



## تحلیل اجزاء محدود رفتار جدایش اتصال چسبی بین پانل ساندویچی و پروفیل کامپوزیتی تقویت کننده در بارگذاری خمشی

آیدین غزنوی اسگوئی<sup>۱\*</sup>، مسعود عسگری<sup>۲</sup>، علی سعیدی<sup>۳</sup>، محمود رامیار<sup>۴</sup>، عباس بحری<sup>۵</sup>، حمیدرضا لاری<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>۳،۴،۵</sup> پژوهشگاه نیرو، مرکز توسعه فناوری های توربین باد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۹/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۴

### چکیده

استحکام اتصال چسبی بین اجزاء در سازه‌های کامپوزیتی، نقش بسیار مهمی در عملکرد این سازه‌ها تحت اثر بارگذاری‌های اعمالی ایفا می‌کند. در این مقاله، رفتار جدایش در اتصال چسبی بین پانل ساندویچی و پروفیل تقویت کننده به روش اجزاء محدود، مورد بررسی قرار گرفته است. مدلسازی اتصال چسبی با استفاده از حالت مود ترکیبی مدل ناحیه چسبنده و المان‌های تماسی صورت گرفت؛ همچنین یک لایه ماده چسب بین پروفیل و پانل ساندویچی برای اتصال اجزاء مدلسازی شد. تاثیر پارامترهای هندسی شامل، ضخامت لایه چسب و ضخامت پروفیل تقویت کننده بر رفتار جدایش در اتصال بررسی شد. اثر وجود عیب اولیه در اتصال نیز روی نتایج، مورد توجه قرار گرفت. مشخص شد که در نمونه‌های بدون عیب، افزایش ضخامت پروفیل و چسب، خواص اتصال را بهبود می‌بخشند؛ در حالی که در اتصال دارای عیب اولیه، افزایش ضخامت پروفیل شروع جدایش را پیش می‌اندازد. نتایج نشان داد، وجود عیب اولیه، نیروی شروع جدایش را تا ۵۱٪ کاهش می‌دهد. همچنین مشخص شد، وجود لایه چسب در رفتار جدایش اثر مثبت دارد؛ بطوری که تنش آغاز جدایش در مدل بدون لایه چسب بیش از ۴۰٪ نسبت به مدل دارای لایه چسب با ضخامت ۱۰ میلیمتر کمتر بوده، جدایش در آن زودتر اتفاق می‌افتد.

**کلمات کلیدی:** اتصال چسبی؛ جدایش؛ عیب اولیه؛ پروفیل تقویت کننده؛ پانل ساندویچی؛ بارگذاری خمشی.

## Finite Element Modeling of Debonding Behavior of Adhesively-Bonded Joints between Sandwich Panel and Pultruded Profile in Flexural Loading

A. Ghaznavi<sup>1,\*</sup>, M. Asgari<sup>2</sup>, A. Saeidi<sup>3</sup>, M. Ramyar<sup>4</sup>, A. Bahri<sup>5</sup>, and H. R. Lari<sup>6</sup>

<sup>1,3</sup> PhD Student, Mech. Eng., K.N. Toosi Univ., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., K.N. Toosi Univ., Tehran, Iran.

<sup>1,4,5,6</sup> Wind Turbine Technology Development Center, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

### Abstract

The strength of adhesively-bonded joints plays a very important role in the behavior of loaded composite structures. In this work, the debonding behavior of the adhesive joint between the sandwich panel and the pultruded profile is investigated by the finite element method. The cohesive zone model and the contact elements are used to simulate the adhesive joint between the stiffener and the panel. Representing the adhesive material, an embedded layer is modeled between the sandwich panel and the profile. The effects of the geometrical parameters including the thickness of the adhesive layer and profile on the behavior of the joint are investigated. Moreover, the effect of the initial defect in the adhesive joint on the debonding results is studied. The results obtained show that in a perfect bonding, increasing the thicknesses of the profile and adhesive layer improves the joint behavior against debonding. However, in a defected joint, increasing the profile thickness decreases the debonding load, and presence of the initial defect decreases the debonding load by 51%. The results obtained also show that the presence of an embedded adhesive layer has a positive effect on the debonding behavior of the joint. An initial debonding load without adhesive layer is decreased by 40% in comparison with the joint containing a 10-mm adhesive layer.

