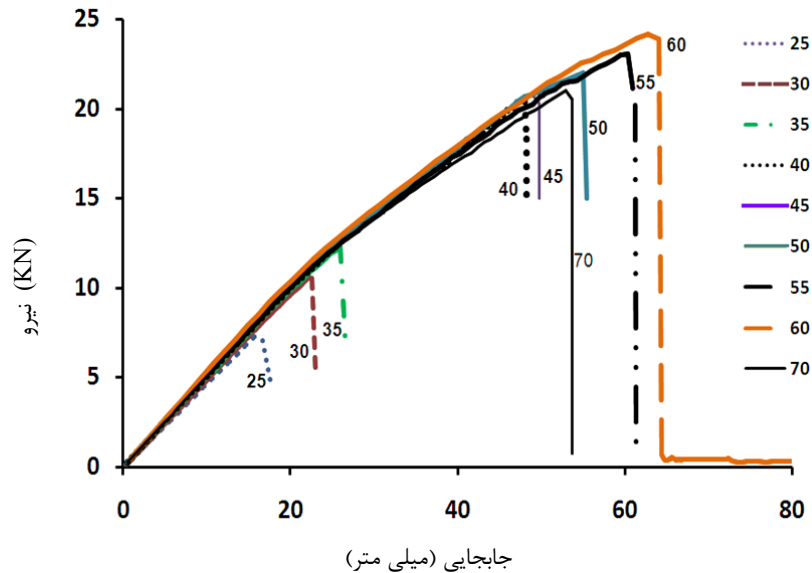


شکل ۱۰: عملکرد مدل‌های هندسی مختلف با فوم Divinycell HCP70 تحت بار کششی

کاملاً متفاوت اتصال در این بارگذاری نسبت به بارگذاری کشش خالص، در مراجع گذشته کمتر به آن پرداخته شده است. برای بررسی عملکرد اتصال تحت بارگذاری عرضی در ابتدا نمودارهای جابجایی-نیروی اتصال بررسی می‌شود. شکل ۱۱ نشان دهنده نمودارهای جابجایی-نیروی برای همه مدل‌های هندسی تحت بار عرضی می‌باشد.

##### ۴-۲- بررسی اثر هندسه اتصال بر رفتار اتصال در بارگذاری عرضی

یکی دیگر از بارگذاری‌های اعمال شده به اتصال T شکل صفحات ساندویچی، بارگذاری عرضی می‌باشد. مطالعه این بارگذاری از آن جهت حائز اهمیت است که علاوه بر رفتار



شکل ۱۱: نمودار نیرو-تغییر مکان برای مدل های هندسی با هسته Divinycell HCP70 تحت بار عرضی

بارگذاری، نیروی شکست، انرژی جذب شده توسط اتصال تا لحظه شروع شکست و همین‌طور حداکثر جابجایی اتصال تا لحظه شروع شکست در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در بارگذاری کشش خالص، مدل هندسی با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه بهترین عملکرد و در بارگذاری عرضی مدل با زاویه فوم مثلثی ۶۰ درجه دارای بهترین عملکرد می‌باشد. اما در مجموع اگر احتمال اعمال بار در هر دو جهت (بار کششی و عرضی) وجود داشته باشد، بهتر است که از اتصالات با زاویه های فوم مثلثی ۵۰ و ۵۵ درجه استفاده شود تا اتصال T شکل صفحات ساندویچی در هر دو جهت بار اعمالی از مقاومت مناسبی برخوردار باشد.

نکته قابل توجه دیگر این است که نیروی شکست بیشینه (در مدل با زاویه فوم مثلثی ۶۰ درجه) در بارگذاری عرضی فقط در حدود ۱۳ درصد نیروی شکست بیشینه (در مدل با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه) اتصال تحت بار کششی است. در حالی که جابجایی اتصال یاد شده تحت بار عرضی ۷۱ درصد جابجایی اتصال با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه تحت بار کششی است.

همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، رفتار اتصال در این بارگذاری با رفتار آن تحت بار کشش خالص کاملاً متفاوت است. به طوری که در این بارگذاری، اتصال با زاویه فوم مثلثی ۶۰ درجه در مقایسه با سایر مدل‌های هندسی، بهترین عملکرد را از خود نشان داد، درحالی که در بارگذاری کشش خالص اتصال با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه دارای بهترین عملکرد بود. از طرفی انرژی جذب شده و حداکثر نیروی شکست اتصال نیز در بارگذاری عرضی به شدت کمتر از بارگذاری کششی می‌باشد. به بیان دیگر اتصال T شکل تحت بار عرضی بسیار ضعیف‌تر از حالتی است که اتصال مذکور تحت بار کششی قرار می‌گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود، در مجموع می‌توان گفت که تحت بار عرضی، اتصال با زاویه فوم مثلثی ۶۰ درجه بهترین عملکرد و اتصال با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه ضعیف‌ترین عملکرد را بین همه مدل‌های هندسی داشته اند. به عبارت دیگر تغییر زاویه فوم مثلثی از زاویه ۲۵ درجه به ۶۰ درجه باعث افزایش ۲۳۶ درصدی نیروی شروع شکست تحت بار عرضی گردیده است. برای مقایسه بهتر عملکرد مدل های هندسی مختلف تحت هر دو نوع

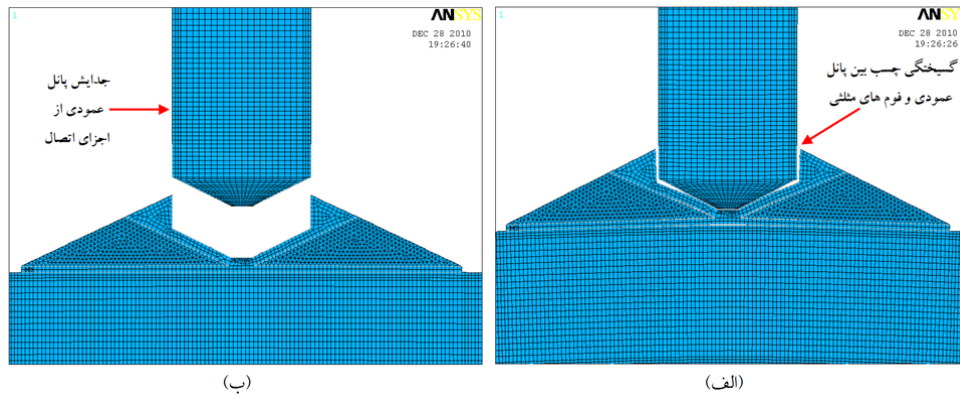
جدول ۲- مقادیر نیروی شکست، انرژی جذب شده توسط اتصال، جابجایی اتصال تا لحظه شروع شکست برای مدل های مختلف هندسی تحت بار کششی و بار عرضی

زاویه فوم مثلثی (درجه)	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰	۷۰
انرژی جذب شده تا لحظه شکست (J)	۱۰۴۵/۷	۲۴۲۰/۷	۳۹۳۷/۲	۸۰۶۳/۸	۹۵۴۴/۲	۵۶۱۶/۴	۴۳۳۹/۷	۴۱۰۳/۴	۲۶۸۹/۸
نیروی شروع شکست (kN)	۷۳/۴	۱۱۰	۱۳۲/۸	۱۶۹/۸	۱۷۵	۱۵۲/۶	۱۳۲/۷	۱۳۳/۵	۱۱۱/۸
جابجایی تا لحظه شکست (mm)	۲۵/۶	۴۰/۹	۵۳/۲	۷۹/۴	۸۷/۸	۶۴/۵	۵۴	۵۴/۵	۴۲/۳
	۱۶/۷	۲۲/۶	۲۶	۴۷/۸	۴۸/۸	۵۵	۶۰/۳	۶۲/۸	۵۲/۹

