

# مطالعه اجزای محدود مود شکست و تأثیر پارامترهای مؤثر بر استحکام اتصالات سازه ساندویچی به کاررفته در ماهواره

مجید صفرآبادی فراهانی<sup>۱</sup>، حسین بیگدلی<sup>۲</sup>

۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، msafarabadi@ut.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۳

## چکیده

صفحات ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری به دلیل استحکام ویژه<sup>۱</sup> (نسبت استحکام به وزن) و سفتی ویژه<sup>۲</sup> (نسبت سفتی به وزن) بالا، به صورت گسترده در سازه اصلی ماهواره به کار می‌روند. بنابراین، با توجه به کاربرد این نوع صفحات و لزوم پیاده‌سازی بحث اتصالات در سازه‌های فضایی، مدلسازی و تحلیل این اتصالات امری لازم به نظر می‌رسد. در این پژوهش، یک مدل اجزای محدود برای پیش‌بینی رفتار این نوع اتصالات تحت بارگذاری pull-out ارائه شده است. این مدل دربرگیرنده تمامی اجزای اتصال شامل هسته، پوسته، المان چسبی، پیچ و اینزرت<sup>۳</sup> می‌باشد. از نرم افزار آباکوس 6.14 برای شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج تحلیل حاضر نشان داد که تحت بار کششی، در ناحیه چسب بین باله پایینی اینزرت و پوسته کامپوزیتی بیشترین تنش اتفاق می‌افتد. مقایسه نتایج اجزای محدود حاصل از این پژوهش، با نتایج آزمایش موجود پیشین مؤید مود تخریب در اتصال می‌باشد. در نهایت، تأثیر خصوصیات هسته و پوسته کامپوزیتی بر بار شکست اتصالات مورد بررسی قرار گرفت که چگالی هسته، بیشترین تأثیر را بر بار شکست داشت.

## واژگان کلیدی

صفحه ساندویچی، هسته لانه‌زنبوری، اینزرت، المان چسبی، تحلیل اجزای محدود

### ۱. مقدمه

مناسب کامپوزیت‌های لانه‌زنبوری<sup>۴</sup> در طراحی و ساخت سازه‌های فضایی، بسیاری از توجهات به سمت این مواد معطوف شده است. از ساختار ساندویچی، که در آن دو صفحه کامپوزیتی به دو طرف هسته داخلی متصل شده‌اند، به صورت گسترده در صنعت هوافضا استفاده می‌شود. ساختار ساندویچی مورد نظر در شکل ۱ نمایش

کاهش جرم در طراحی همواره از جمله چالش‌های پیش روی مهندسان بوده است. نمونه‌ای نوعی از آن در صنعت هوافضاست؛ جایی که هر کیلوگرم جرم اضافی در جرم ساختار، هزینه‌های چشمگیری را به متصدیان شرکت‌ها، به خصوص در بحث پرتاب تحمیل می‌کند. در دهه اخیر، به دلیل وزن کم و سفتی و استحکام

داده شده است. در این ساختار، صفحات کامپوزیتی با لایه‌های چسب به هسته متصل می‌شوند. هسته وزن کمی دارد و معمولاً از جنس آلومینیوم و با هندسه لانه‌زنبوری می‌باشد. پانل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری در ساخت هواپیما و بالگرد نیز به‌کار می‌رود. برای مثال، در کف هواپیما، درب‌ها و باله عقب هواپیما استفاده می‌شود [۱].

چون پانل‌های ساندویچی اساساً برای تحمل بارهای محلی مناسب نیستند، سازه ساندویچی باید اتصالاتی را فراهم کند تا بار محلی به سازه‌های دیگر منتقل شود. از جمله کاربردهای این اتصالات در سازه اصلی ماهواره است. در سازه یک ماهواره کوچک، مانند ماهواره STSAT III کشور کره، در حدود ۴۰۰ مورد از این نوع اتصالات وجود دارد [۲]. از کامپوزیت‌های ساندویچی، به‌صورت گسترده در صنایع هوانوردی و دریانوردی استفاده می‌شود [۳]. به‌دلیل کارایی مناسب سازه‌های ساندویچی در برابر گشتاورهای خمشی، این مواد به‌طور گسترده در ساخت کشتی‌ها، لنگرگاه‌ها، قطارها، خودروها و توربین‌های بادی به‌کار می‌روند [۴]. بررسی و تحلیل اتصالات در کامپوزیت‌های ساندویچی از اینرو اهمیت دارد که در بسیاری از کاربردها، به‌دلیل عدم وجود فضای مناسب جهت ایجاد رزوه در هسته، اتصال تخریب خواهد شد. محل اتصال پانل ساندویچی به اجزاء یا پانل‌های دیگر از موقیعت‌های محتمل برای شکست تحت بارگذاری می‌باشد. هندسه اینزرت و جنس هسته در نوع شکست اتصال تأثیر می‌گذارند [۵]. برای پایه‌ریزی انواع مختلف اتصال پانل‌های ساندویچی به هم از اینزرت‌ها استفاده می‌شود. وظیفه اصلی چنین اینزرت‌هایی انتقال بار به پوسته ساختار ساندویچی است [۶]. درعمل بارهای کششی نرمال به سطح ساختار ساندویچی و بارهای برشی موازی با سطح رایج‌ترین نوع بارگذاری می‌باشند؛ زیرا بارهای فشاری محلی و خمش به‌دلیل ارتفاع بالای سطوح تأثیر چندانی ندارند و پیچش تنها در زمان مونتاژ و تولید وارد می‌شود. برای مثال در اتصالات T، که در آن دو پانل در وضعیت بر هم عمود به‌هم وصل می‌شوند. این اینزرت‌ها معمولاً تحت بار خارج از صفحه قرار می‌گیرند و استحکام آنها در برابر این نیرو (pull-out strength) یک فاکتور محدودکننده برای استحکام کلی اتصال T می‌باشد [۷].

در مدلسازی این اتصالات معمولاً ساده‌سازی‌هایی صورت می‌گیرد. در برخی تحقیقات [۲]، با هدف بررسی رفتار کلی اتصال،