**Keywords:** Adhesive Joint; Debonding; Initial Defect; Pultruded Profile; Sandwich Panel.

## ۱- مقدمه

ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مناسب پروفیل‌های پالترود شده کامپوزیتی نظیر، نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت چسبندگی مناسب و مقاومت در برابر عوامل محیطی، باعث استفاده از آن‌ها برای تقویت بسیاری از سازه‌های کامپوزیتی و ساندویچی شده است. یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر کارآمدی این تقویت‌کننده‌ها، اتصال چسبی بین سطح پروفیل و سازه تقویت شده است. جدایش بین سطوح پروفیل تقویت کننده و سازه ساندویچی، یکی از عوامل مهم واماندگی سازه است [۱-۳]. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای روی جدایش بین پروفیل استحکام دهنده و صفحات کامپوزیتی صورت گرفته است. یاپ و همکاران [۴]، با استفاده از آزمایش‌های تجربی و روش اجزاء محدود، رفتار جدایش بین تقویت کننده و پوسته را در کامپوزیت‌های مورد استفاده در سازه‌های هوایی و با در نظر گرفتن عیب اولیه در ناحیه فصل مشترک بررسی کردند. میکولیک و همکاران [۵]، با استفاده از روش تحلیلی المان نوک ترک، به پیشبینی رفتار جدایش بین فلنج تقویت کننده و پوسته کامپوزیتی پرداختند. کامانو و همکاران [۶]، با استفاده از قانون تخریب دو خطی و استفاده از مدل ناحیه چسبان (CZM)، به بررسی جدایش بین پوسته و تقویت کننده پرداختند. ایشان جهت صحت-گذاری مدل از آزمایش‌های تجربی روی نمونه‌های ساده‌تر در حالت‌های بارگذاری مختلف استفاده کردند. آزمایش‌های مشابه پیشتر توسط مینگت و همکارانش [۷] روی نمونه‌های تقویت شده صورت گرفته بود؛ همچنین قانون توانی ناحیه چسبندگی نیز توسط وانگر و همکارانش [۸]، جهت مدل‌سازی جدایش بین پوسته و تقویت کننده انجام پذیرفت. برتولینی و همکاران [۹ و ۱۰]، به بررسی جدایش پوسته و تقویت کننده در بدنه هواپیما و هنگام پس‌کمانش پرداختند. ایشان برای مدل‌سازی از روش مکانیک شکست و نیز روش ناحیه چسبان استفاده کردند. خلیلی و غزنوی [۱۱ و ۱۲]، به روش اجزاء محدود و با استفاده از مدل ناحیه چسبان، به بررسی جدایش و تخریب در اتصال کامپوزیتی T شکل پرداختند. ایشان بارگذاری‌های مختلف استاتیکی و دینامیکی را روی سازه اعمال و نیروهای تخریب را محاسبه کردند. گلاسیک و همکاران نیز [۱۳]، جدایش بین پوسته و تقویت کننده در

اتصال T شکل کامپوزیتی به کار رفته در پره توربین بادی را مورد بررسی قرار دادند.

در گزارش پیش‌رو، جدایش بین سطوح پروفیل کامپوزیتی و پانل ساندویچی مسطح به روش اجزاء محدود، مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی اتصال چسبی از المان‌های تماسی و مدل ماده ناحیه چسبندگی به صورت دوخطی و با مود ترکیبی استفاده شده است. به منظور نزدیکی بیشتر به حالت واقعی، یک لایه چسب (پرکننده) با ضخامت مشخص بین پروفیل و پانل ساندویچی مدل شده است. برای بررسی نقش عیب اولیه موجود در اتصال چسبی روی خواص مکانیکی اتصال، تحلیل اجزاء محدود اتصال دارای عیب نیز مورد توجه قرار گرفته است؛ همچنین اثر پارامترهای هندسی مانند، ضخامت پروفیل و ضخامت لایه چسب (پرکننده) و همچنین وجود یا عدم وجود لایه چسب (پرکننده) در حالات مختلف روی نتایج، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۲- مدل‌سازی اجزاء محدود

برای انجام تحلیل اجزاء محدود سازه ساندویچی تقویت شده با پروفیل کامپوزیتی، کد نویسی (APDL) در نرم افزار ANSYS 15 انجام گرفته است.