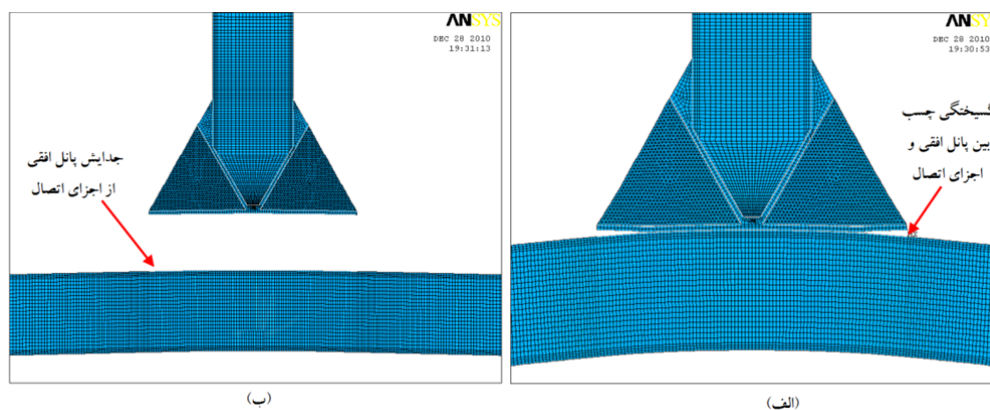
#### ۴-۳- بررسی انواع مدهای شکست اتصال

باشد و دسته دوم مدل‌هایی هستند که در نهایت صفحه ساندویچی عمودی از اتصال جدا می‌شود در مجموع می‌توان گفت در مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۴۵ درجه و بزرگتر از آن، اتصال به علت جدایش صفحه ساندویچی عمودی از اتصال گسیخته می‌شود. در حالی که در سایر اتصالات (اتصالات با زاویه فوم مثلثی ۲۵ تا ۴۰ درجه) جدایش صفحه ساندویچی افقی باعث گسیختگی اتصال می‌شود. انواع مدهای شکست ذکر شده در شکل ۱۲ تا ۱۳ نشان داده شده است. تحت بار عرضی نیز می‌توان مدل‌های هندسی مختلف اتصال را بر اساس نوع گسیختگی چسب و محل شروع جدایش چسب به دو گروه کلی تقسیم کرد. در این حالت بارگذاری نیز جدایش چسب در نهایت منجر به گسیختگی صفحه ساندویچی عمودی و یا افقی از اتصال می‌شود. تحت بار عرضی، مدل شکست در مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه تا ۵۰ درجه، گسیختگی چسب و جدایش صفحه ساندویچی عمودی از اتصال می‌باشد، در حالی که در مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۵۵، ۶۰ و ۷۰ درجه، شکست اتصال بر اثر گسیختگی چسب و جدایش صفحه ساندویچی افقی از اتصال می‌باشد.

همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، در صورت استفاده از فوم ضعیف (با مقاومت برشی پایین) در ساخت صفحات ساندویچی، تحت بار کششی هسته صفحه ساندویچی افقی آسیب می‌بیند. به بیان دیگر، مدل شکست اتصال شکست برشی هسته می‌باشد. برای مثال می‌توان به نمونه ای که برای صحنه‌گذاری ماکرو کد نوشته شده در نرم افزار بررسی شده است اشاره کرد. از آن جا که در آن نمونه جنس هسته از فوم Divinycell H100 می‌باشد، هسته قبل از این که خود اتصال به مقاومت نهایی خود برسد، آسیب می‌بیند (شکل ۹). اما در صورتی که از فوم قوی‌تری همچون Divinycell HCP70 برای ساخت صفحه ساندویچی استفاده شود، صفحه ساندویچی از مقاومت لازم برخوردار شده و در نهایت خود اتصال دچار آسیب خواهد شد. اما نکته مهم این است که تمام مدل‌های هندسی دارای مدل شکست یکسان نیستند. به عبارت دیگر با تغییر زاویه فوم مثلثی محل شروع گسیختگی چسب در مدل‌ها متفاوت می‌باشد. در نهایت در بارگذاری کششی مدل‌ها را می‌توان به دو دسته جداگانه تقسیم کرد. دسته اول مدل‌هایی هستند که گسیختگی چسب در آن‌ها باعث جدایش صفحه ساندویچی افقی از اتصال می‌-



شکل ۱۲: مد شکست اتصال با زاویه فوم مثلثی ۲۵ تا ۴۰ درجه تحت بار کششی  
الف) لحظه شروع جدایش (ب) بعد از جدایش کامل



شکل ۱۳: مد شکست اتصال با زاویه فوم مثلثی ۴۵ تا ۷۰ درجه تحت بار کششی  
الف) لحظه شروع جدایش (ب) بعد از جدایش کامل

زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه تا ۵۰ درجه) به سرعت صفر نشده و نمودار نیرو-تغییر مکان این اتصالها در فرم نمودار شکل ۱۴ می‌باشد. اما از آن جا که نیروی شروع شکست، جابجایی اتصال و میزان انرژی جذب شده توسط اتصال تا لحظه شروع شکست مورد توجه است، همه نمودارها در شکل ۱۱ تا لحظه شروع شکست رسم شده اند.