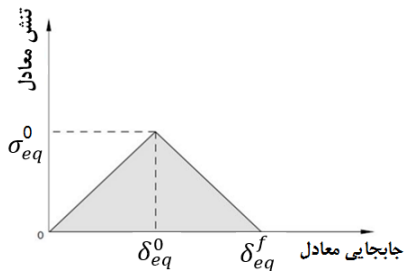
از المان‌های چسبی استفاده نشده است و یا مشخصات هندسی اتصال به‌طور کامل در نظر گرفته نشده‌اند. پژوهشگران به بررسی اینزرت‌ها در سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری پرداخته‌اند. تامسن، نظریه ورق‌های ساندویچی مرتبه بالا<sup>۵</sup> را ارائه کرد و آن را برای تحلیل ورق‌های ساندویچی با اینزرت‌هایی در طول ضخامت که به‌طور کامل در داخل پانل قرار گرفته‌اند انطباق داد. یک مدل ریاضی براساس ساده‌سازی‌های انجام شده توسعه یافت که در آن فرض می‌شد پوسته‌ها، مواد پرکننده و هسته لانه‌زنبوری، رفتار مواد الاستیک خطی همگن و همسانگرد را دارند [۸]. اینا و همکاران (۲۰۰۴) آثار خمش محلی پیرامون اینزرت‌ها را بررسی کردند [۹]. همچنین جوو و موریشیما (۲۰۱۱) تحلیل عددی و تجربی اتصالات T در کامپوزیت‌های ساندویچی تحت بار کششی و مدلسازی و تحلیل با روش اجزای محدود برای ارزیابی مقاومت اتصال در برابر بار کششی را انجام دادند [۱۰]. از مراجع داخلی نیز می‌توان به مدلسازی اجزای محدود اتصال T در پانل‌های ساندویچی در معرض بارگذاری کششی [۱۱] و بررسی تأثیر هندسه بر رفتار و مود شکست اتصال T شکل پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری عرضی [۱۲] اشاره کرد. در این مقاله، بر مدلسازی اجزای محدود اتصال با دو نوع اینزرت مختلف تمرکز شده است. برای این منظور یک مدل اجزای محدود کامل‌تر نسبت به مدل‌های پیشین ارائه شده است. مدلسازی همه اجزای اتصال، استفاده از معیارهای تخریب مناسب و توانایی پیش‌بینی بار شکست از مزایای مدل موجود در این مقاله است، هدف از این پژوهش، تعیین مود شکست و محل تخریب و همچنین بررسی تأثیر پارامترهای مختلف اتصال بر بار شکست می‌باشد.

## ۲. تشریح مدلسازی اجزای اتصال

### ۲-۱. مدل صفحه کامپوزیتی

جهت مدلسازی و تحلیل مواد کامپوزیتی علاوه بر شناخت رفتار تنش - کرنش، اطلاع از رفتار گسیختگی و حد بالای تنش و کرنش مجاز این مواد ضروری است. مقدار تنش و کرنش مجاز مواد کامپوزیت باید به‌گونه‌ای تعیین گردد که در اثر اعمال آنها گسیختگی در قطعه ایجاد نشود. افزایش تنش‌ها بیشتر از مقدار بحرانی، موجب گسیختگی ماده کامپوزیتی می‌شود. برای این منظور نیاز است معیار مناسبی برای گسیختگی مواد کامپوزیتی تعریف شود. معیار تخریب هشین<sup>۶</sup> به‌عنوان معیار شروع گسیختگی

پارامترهای آسیب مربوط به شکست الیاف، ماتریس و شکست برشی هستند. پارامترهای تکامل آسیب در هر چهار مود شکست از رفتار نمودار تنش - جابه‌جایی (شکل ۲) استنتاج می‌شوند. همچنین  $\delta_{eq}^0$  جابه‌جایی معادل در زمان شروع گسیختگی و  $\delta_{eq}^f$  مقدار جابه‌جایی است که در آن ماده به‌طور کامل گسیخته می‌شود. شیب مثبت منحنی تنش - جابه‌جایی برای قبل از شروع گسیختگی، طبق رفتار مواد الاستیک خطی است. شیب منفی برای بعد از شروع گسیختگی با تکامل پارامترهای آسیب مربوطه طبق معادلات زیر به‌دست می‌آید.



شکل ۲. نمودار تنش معادل بر حسب جابه‌جایی معادل [۱۳]

مود اول: کشش الیاف

$$\begin{cases} \delta_{eq}^{\#} = L^c \sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2} \\ \sigma_{eq}^{\#} = \frac{\sigma_{11} \varepsilon_{11} + \alpha \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{\#} / L^c} \end{cases} \quad \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \quad (4)$$

مود دوم: فشردگی الیاف

$$\begin{cases} \delta_{eq}^{\#} = L^c \langle -\varepsilon_{11} \rangle \\ \sigma_{eq}^{\#} = \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle}{\delta_{eq}^{\#} / L^c} \end{cases} \quad \hat{\sigma}_{11} < 0 \quad (5)$$

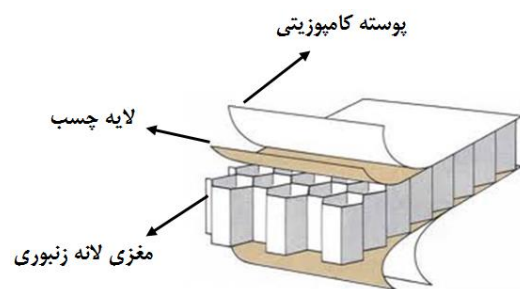
مود سوم: کشش ماتریس

$$\begin{cases} \delta_{eq}^{mi} = L^c \sqrt{\langle \varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2} \\ \sigma_{eq}^{mi} = \frac{\langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{mi} / L^c} \end{cases} \quad \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \quad (6)$$

مود چهارم: فشردگی ماتریس

$$\begin{cases} \delta_{eq}^{mc} = L^c \sqrt{\langle -\varepsilon_{22} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2} \\ \sigma_{eq}^{mc} = \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{mc} / L^c} \end{cases} \quad \hat{\sigma}_{22} < 0 \quad (7)$$

در صفحه کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. در این معیار، باید از المان‌هایی با فرمولاسیون تنش صفحه‌ای استفاده شود. این معیار، شامل سازوکارهای گسیختگی در الیاف و رزین (ماتریس) می‌باشد و روابط گسیختگی الیاف و ماتریس در اثر کشش یا فشار به‌صورت مجزا می‌باشد که این مطلب نشانگر این است که برای الیاف و ماتریس می‌توان شروع گسیختگی را در چهار مود به‌صورت مجزا دید. شکست در اثر کشش الیاف، فشردگی الیاف، کشش ماتریس یا فشردگی ماتریس. به‌دلیل سازگاری معیار تکامل گسیختگی با این معیار به‌خاطر تفکیک مودهای شکست، از آن استفاده شده است. برای بررسی رفتار کامپوزیت بعد از شروع گسیختگی، مدل تکامل آسیب<sup>۷</sup> تعریف شده است که در ادامه تشریح می‌شود.



شکل ۱. ساختار ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری

قبل از شروع گسیختگی، رفتار مواد به‌صورت الاستیک خطی با ماتریس سفتی مواد اورتوتروپیک<sup>۸</sup> در حالت تنش صفحه‌ای می‌باشد؛ بنابراین پاسخ مواد از معادله<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود [۱۳].

$$\sigma = C_d \varepsilon \quad (1)$$

به‌طوری‌که  $\varepsilon$  کرنش و  $C_d$  ماتریس الاستیسیته در حین شروع

گسیختگی است که به‌صورت ۲ به‌دست می‌آید:

$$C_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & & & & \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_2 & & & & \\ 0 & & & & \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 & & & \\ (1-d_m)E_2 & 0 & & & \\ 0 & & & & (1-d_s)GD \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)v_{12}v_{21} \quad (3)$$

باید توجه داشت که  $E_1$  مدول یانگ در جهت الیاف،  $E_2$  مدول

یانگ در جهت عمود بر الیاف،  $G$  مدول برشی و  $v_{21}$  و  $v_{12}$  ضرایب پواسون هستند. پارامترهای  $d_f$ ،  $d_m$  و  $d_s$  به‌ترتیب