پانل ساندویچی دارای هسته از جنس فوم PVC و رویه‌های کامپوزیتی ساخته شده از رزین پلی‌استر و الیاف شیشه خرد شده (MAT) و شیشه بافته شده (Woven) است. لایه‌چینی پانل ساندویچی به صورت [Mat/Woven3/PVC/Woven3/Mat] در نظر گرفته می‌شود. خواص مکانیکی الاستیک مواد به کار رفته در سازه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- خواص الاستیک لایه‌های مورد استفاده در سازه

خواص مکانیکی	جنس لایه
$E=10\text{GPa}$ , Poisson's ratio = 0.3	الیاف خرد شده شیشه / پلی‌استر
$E1=80\text{GPa}$ , $E2=80\text{GPa}$ , $E3=40\text{GPa}$ , $G12=40\text{GPa}$ , $G13=10\text{GPa}$ , $G23=10\text{GPa}$	الیاف بافته شده شیشه / پلی‌استر
$E=100\text{MPa}$ , density= 100 kg/m <sup>3</sup>	هسته PVC

CONTA173 و TARGE170 برای تعریف تماس بین سطوح انتخاب می‌شوند.

### جدول ۳- ابعاد هندسی اجزاء سازه کامپوزیتی

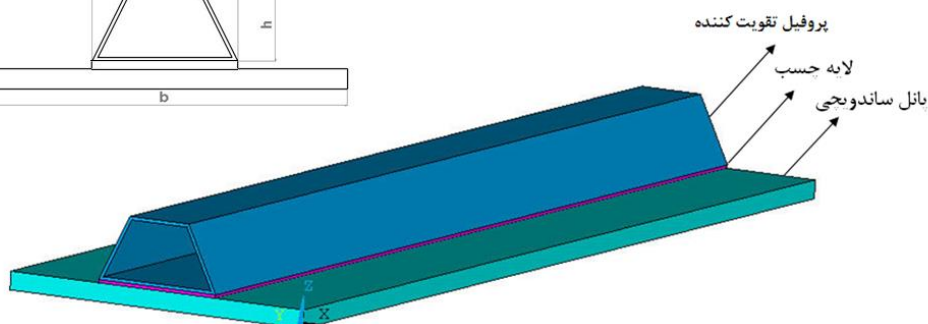
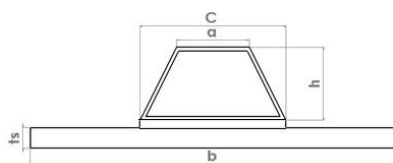
مقدار (میلیمتر)	مولفه هندسی
۱۵۰۰	طول پانل ساندویچی (L)
۵۰۰	عرض پانل ساندویچی (b)
۲۸	ضخامت پانل ساندویچی (ts)
۲۰۰	قاعده بزرگ دوزنقه سطح مقطع پروفیل (c)
۱۰۰	قاعده کوچک دوزنقه سطح مقطع پروفیل (a)
۱۰۰	ارتفاع دوزنقه سطح مقطع پروفیل (h)

### ۲-۱- مدل ناحیه چسبنده

برای تعریف قابلیت جدایش بین سطوح وجود، از روش Cohesive Zone Model (CZM) استفاده شد. تعریف خواص مواد در مدل CZM، به دو صورت نمایی و دو خطی صورت می‌پذیرد که هر کدام دارای توابع پتانسیل مربوط به خود می‌باشند.

در این مقاله، جهت استفاده در المان‌های تماسی از مدل دو خطی برای تعریف CZM استفاده می‌شود؛ همچنین به منظور در نظر گرفتن مودهای عمودی و لغزشی جدایش، از مدل ترکیبی Mixed mode استفاده می‌شود. در این حالت، تنش‌های عمودی و مماسی تماس به صورت رابطه (۱) هستند.

$$\begin{aligned} \sigma &= K_n u_n (1 - d_m) \\ \tau_t &= K_t u_t (1 - d_m) \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۱- مدل هندسی پانل ساندویچی تقویت شده با پروفیل کامپوزیتی

### جدول ۲- خواص ناحیه چسبنده المان‌های تماسی [۱۴]

مقدار	خاصیت مکانیکی
۹ مگاپاسکال	بیشینه تنش عمودی تماس
۰/۰۷۵	چگالی انرژی بحرانی شکست برای جدایش عمودی
۳۱ مگاپاسکال	بیشینه تنش مماسی تماس
۰/۶	چگالی انرژی بحرانی شکست برای لغزش مماسی

برای اتصال پروفیل تقویت کننده به پانل ساندویچی، یک لایه چسب (پرکننده) با مدول الاستیسیته ۱۰ گیگاپاسکال مدلسازی شده است؛ همچنین خواص بین لایه‌ای چسبنده در اتصال در جدول ۲ آمده است. شکل ۱، مدل هندسی سازه را نمایش می‌دهد. ابعاد و اندازه‌های سازه در جدول ۳ ارائه شده است. برای مش‌بندی پانل ساندویچی، از المان SOLSH190 استفاده شد. این المان برای مدلسازی سازه‌های پوسته‌ای با ضخامت‌های مختلف مناسب است. مزیت این نوع المان در قابلیت مدلسازی سازه‌ها در محدوده وسیعی از ضخامت‌ها است، به گونه‌ای که هم برای پوسته‌های نازک و هم برای پوسته‌های ضخیم مناسب است. همانگونه که از شکل ۲ مشخص است، المان دارای ۸ گره است که هر گره دارای ۳ درجه آزادی است.