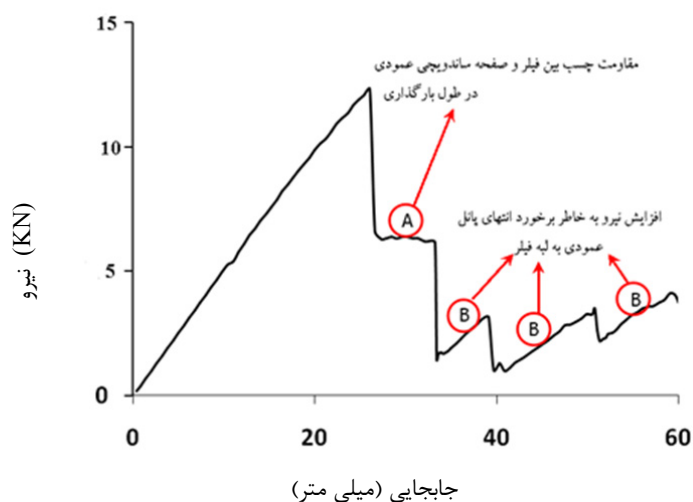
همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، بعد از شروع شکست در بخشی از نمودار نیروی شکست ثابت بوده (منطقه A) و در بخشی از آن نیروی شکست افزایش می‌یابد (منطقه B). دلیل ثابت بودن نیروی شکست در محدوده A (بعد از شروع شکست)، تغییر ناگهانی جهت مسیر شماره ۳ و در نتیجه تبدیل حالت شکست چسب از شکست عمودی به شکست برشی و در نتیجه افزایش

در مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۵۵، ۶۰، ۷۰ درجه که چسب بین فیلر و صفحه ساندویچی افقی گسیخته می‌شود، شکست بسیار سریع اتفاق افتاده (همانند شکست در بارگذاری تحت کشش خالص) و کل چسب روی مسیر شماره ۲ در فاصله زمانی بسیار کمی گسیخته می‌شود. به همین دلیل تحت بار عرضی، نیروی اتصال در نمودار نیرو-تغییر مکان این مدل‌های هندسی (مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۵۵، ۶۰ و ۷۰ درجه) به سرعت صفر می‌شود (شکل ۱۱).

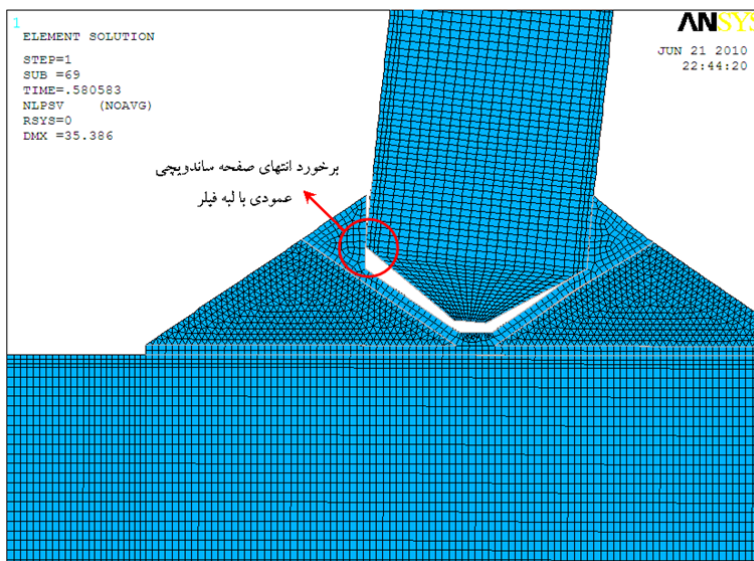
در حالی که در مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه تا ۵۰ درجه (که گسیختگی چسب بین فیلر و صفحه ساندویچی عمودی باعث شکست اتصال می‌گردد)، بین زمان شروع شکست تا کامل شدن آن فاصله وجود دارد. به عبارت دیگر، نیروی شکست در این اتصالها (مدل‌های با