طول مشخصه ( $L^c$ ) براساس فرمولاسیون و هندسه المان تعیین می‌شود. نماد  $\langle \rangle$  در معادلات فوق، عملگر براکت ماکولی<sup>۹</sup> را نشان می‌دهد. بعد از شروع گسیختگی ( $\delta_{eq}^0 \geq \delta_{eq}$ ) با رفتاری مطابق شکل ۲، پارامتر آسیب برای یک مود خاص به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d = \frac{\delta_{eq}^f (\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)}{\delta_{eq}^f (\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)} \quad (8)$$

مقادیر  $\delta_{eq}^0$  برای مودهای مختلف به سفتی الاستیک و پارامترهای استحکام بستگی دارد که این پارامترها در قسمت تعریف روند شروع گسیختگی تعیین می‌شوند. در اینجا باید انرژی تلف شده ( $G^c$ ) به خاطر شکست برای هر مود مشخص شود که مقدار آن متناظر با مساحت زیر منحنی در نمودار تنش معادل برحسب جابه‌جایی معادل (شکل ۲) می‌باشد. مقدار  $G^c$  برای مودهای مختلف بستگی به مقدار  $\delta_{eq}^0$  مربوطه دارد. جدول ۱ مشخصات هندسی و جنس صفحات کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

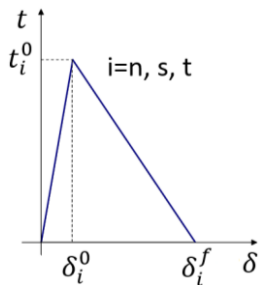
جدول ۱. مشخصات صفحات کامپوزیتی

جنس کامپوزیت	ضخامت (میلی‌متر)	لایه‌چینی
Graphite/Epoxy	0.5	[0/90] <sub>s</sub>
		[90/0] <sub>s</sub>
		[45/0] <sub>s</sub>
Glass/Epoxy	0.75	[0/90/0] <sub>s</sub>
		[0/90] <sub>2s</sub>
Boron/Epoxy	0.5	[0/90] <sub>s</sub>

## ۲-۲. مدل ناحیه چسبنده

در سال ۲۰۰۲ م، کامانهو فرمولاسیونی برای جایگذاری روابط مدل ناحیه چسبنده<sup>۱۱</sup> برای تحلیل تورق<sup>۱۱</sup> کامپوزیت‌ها تحت مودهای ترکیبی شکست، به صورت زیر برنامه‌ای<sup>۱۲</sup> در نرم افزار المان محدود آباکوس ارائه کرد [۱۴]. در این پژوهش المان‌های چسبی<sup>۱۳</sup> به صورت المان‌های سطحی بدون ضخامت، بین المان‌های بالایی و پایینی دو لایه کامپوزیت به هم چسبیده قرار می‌گرفتند و گسترش آسیب و رشد جدالایی بدون آگاهی از محل اولیه ترک، ابعاد و جهت آن مدلسازی شد. با توسعه این

روش در سال‌های بعد و انجام تحقیقات بیشتر [۱۵]، استفاده از مدل ناحیه چسبنده به‌عنوان ابزاری قدرتمند و قابل استفاده در نرم‌افزارهای المان محدود برای تحلیل دقیق‌تر اتصالات چسبی جایگزین سایر مدل‌ها شده است. همان‌گونه که در مکانیک شکست بیان می‌شود؛ ترک در قطعه می‌تواند در سه مود مختلف رشد کند. در مود ۱، ترک تمایل به بازشدن در جهت عمود بر مسیر ترک را دارد (مود نرمال). در حالت‌های ۲ و ۳ (مودهای برشی) ترک تمایل به رشد به صورت برشی دارد. در کاربردهای عملی معمولاً رشد ترک در ترکیبی از حالت‌های فوق صورت می‌گیرد. در مدل ناحیه چسبنده، رفتار رشد ترک با قانون کشش - جدایش<sup>۱۴</sup>، که رابطه بین تنش و جابه‌جایی دو سطح چسبنده را نشان می‌دهد، بیان می‌شود. ساده‌ترین نوع این قانون، نوع مثلثی است که در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. نمودار کشش - جدایش برای مود یک و دو [۱۳]

مطابق شکل ۳، پس از اعمال بار به اتصال (در هر مود) ابتدا تنش در آن تا یک نقطه بیشینه افزایش پیدا می‌کند و پس از نقطه ماکزیمم تنش، اتصال دچار آسیب شده و به تدریج استحکام آن تا صفر کاهش می‌یابد [۱۳]. مقادیر  $t_s^0$  و  $t_n^0$  به ترتیب استحکام نهایی در مود یک و دو و مقادیر  $\delta_s^0$  و  $\delta_n^0$  جابه‌جایی در زمان شروع آسیب در مود یک و دو و مقادیر  $\delta_s^f$  و  $\delta_n^f$  نیز جابه‌جایی‌ها در زمان شکست نهایی در اتصال هستند. مقادیر  $G_n^c$  و  $G_s^c$  نیز نرخ بحرانی آزادسازی انرژی در مود یک و دو هستند و مقادیر آنها برابر سطح زیر نمودار TSL است. رابطه تنش با کرنش در این قانون مطابق رابطه زیر است:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{ns} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{nt} & k_{st} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = k \delta \quad (9)$$

که ماتریس  $K$ ، ماتریس سختی است و با تقریب مناسبی می‌توان گفت:

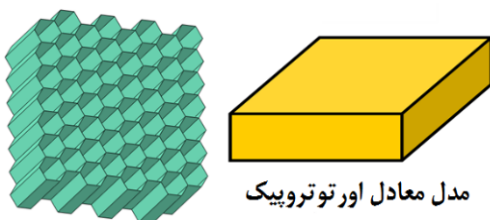
می‌شود، از ضخامت چسب صرفنظر می‌شود [۱۳]. در این پژوهش برای دستیابی به دقت بالاتر و بررسی رفتار لایه چسب با جزئیات بیشتر از المان‌های چسبی استفاده شده است. با این رویکرد می‌توان جدایش و تخریب لایه چسب را بهتر مورد بررسی قرار داد. در جدول ۲ مشخصات چسب به کار رفته در این مطالعه آورده شده است.

### ۲-۳. مدل هسته لانه‌زنبوری

در برخی موارد، بارهای روی اتصال پیچی می‌تواند سبب کماتش هسته لانه‌زنبوری شود که این اتفاق خیلی زودتر از شکست نهایی اتصال رخ می‌دهد. مدلسازی دقیق کماتش هسته لانه‌زنبوری در یک اتصال، یک ابزار مفید برای طراحی می‌باشد. در مدل‌های اجزای محدود اتصالات در ساختارهای ساندویچی، هندسه لانه‌زنبوری می‌تواند با المان‌های پوسته‌ای مدلسازی شود. این کار برای مدل کردن کماتش آنها انجام می‌شود. این رویکرد مدلسازی نیازمند تلاش بیشتر و افزایش اندازه مدل در مقایسه با حالتی است که برای مدلسازی هسته از المان‌های همگن معادل<sup>۱۷</sup> استفاده می‌شود. به هر حال، این کار برای بررسی رفتار هسته مجاور اینزرت با جزئیات بیشتر مناسب می‌باشد [۲۰]. در اینجا از المان‌های پوسته‌ای<sup>۱۸</sup> برای مدلسازی هسته استفاده شده است و مشخصات هندسی ساختار مد نظر قرار گرفته‌اند. در بیشتر تحقیقات پیشین [۲] و [۵]، هسته به صورت یک بلوک معادل اورتوتروپیک در نظر گرفته شده است. این مدل در شکل ۴ نمایش داده شده است. جدول ۳، مشخصات انواع هسته‌های لانه‌زنبوری استاندارد را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات لایه‌های چسب

جنس	E (GPa)	$\nu$	G (GPa)
Epoxy(FM300 M)	5.17	0.388	0.77



شکل ۴. هسته لانه‌زنبوری و مدل معادل آن

$$k_{sn} = k_{ns} = 0 \quad (10)$$

$$k_{st} = k_{ts} = 0 \quad (11)$$

$$k_{mt} = k_{nt} = 0 \quad (12)$$

در بسیاری از مراجع مقادیر ذیل در نظر گرفته می‌شوند:

$$k_{nn} = \frac{E}{t} \quad (13)$$

$$k_{ss} = k_{tt} = \frac{G}{t} \quad (14)$$

به طوری که مقادیر  $t$  و  $G$  و  $K$  به ترتیب ضخامت چسب، مدول برشی چسب و مدول الاستیک چسب می‌باشند. پارامتر آسیب<sup>۱۵</sup>  $D$  برای مدلسازی رفتار چسب، پس از رسیدن به آسیب تعریف می‌شود. مقدار آن قبل از شروع تخریب، برابر صفر و پس از شروع تخریب، به تدریج به یک می‌رسد و در این هنگام اتصال از هم جدا می‌شود [۱۶]. چنانچه افت خواص به صورت خطی در نظر گرفته شود:

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (15)$$

زیرنویس  $m$  مربوط به مود ترکیبی است. بالانویس  $0$  و  $f$  نیز مربوط به اولین نقطه گسیختگی و نقطه نهایی شکست در نمودار کشش - جدایش هستند. مقدار  $\delta_m$  از رابطه ۱۶ به دست می‌آید.

$$\delta_m = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} \quad (16)$$

مقدار  $\delta_m^{\max}$  ماکزیمم جابه‌جایی مؤثر در طول بارگذاری را نشان می‌دهد. معادله (۵) مقدار  $D$  را با فرض افت خواص خطی به دست می‌آورد. در صورتی که با توجه به نوع ماده به کار رفته، از قانون کشش - جدایش با نرم‌شوندگی نمایی استفاده شود؛ یعنی در شکل ۳، نمودار برای قسمت بعد از شروع گسیختگی، شکل نمایی داشته باشد، معادله ۱۵ نیز دارای جملات تابع نمایی خواهد بود. مهم‌ترین پارامترهای لازم برای تحلیل اتصال چسبی براساس TSL عبارت‌اند از: استحکام نهایی در مود یک و دو و نرخ آزادسازی انرژی در مود یک و دو. تعیین دقیق این پارامترها تأثیر به‌سزایی بر صحت تحلیل دارد. لذا روش‌هایی برای تعیین این پارامترها به صورت تجربی گسترش یافته‌اند [۱۷]. در این پژوهش، از مقادیر موجود در مراجع [۱۸] و [۱۹] استفاده شده است. نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس بر پایه مدل ناحیه چسبنده، دو رهیافت المان چسبی و سطح چسبنده را برای مدلسازی چسب ارائه می‌دهد که از لحاظ فرمول‌بندی مشابه‌اند. در رهیافت چسب سطحی، که در ماژول برهمکنش<sup>۱۶</sup> نرم‌افزار آباکوس تعریف

## ۲-۴. اینزرت‌ها

در این مقاله، دو نوع اینزرت بررسی شده است: نوع الف که در سرتاسر ضخامت پانل قرار می‌گیرد و نوع ب که از گونه اینزرت‌های کوتاه<sup>۱۹</sup> است. سوراخ‌هایی روی این اینزرت تعبیه شده است که از آنها برای ورود ماده پرکننده<sup>۲۰</sup> استفاده می‌شود. این ماده برای ثابت کردن اینزرت هنگام مونتاژ به‌کار می‌رود. در شکل ۵ نحوه اتصال و در جدول ۴ مشخصات اینزرت‌ها آمده است.

## ۳. شبیه‌سازی تست PULL-OUT

از جمله تست‌هایی که روی این نوع اینزرت‌ها انجام می‌شود، تست pull-out است. در شکل ۶ نمای شماتیک از این تست ارائه شده است. در این تست پیچی که داخل اینزرت قرار داده شده است به‌سمت بیرون کشیده می‌شود، در حالی که پانل با یک فیکسچر ثابت شده است. فیکسچر سوراخی دایره‌ای به قطر ۳۵ میلی‌متر در سمتی که تحت کشش قرار می‌گیرد دارد.

جدول ۳. مشخصات هسته لانه‌زنبوری

جنس	ضخامت (میلی‌متر)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضخامت دیواره (میلی‌متر)
5052 Al alloy	15	48	0.06
	20	83	
	25	128	

جدول ۴. مشخصات اینزرت‌ها

نوع اینزرت	جنس	ارتفاع (میلی‌متر)	قطر داخلی (میلی‌متر)
نوع الف	7075 Al alloy	20.5	4
نوع ب	7075 Al alloy	10	4



شکل ۵. نحوه اتصال اینزرت‌ها

مقید می‌شود، در ادامه با وارد نمودن نیروی متمرکز به این گره مینا، شبیه‌سازی صورت گرفته است. ربع استوانه کاملاً به سطح داخلی اینزرت چسبیده و نیرو را به‌طور کامل به آن منتقل می‌کند.

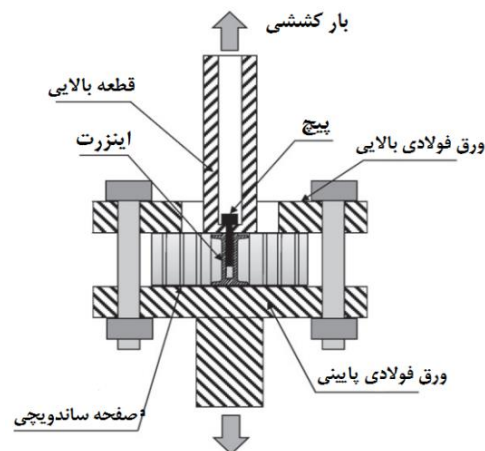
## ۴. مدل‌سازی اجزای محدود

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، مدل ارائه‌شده در این مطالعه، شامل پوسته کامپوزیتی، هسته لانه‌زنبوری، لایه چسبی، اینزرت و پیچ می‌باشد. مشخصات المان‌های به‌کار رفته در مدل‌سازی اجزای محدود، در جدول ۵ آورده شده است. مدل اجزای محدود مورد نظر در شکل ۷ نمایش داده شده است. برای مدل‌سازی ناحیه

به‌دلیل تقارن‌های موجود در تست pull-out، یک ربع کل سیستم مدل‌سازی شده است (شکل ۷). با این کار، حجم محاسبات و زمان حل مسئله کاهش می‌یابد. قیدهای تقارن، روی صفحات جانبی عمود بر صفحات کامپوزیتی اعمال شده است. برای اعمال شرایط مرزی تست، صفحه بالایی با توجه به قطر سوراخ فیکسچر و صفحه پایینی ثابت شده‌اند. پیچیدگی مدل به‌دلیل تماس‌های متعددی است که بین بخش‌های مختلف وجود دارد. بارگذاری موجود در این مسئله به‌صورت یک نیروی متمرکز در راستای Z است که باید به پیچ اعمال شود. به این منظور، ابتدا بخش ربع استوانه که به‌صورت صلب در نظر گرفته شده، به یک گره مینا<sup>۲۱</sup>

گره‌ای<sup>۲۲</sup> متصل شده‌اند. همچنین صفحه داخلی اینزرت، که در تماس با صفحه جانبی ربع استوانه می‌باشد، کاملاً به آن مقید شده است. برای تعریف تماس المان‌های پوسته‌ای هسته با المان‌های جامد در صفحات فوقانی و تحتانی از قید نوع shell to solid coupling در نرم‌افزار استفاده گردید. در اتصال با اینزرت نوع ب از خواص پرکننده (Epoxy FM410-1) برای تعریف مشخصات سطوح اشتراک آن با هسته و اینزرت استفاده شده است؛ زیرا گسیختگی و جدایش در این ناحیه به نوع ماده به کار رفته بستگی دارد.