مسیر اصلی خود، با لبه فیلر برخورد کرده و در مقابل جابجایی عرضی مقاومت می‌کند. شکل ۱۵ نشان دهنده لحظه برخورد انتهای صفحه ساندویچی عمودی با لبه فیلر می‌باشد. از حرکت آزاد صفحه ساندویچی در جهت بار وارده (جهت عرضی) شده و باعث افزایش نیروی شکست اتصال می‌گردد (منطقه B در شکل ۱۴). در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که تحت بار عرضی در مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه تا ۵۰ درجه، گسیختگی چسب بین فیلر و صفحه ساندویچی عمودی شروع می‌شود.

مقاومت چسب می‌باشد. چراکه چسب در برابر نیروی برشی مقاومت بیشتری نسبت به نیروی عمودی دارد (همانطور که در جدول ۲-۳ مشاهده می‌شود، بیشترین تنش برشی چسب‌های به کار رفته حدود ۳/۵ برابر تنش-های عمودی این چسب‌ها می‌باشد). دلیل افزایش نیرو بعد از شروع شکست (محدوده B) برخورد انتهای صفحه ساندویچی عمودی با لبه فیلر می‌باشد. در مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه تا ۵۰ درجه، انتهای صفحه ساندویچی عمودی بعد از جدایش از اتصال و انحراف از



شکل ۱۴: نمودار کامل نیرو-تغییر مکان مدل هندسی با زاویه فوم مثلثی ۳۵ درجه (از لحظه شروع بارگذاری تا اتمام آن)



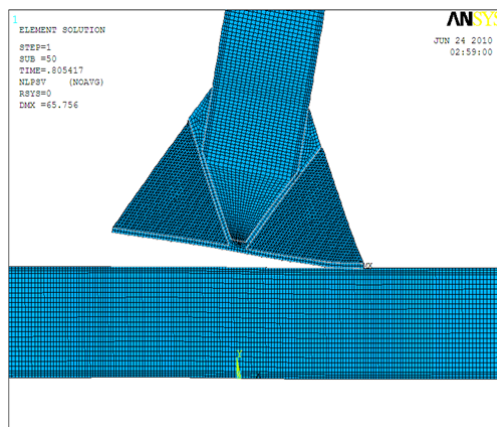
شکل ۱۵: برخورد انتهای صفحه ساندویچی عمودی با لبه فیلر که باعث تولید نیرو در مقابل جابجایی عرضی می‌شود (مدل هندسی با زاویه فوم مثلثی ۳۵ درجه).

برشی هسته صفحه ساندویچی افقی (۲) گسیختگی چسب، که هر دو مد شکست در مدل المان محدود شبیه سازی و بررسی شده است. در نهایت نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تست تجربی موجود در مراجع گذشته صحت گذاری شدند، به طوری-که نیروی شکست پیش بینی شده توسط حل عددی فقط ۵٪ با نیروی شکست حاصله از تست تجربی اختلاف داشت. در ضمن مد شکست پیش‌بینی شده توسط حل المان محدود شباهت بسیاری با نتایج تست تجربی داشت. تحقیقات انجام شده نشان دادند که زاویه فوم مثلثی مهمترین پارامتر هندسی می‌باشد که عملکرد اتصال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به همین دلیل برای بررسی اثر این پارامتر، ۹ مدل هندسی متفاوت که فوم‌های مثلثی آن‌ها دارای زوایای ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۷۰ درجه می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفتند.