چسبی بهتر است که از یک لایه المان جامد (solid) استفاده شود؛ زیرا به کارگیری چندین لایه المان در راستای ضخامت چسب می‌تواند منجر به نتایج غیر قابل اعتماد شود. تعیین صحیح جهت المان چسب بسیار اهمیت دارد؛ زیرا رفتار المان‌ها در راستای ضخامت با راستاهای داخل صفحه متفاوت است. تعریف روند تخریب برای المان‌های چسبی بر پایه انرژی می‌باشد که شامل چندین روش در نرم‌افزار است و با توجه به نوع چسب می‌توان روش مناسب‌تر را برگزید. المان‌های لایه چسب به صفحات کامپوزیتی و در نواحی اطراف اینزرت به صفحات مجاور آن با قید



شکل ۶. شماتیکی از تست PULL-OUT [۲]

جدول ۵. المان‌های مورد استفاده در مدل اجزای محدود

نام راجع المان	نوع المان	تعداد المان	نام بخش هندسی
COH3D8 <sup>۲۳</sup>	Cohesive element	144	لایه چسب
C3D8R <sup>۲۴</sup>	Solid element	4800	صفحات کامپوزیتی
S4R <sup>۲۵</sup>	Shell element	3480	مغزی لانه زنبوری
C3D8R	Solid element	3232	اینزرت الف
C3D8R	Solid element	5697	اینزرت ب
C3D8R	Solid and rigid	552	پیچ

## ۵. نتایج

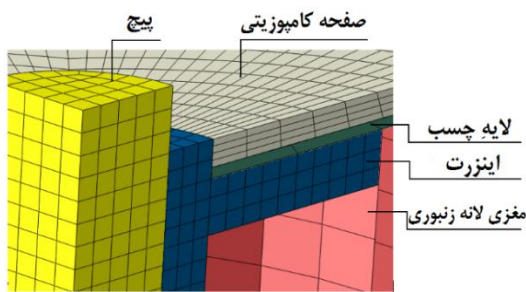
### ۵-۱. پارامترهای تخریب اتصالات

نمودار نیرو - جابه‌جایی از مهم‌ترین خروجی‌های تست pull-out است. معمولاً اولین نقطه ماکزیمم نسبی در نمودار نیرو - جابه‌جایی تجربی به‌عنوان بار شکست در نظر گرفته می‌شود. مقدار بار شکست اولیه در اتصال با اینزرت نوع الف، براساس مقدار پارامترهای تخریب برای لایه چسب در گام‌های حل مسئله تعیین

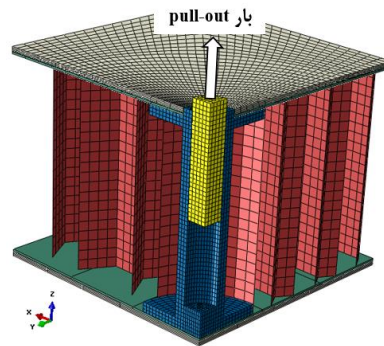
شرایط مرزی تست pull-out و تقارن‌های موجود در مسئله روی مدل اجزای محدود اعمال شده‌اند (شکل ۸). در قسمت‌های ثابت‌شده صفحات بالایی و پایینی، تمامی درجات آزادی جابه‌جایی ( $U1=U2=U3=0$ ) و چرخشی ( $UR1=UR2=UR3=0$ ) محدود شده‌اند. در صفحه تقارن جانبی اول (صفحه  $۱ \times ۳$ )، درجات آزادی  $U2=UR1=UR3=0$  می‌باشند، در صفحه تقارن جانبی دوم (صفحه  $۲ \times ۳$ ) نیز درجات آزادی  $U1=UR2=UR3=0$  هستند.

حاضر) و مشخصات هندسی هسته لانه زنبوری نادیده گرفته شده و هسته به صورت یک بلوک معادل در نظر گرفته شده است. همچنین تحلیل المان محدود مورد نظر، توانایی پیش بینی دقیق بارهای ماکزیمم شکست را ندارد. مدلسازی موجود در مقاله، برای دستیابی به اهدافی که مورد نظر پژوهشگر بوده انجام شده است. در نتیجه از مزایای مدل اجزای محدود حاضر نسبت به مدل مرجع [۲] می توان به تعریف معیارهای تخریب برای المانهای چسبی و مواد کامپوزیتی توانایی پیش بینی بارهای شکست، مدلسازی همه اجزای اتصال شامل پیچ، اینزرت و غیره اشاره کرد.

می شود. در اتصال با اینزرت نوع ب، مقدار بار شکست براساس وضعیت تماس های تعریف شده برای اینزرت در گام های حل مسئله به کمک نرم افزار محاسبه می شود. خروجی نمودار نیرو - جابه جایی تا نقطه شکست اولیه حاصل از شبیه سازی، انطباق مناسبی با نتایج تجربی موجود در مرجع [۲] دارد (شکل ۹). در مرجع [۲]، تست های تجربی انجام و یک مدل المان محدود ارائه شده است. همان گونه که در متن مرجع مذکور اشاره شده است، در مدل المان محدود ارائه شده، با هدف بررسی رفتار کلی اتصال چسبی، از المان های چسبی استفاده نشده است (برخلاف پژوهش

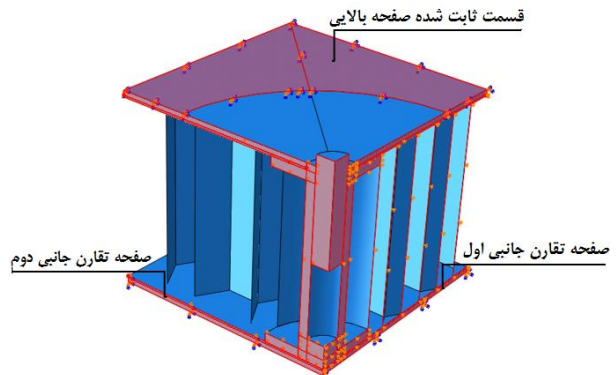
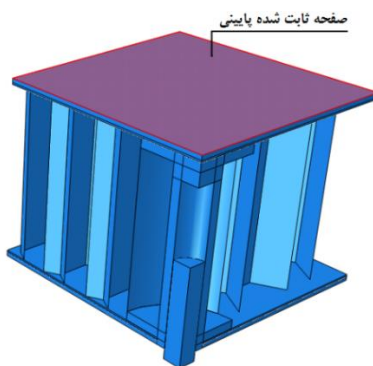


(ب)



غ

شکل ۷. نمای از الف) مدل اجزای محدود تست PULL-OUT؛ ب) بزرگنمایی بخش فوقانی مدل اجزای محدود



شکل ۸. نمایش شرایط مرزی و صفحات تقارن مدل اجزای محدود

چسب اتصال دهنده بین سطح پایینی اینزرت و صفحه کامپوزیتی رخ می دهد (شکل ۱۲). پس از شکست اولیه، سازه می تواند بار بیشتری نیز تحمل کند و در این وضعیت، صفحه کامپوزیتی بالای ناحیه اینزرت و ماده پرکننده صدمه قابل ملاحظه ای نمی بیند. وقتی جدایش اینزرت افزایش می یابد، هسته و ماده پرکننده زیر سطح کامپوزیت دیگر نمی تواند اینزرت را ساپورت کند، پس باید همه بار توسط پوسته کامپوزیتی تحمل شود، در چنین موقعیتی،

کانتور جابه جایی در جهت اعمال نیرو در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان دهنده وقوع تورق در لایه چسب بین سطح پایینی اینزرت و صفحه کامپوزیتی است. با محاسبه  $D$ ، کانتور پارامتر آسیب روی لایه چسب پایینی مطابق شکل ۱۱ به دست می آید که محل جدایش و تخریب با نتایج تجربی مطابقت دارد. نتایج تجربی موجود نیز نشان می دهد با افزایش بار در زمان تست، ابتدا تورق بین سطحی<sup>۲۶</sup> در لایه

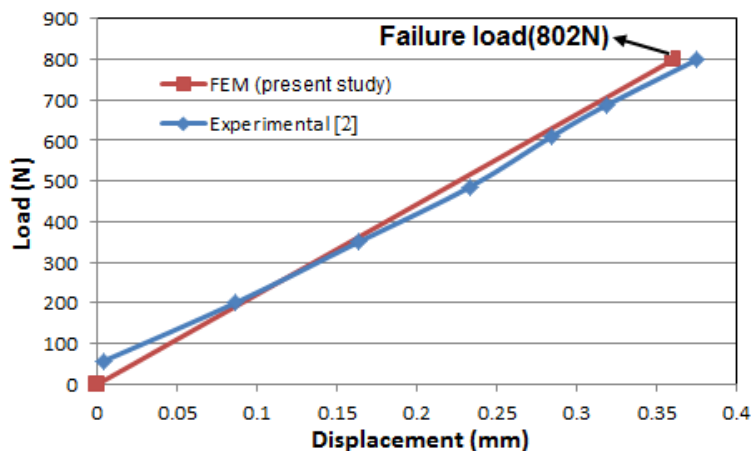


آمده است. به دلیل بالاتر بودن خواص مکانیکی کامپوزیت بوران - اپوکسی، با تغییر جنس صفحات از شیشه - اپوکسی به بوران - اپوکسی در اتصال با اینزرت‌های نوع الف و ب بار شکست به ترتیب ۴ و ۸ درصد بزرگتر می‌شود که میزان افزایش در نوع ب بیشتر است (شکل ۱۶). مطابق شکل ۱۷، با افزایش ضخامت کامپوزیت، میزان افزایش نسبی استحکام در اتصال با اینزرت نوع الف بیشتر خواهد بود. در ضخامت ثابت، چنانچه از اینزرت نوع ب استفاده شود، بار شکست حدود سه برابر زمانی است که از اینزرت نوع الف استفاده شود. همچنین با افزایش تعداد لایه‌ها از چهار به هشت، بار شکست در اینزرت نوع ب به میزان ۳۵ درصد و در اینزرت نوع الف ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، تغییر لایه‌چینی کامپوزیت تأثیر قابل توجهی بر بار شکست ندارد.

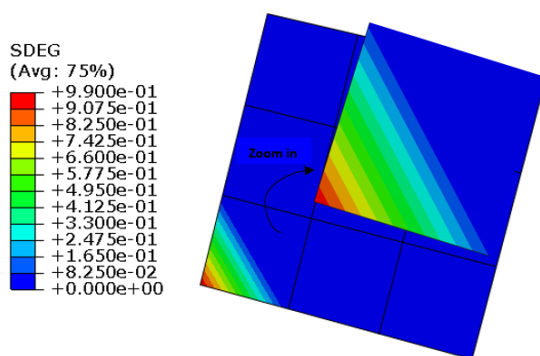
شکست نهایی اتصال روی خواهد داد. شکل ۱۳ کانتور متغیر وضعیت تماس<sup>۲۷</sup> برای سطوح اینزرت نوع ب قبل از شکست نهایی را نمایش می‌دهد. در پایان تحلیل، پارامترهای تخریب روی صفحات کامپوزیتی فوقانی در نواحی اطراف اینزرت گسترش خواهند یافت. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ پارامترهای مربوط به شروع تخریب طبق معیار هشین در مود اول را نشان می‌دهند.

## ۲-۵. تأثیر خصوصیات هسته و پوسته بر بار شکست

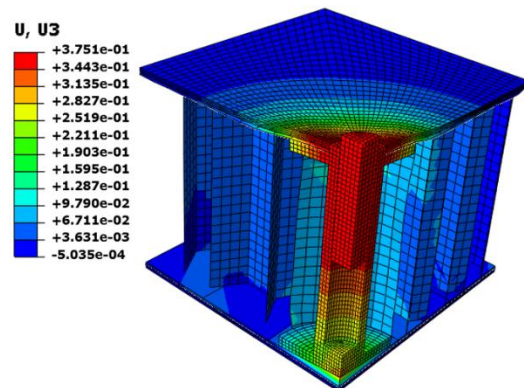
در این بخش تأثیر جنس پوسته کامپوزیتی و پارامترهای هندسی بر بار شکست PULL-OUT بررسی شده است. پارامترهای هندسی مورد بررسی عبارت‌اند از: ضخامت پوسته کامپوزیتی، لایه‌چینی پوسته، ضخامت هسته و چگالی آن. نتایج مربوط به تأثیر پارامترها بر بار شکست pull-out در شکل‌های ۱۶ تا ۲۰



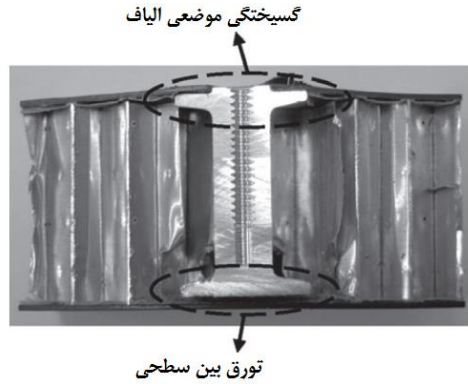
شکل ۹. مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی تجربی با خروجی مدل اجزای محدود (پژوهش حاضر) تا نقطه شکست اولیه برای اتصال با اینزرت نوع الف