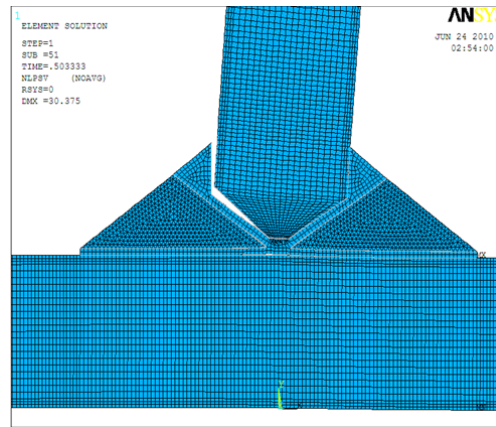
در حالیکه در مدل‌های با زاویه فوم مثلثی ۵۵ درجه تا ۷۰ درجه گسیختگی چسب بین فیلر و صفحه ساندویچی افقی شروع می‌شود. شکل شماره ۱۶ نشان دهنده هر دو حالت شکست مذکور می‌باشد.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مدلی دو بعدی برای تحلیل غیر خطی اتصال T شکل پانل‌های ساندویچی ساخته شد. در مدل مذکور از المان‌های تماسی و مدل منطقه چسبنده برای شبیه‌سازی گسیختگی چسب استفاده شده است. به علاوه، شکست برشی هسته پانل‌های ساندویچی نیز با استفاده از کد نوشته شده در نرم افزار ANSYS مدل-سازی شده است. نتایج تست تجربی موجود در مراجع گذشته نشان دادند که اتصال T شکل صفحه‌های ساندویچی دارای دو مد شکست می‌باشند: (۱) شکست



(ب)



(الف)

شکل ۱۶: مد شکست اتصال. (الف) مدل‌های هندسی با زاویه فوم مثلثی ۲۵ تا ۵۰ درجه، (ب) مدل‌های هندسی با زاویه فوم مثلثی ۵۵ تا ۷۰ درجه.

جذب شده توسط اتصال تحت بارگذاری کشش خالص گردید. در ادامه تاثیر تغییر زاویه فوم مثلثی بر عملکرد اتصال تحت بارگذاری عرضی نیز بررسی شد. این بارگذاری از این نظر دارای اهمیت بالایی می‌باشد که در مراجع قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، در حالی

زاویه‌ها و سایر ابعاد اتصال به گونه‌ای تغییر کردند که در نهایت حجم فیلر در تمام مدل‌ها یکسان می‌باشد. آنالیزها نشان دادند که تغییر زاویه فوم مثلثی تاثیر زیادی بر عملکرد اتصال دارد. به گونه‌ای که تغییر این زاویه از ۲۵ درجه به ۴۵ درجه باعث افزایش ۸۱۲ درصدی انرژی

که رفتار اتصال در این بارگذاری با بارگذاری کشش خالص متفاوت می باشد. در بارگذاری عرضی اتصال با زاویه فوم مثلثی ۶۰ درجه مقاومترین اتصال بین همه مدل های هندسی بود. به طوری که نیروی شکست این اتصال ۳/۳۶ برابر نیروی شکست اتصال با زاویه فوم مثلثی ۲۵ درجه (ضعیف ترین اتصال در بارگذاری مذکور) می باشد.