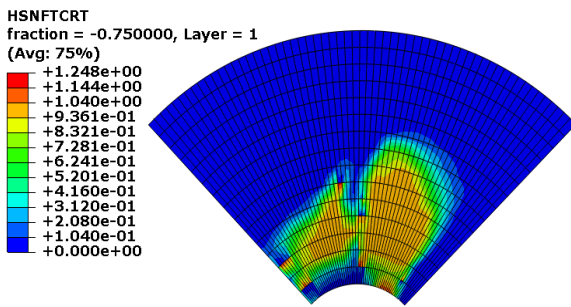
شکل ۱۱. کانتور پارامتر آسیب روی لایه چسب پایینی در اتصال با اینزرت نوع الف



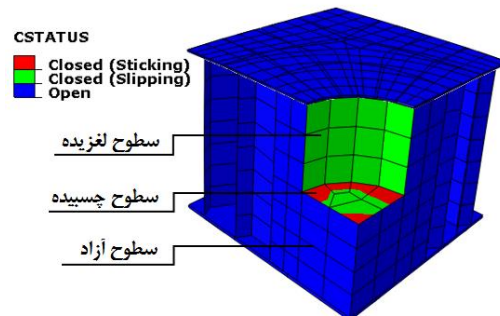
شکل ۱۰. کانتور جابه‌جایی در جهت اعمال نیرو (محور Z) با افزایش نیرو تا ۸۰۰ نیوتن برای اتصال با اینزرت نوع الف



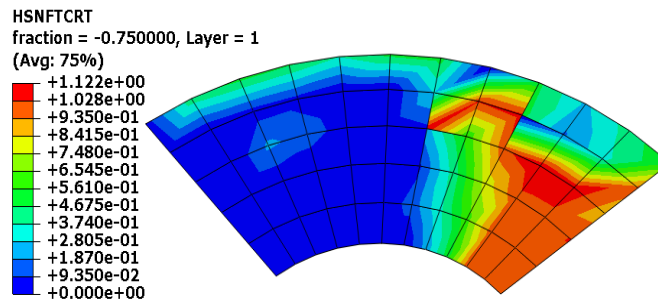
شکل ۱۲. نمونه تخریب شده اتصال با اینزرت نوع الف بعد از تست استاتیکی PULL-OUT [۲]



شکل ۱۴. کانتور پارامتر شروع تخریب در مود اول، طبق معیار هشین روی صفحه کامپوزیتی فوقانی از جنس کربن-اپوکسی در اتصال با اینزرت نوع الف



شکل ۱۳. وضعیت تماس بین اینزرت نوع ب و ماده پرکننده قبل از شکست نهایی اتصال



شکل ۱۵. کانتور پارامتر شروع تخریب در مود اول، طبق معیار هشین روی صفحه کامپوزیتی فوقانی از جنس کربن-اپوکسی در اتصال با اینزرت نوع ب

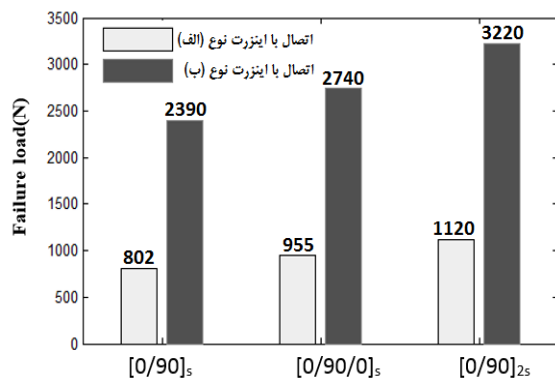
## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل اجزای محدود، برای اتصالات صفحات ساندویچی ارائه شد. در مدلسازی اجزای محدود سعی شد تا یک مدل دقیق، به طوری که تمامی اجزای اتصال را دربر بگیرد، ارائه گردد. نتایج تحلیل نشان داد که تخریب از ناحیه اتصال چسبی بین سطح پایینی اینزرت و صفحه کامپوزیتی شروع می شود. همچنین نتایج تجربی موجود نیز مؤید این مسئله است. بنابراین در مونتاژ سازه لانه زنبوری یک ماهواره، یکی از مسائل بسیار مهم در نظر گرفتن این ناحیه بحرانی و بررسی امکان تخریب اتصال در اثر بارهای وارده هنگام پرتاب است. دقت مونتاژ بالاتر و تقویت

بدیهی است که با افزایش ضخامت هسته، اینترفیس<sup>۲۸</sup> (سطح مشترک) بین هسته و مواد پرکننده افزایش و بار شکست نیز افزایش خواهد یافت. همان طور که در شکل ۱۹ ملاحظه می شود، با افزایش ضخامت هسته از ۱۵ به ۲۵ میلی متر (که به دلیل چگالی پایین هسته جرم بسیار کمی به مجموعه اضافه خواهد شد)، بار شکست در حالت استفاده از اینزرت نوع ب به میزان ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت. مطابق شکل ۲۰ با افزایش چگالی هسته، استحکام در هر دو نوع اتصال بزرگتر می شود. در اتصال با اینزرت نوع ب، به دلیل وجود ماده پرکننده میزان افزایش بار شکست نسبت به نوع الف بسیار بالاتر است (بیش از دو برابر).

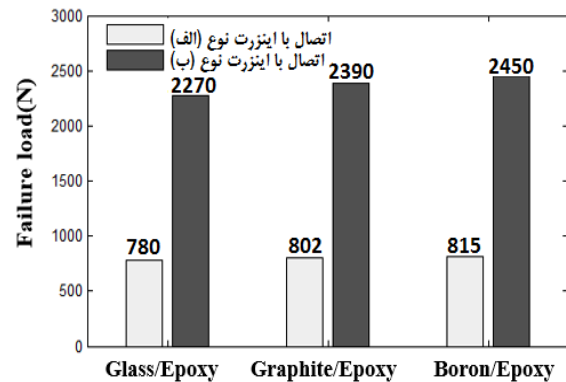
ضعامت پوسته کامپوزیتی دو برابر می‌شود، بار شکست در اتصال با اینزرت نوع الف و ب به ترتیب حدود ۴۰ و ۳۵ درصد افزایش می‌یابد. طبق نتایج حاصل، لایه‌چینی پوسته کامپوزیتی و چگالی هسته، به ترتیب کمترین و بیشترین تأثیر را بر بار شکست دارند. با توجه به تأثیر پارامترهای مختلف بر بار شکست، برای دستیابی به استحکام بالاتر پیشنهاد می‌شود از اینزرت نوع ب با صفحات کامپوزیتی بوران - اپوکسی هشت‌لایه و هسته با ضخامت ۲۵ میلی‌متر و چگالی ۱۲۸ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شود.

ناحیه بحرانی فوق، تأثیر بسزایی در سلامت سازه ماهواره در زمان پرتاب دارد. در اتصال با اینزرت الف، پارامترهای تخریب برای صفحه کامپوزیتی فوقانی به صورت موضعی در همسایگی اینزرت افزایش یافته‌اند. اما در اتصال با اینزرت ب به دلیل وجود ماده پرکننده، پارامترهای تخریب برای قطعه مذکور، تنها در مجاورت اینزرت متمرکز نیستند؛ بلکه در سطح قابل توجهی توزیع شده‌اند که این تفاوت می‌تواند از دلایل بالاتر بودن استحکام اتصال با اینزرت نوع ب، نسبت به اتصال با اینزرت نوع الف باشد. وقتی



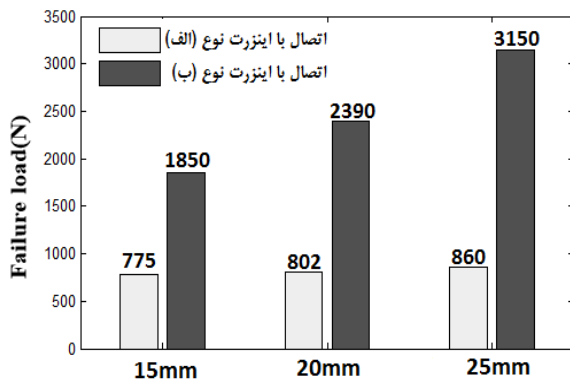
شکل ۱۷. تأثیر ضخامت پوسته کامپوزیتی از جنس کربن-اپوکسی

بر بار شکست PULL-OUT



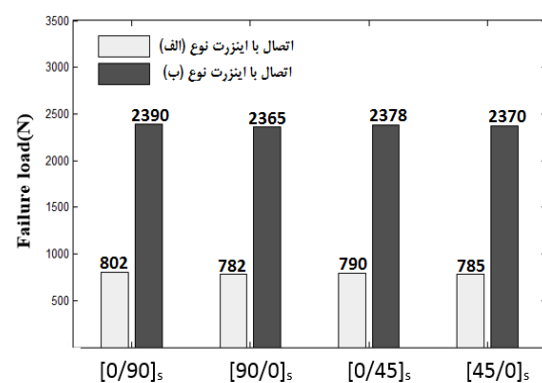
شکل ۱۶. تأثیر جنس پوسته کامپوزیتی

بر بار شکست PULL-OUT



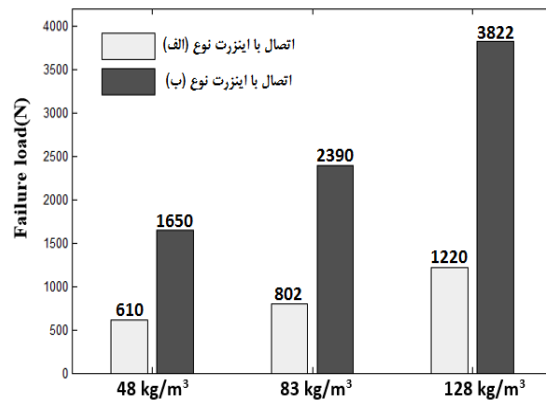
شکل ۱۹. تأثیر ضخامت هسته

بر بار شکست PULL-OUT



شکل ۱۸. تأثیر لایه‌چینی پوسته کامپوزیتی از جنس کربن-اپوکسی

بر بار شکست PULL-OUT



شکل ۲۰. تأثیر چگالی هسته بر بار شکست PULL-OUT

## ۷. مأخذ

- [1] J. K. Byoung, D. G. Lee, Development of satellite structure with the sandwich T-joint, *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 460-468, 2010.
- [2] J. W. Lim, J. Woo, Development of the hybrid insert for composite sandwich satellite structures, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 8, pp. 1040-1048, 2011.
- [3] B. Smith, B. Banerjee, Reliability of inserts in sandwich composite panels, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 3, pp. 820-829, 2012.
- [4] K. Song, J. Y. Choi, J. H. Kweon, K. S. Kim, An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures, *Composite Structures*, Vol. 86, pp.107-113, 2008.
- [5] P. Bunyawanichakul, B. Castanié, J. J. Barrau, Non-linear finite element analysis of inserts in composite sandwich structures, *Composites: Part B*, Vol. 39, pp. 1077-1092, 2008.
- [6] S. Heimbs, M. Pein, Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts, *Composite Structures*, Vol. 89, No. 47, pp. 575-88, 2009.
- [7] G. Bianchi, G. S. Aglietti, G. Richardson, Optimization of bolted joints connecting honeycomb panels, *First CEAS European air and space conference*, Berlin, pp. 2179-86, 10-13 September 2007.
- [8] O. T. Thomsen, Sandwich plates with through the-thickness and fully potted inserts: evaluation of differences in structural performance, *Compos Struct*, Vol. 40, No. 2, pp. 159-74, 1998.
- [9] B. Elena, L. Anders, O. T. Thomsen, S. Vitaly, Local effects in the vicinity of inserts in sandwich panels, *Composites Part B*, Vol. 35, pp. 619-27, 2004.
- [10] S. Guo, R. Morishima, Numerical analysis and experiment of composite sandwich T-joints subjected to pulling load, *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 229-238, 2011.
- [11] Mohammad Reza Khalili, Aidin Ghaznavi Osghoei, Finite element modeling of T-shaped connector panel - sandwich subjected to tensile loading, *Amirkabir International Journal of Mechanical Engineering*, 1391 (in persian).
- [12] Mohammad Reza Khalili, Aidin Ghaznavi Osghoei. Amin Ghaznavi Osghoei , The influence of geometry on the behavior and failure mode in sandwich panel T-shaped joints under lateral loading, *Journal Of Modeling in Engineering*, JR\_JME-12-36\_007, 1393 (in persian).
- [13] Abaqus documentation/analysis user's guide, edition 2013.
- [14] P. P. Camanho, C. G. Dávila, Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials, *NASA-Technical paper*, Vol. 211737, p. 33, 2002.
- [15] R. Campilho, M. D. Banea, J. Neto, L. F. da Silva, Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 44, pp. 48-56, 2013.
- [16] K. N. Anyfantis, N. G. Tsouvalis, A novel traction-separation law for the prediction of the mixed mode response of ductile adhesive joints, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, pp. 213-226, 2012.
- [17] K. Song, C. G. Dávila, C. A. Rose, Guidelines and Parameter Selection for the Simulation of Progressive Delamination, *Abaqus Users' Conference*, 2008.
- [18] C. Fan, P. Y. B. Jar, J. R. Cheng, Cohesive zone with continuum damage properties for simulation of delamination development in fiber composites and failure of adhesive joints, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 13, pp. 3866-3880, 2008.
- [19] R.Campilho, M. De Moura, J. Domingues, Using a cohesive damage model to predict the tensile behavior of CFRP single-strap repairs, *International Journal of Solids and Structures*: Vol. 45, No. 5, pp. 1497-1512, 2008.
- [20] R. Roy, K. H. Nguyen, Y. B. Park, J. H. Kweon, J. H. Choi, Testing and modeling of Nomex™ honeycomb sandwich Panels with bolt insert, *Composites: Part B*, Vol. 56, pp. 762-769, 2014.

- 
1. specific strength
  2. specific stiffness
  3. insert
  4. honeycomb
  5. high-order
  6. Hashin (1980)
  7. damage evolution model
  8. orthotropic
  9. Macaulay bracket operator
  10. Cohesive Zone Model (CZM)
  11. delamination
  12. subroutine
  13. cohesive elements
  14. Traction-Separation Law (TSL)
  15. damage parameter
  16. interaction
  17. equivalent solid elements
  18. shell elements
  19. partial inserts
  20. potting material
  21. reference point
  25. tie
  22. an 8-node three-dimensional cohesive element
  23. an 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control
  24. an 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains
  26. interfacial delamination
  27. contact status
  28. interface