## ۶- مراجع

- [1] Sheno, Ra., Hawkins Gl. (1992) "Influence of Material And Geometry Variations On The Behavior Of Bonded Tee Connections In Frp Ships". COMPOSITES, 23:335-45.
- [2] BLAKE, J.I.R, SHENOI, R.A, HOUSE, J, TURTON, T. (2001). "Progressive Damage Analysis of Tee Joints With Visco elastic Inserts". COMPOSITE: PART A,32:641-653.
- [3] SHENOI, RA, VIOLETTE, FLM. (1990). "A Study Of Structural Composite Tee Joints In Small Boats". J COMPOS MATER, 24:644-66.
- [4] DODKINS, AR, SHENOI, RA, HAWKINS, GL. (1994). "Design Of Joints And Attachments In Frp Ships' Structures". MARINE STRUCT, 7:365-98.
- [5] PHILLIPS, HJ, SHENOI, RA. (1998), "Damage Tolerance Of Laminated Tee Joints In Frp Structures". COMPOS PART A, 29:465-78.
- [6] STICKLER, P.B, RAMULU, M., JOHNSON, P.S., P.S. (2000). "Experimental And Numerical Analysis Of Transverse Stitched T-Joints In Bending". COMPOSITE STRUCTURES, 50:17-27.
- [7] STICKLER, P.B, RAMULU, M, (2002). "Parametric Analyses Of Stitched Composite T-Joints By The Finite Element Method". MATERIALS AND DESIGN, 23 : 751-758.
- [8] BLAKE, J.I.R, SHENOI, R.A, HOUSE, J, TURTON, (2001). "T. Progressive Damage Analysis Of Tee Joints With Viscoelastic Inserts". COMPOSITE: PART A;32:641-653.
- [9] DHARMAWAN, F., THOMSON, RS., LI, H., HERSZBERG, I., GELLERT, E. (2004). "Geometry And Damage Effects In A Composite Marine T-Joint". COMPOS STRUCT, 66:181-7.
- [10] RISPLER, AR., STEVEN, GP., TONG, L. (1997), "Failure Analysis Of Composite T-Joints Including Inserts". J REINF PLASTIC COMPOS; 16:1642-58.
- [11] LI, H.C.H., DHARMAWAN, F., HERSZBERG, I., JOHN, S. (2006). "Fracture Behavior of Composite Maritime T-Joints. COMPOS STRUCT". 75:339-50.
- [12] TURAGA, UV.RS., SUN, CT. (2000). "Failure Modes And Load Transfer In Sandwich T-Joints". J SANDWICH STRUCT MATER, 2:225-45.
- [13] THEOTOKOGLU, EE., MOAN, TJ. (1996). "Experimental and Numerical Study Of Composite Tee-Joints". J COMPOS MATER, 30:190-209.
- [14] ZHOU, D.W., LOUCA, L.A., SAUNDERS, M. (2008). "Numerical Simulation of Sandwich T-Joints under Dynamic Loading". COMPOSITES: PART B, 39: 973-985.
- [15] TOFTEGAARD, H., LYSTRUP, A. (2005). "Design and Test Of Lightweight Sandwich T-Joint For Naval Ships". COMPOSITES: PART A, 36:1055-1065.
- [16] Khalili, S.M.R., Ghaznavi, A. (2011) "Numerical Analysis Of Adhesively Bonded T-Joints On Structural Sandwiches And Study Of Design Parameters On Their Performance" INTERNATIONAL JOURNAL OF ADHESION & ADHESIVES 31347-356
- [17] Khalili, S.M.R, Ghaznavi, A. (2012). "Behavior and Failure Modes Of Sandwich T-Joint Using Cohesive Zone Material Model And Contact Elements". Journal of Applied Composite Materials, , DOI: 10.1007/s10443-012-9248-9, ISSN: 1573-4897



- [18] Ghaznavi, A., Ghaznavi, A., Khalili, S.M.R. (2012). "Failure Prediction And Load Distribution Of Sandwich T-Joint In Marine Structures". Archives Des Sciences Journal (ISSN: 1661-464X), Volume. 65, Issue. 6,
- [۱۹] خلیلی، م.، غزنوی، آ. (۱۳۹۰). "مدلسازی عددی اتصال تی شکل صفحات ساندویچی". مجله علمی-پژوهشی امیرکبیر.
- [20] KUMARI, S., SINHA, PK. (2002). "Finite Element Analysis of Composite Wing Tjoints". J REINF PLASTIC COMPOS, 21:1561-85.
- [21] EARL, J.S., DULIEU-BARTON, J.M., SHENOI, R.A. (2003). "Determination of Hygrothermal Ageing Effects In Sandwich Construction Joints Using Thermoelastic Stress Analysis". COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY, 63: 211-223.
- [22] NESER, G., DILER, E., OZES, C., (2009). "Effect Of T-Joint Geometry On The Performance Of A Grp/Pvc Sandwich System Subjected To Tension". JOURNAL OF REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, 28: 49-58.
- [23] STACA, F. L., (1986). "Applied Finite Element Analysis for Engineers". THE DRYDEN PRESS.
- [24] TECHNICAL MANUAL, DIVINYCELL HD, COPYRIGHT © DIAB GROUP AB OCTOBER 2009.
- [25] LIM, T., LEE, C., LEE, D.G. (2004). "Failure Modes Of Foam Core Sandwich Beams Under Static And Impact Loads". JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS, 38; 1639-1662.
- [27] ANSYS, USER'S MANUAL.
- [28] ALFANO, G., CRISFIELD, M.A. (2001). "Finite Element Interface Models For The Delamination Anaylsis Of Laminated Composites: Mechanical And Computational Issues". INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING, 50: 1701-1736.