المان SOLSH190 قابلیت مدلسازی لایه‌چینی را نیز داراست. مهمترین ویژگی این المان که از المان‌های جدید نرم افزار ANSYS است، در این است که اتصال به المان‌های حجمی دیگر به سادگی انجام می‌پذیرد. المان‌های دیگر که باید برای انجام تحلیل تعریف شوند، المان‌های تماسی بین سطوح پانل ساندویچی و پروفیل می‌باشند. المان‌های

$$\Delta_t = \frac{u_t}{\bar{u}_t} \quad (5)$$

$$\chi = \left( \frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n} \right) = \left( \frac{u_t^c}{u_t^c - \bar{u}_t} \right) \quad (6)$$

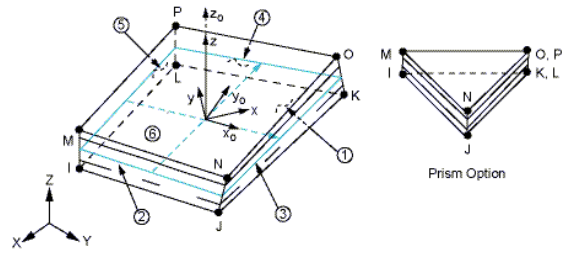
$u_t^c$  و  $u_n^c$  مقادیر  $u_t$  و  $u_n$  هنگام جدایش کامل می‌باشند  $\bar{u}_n$  و  $\bar{u}_t$  نیز، فاصله عمودی و لغزش مماسی به ترتیب در تنش عمودی ماکزیمم و تنش مماسی ماکزیمم می‌باشند. در حالت مود ترکیبی، هر دو مولفه تنش‌های مماسی و عمودی تماس، در انرژی شکست مشارکت دارند و رابطه توانی انرژی شکست به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود.

$$\left( \frac{G_n}{G_{cn}} \right)^2 + \left( \frac{G_t}{G_{ct}} \right)^2 = 1 \quad (7)$$

که در آن  $G_t$  و  $G_n$  به ترتیب، انرژی‌های شکست عمودی و مماسی می‌باشند و به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شوند.

$$G_n = \int P du_n \quad (8)$$

$$G_t = \int \tau_t du_t$$



شکل ۲- شکل هندسی المان لایه‌ای SOLSH190

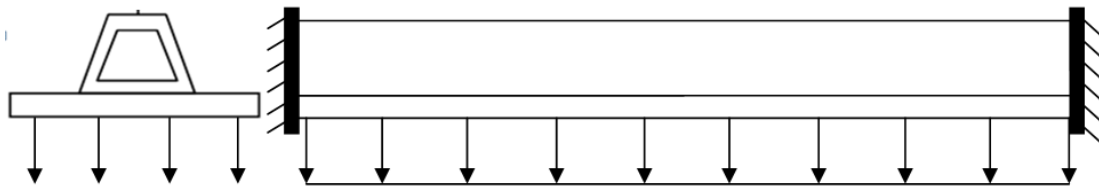
$K_t$  و  $K_n$  به ترتیب، سفتی تماس عمودی و مماسی هستند.  $u_t$  و  $u_n$  نیز به ترتیب، فاصله عمودی و میزان لغزش مماسی ناحیه تماس می‌باشند.  $d_m$  پارامتر جدایش بوده، به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$d_m = \left( \frac{\Delta_m - 1}{\Delta_m} \right) \chi \quad (2)$$

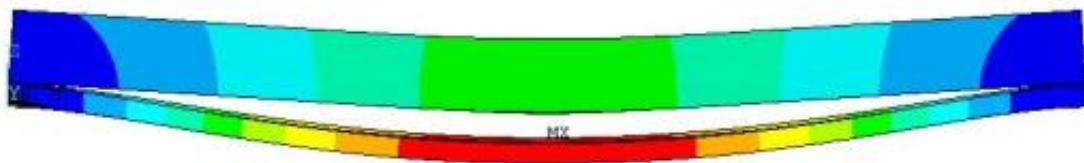
که در آن

$$\Delta_m = \sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_t^2} \quad (3)$$

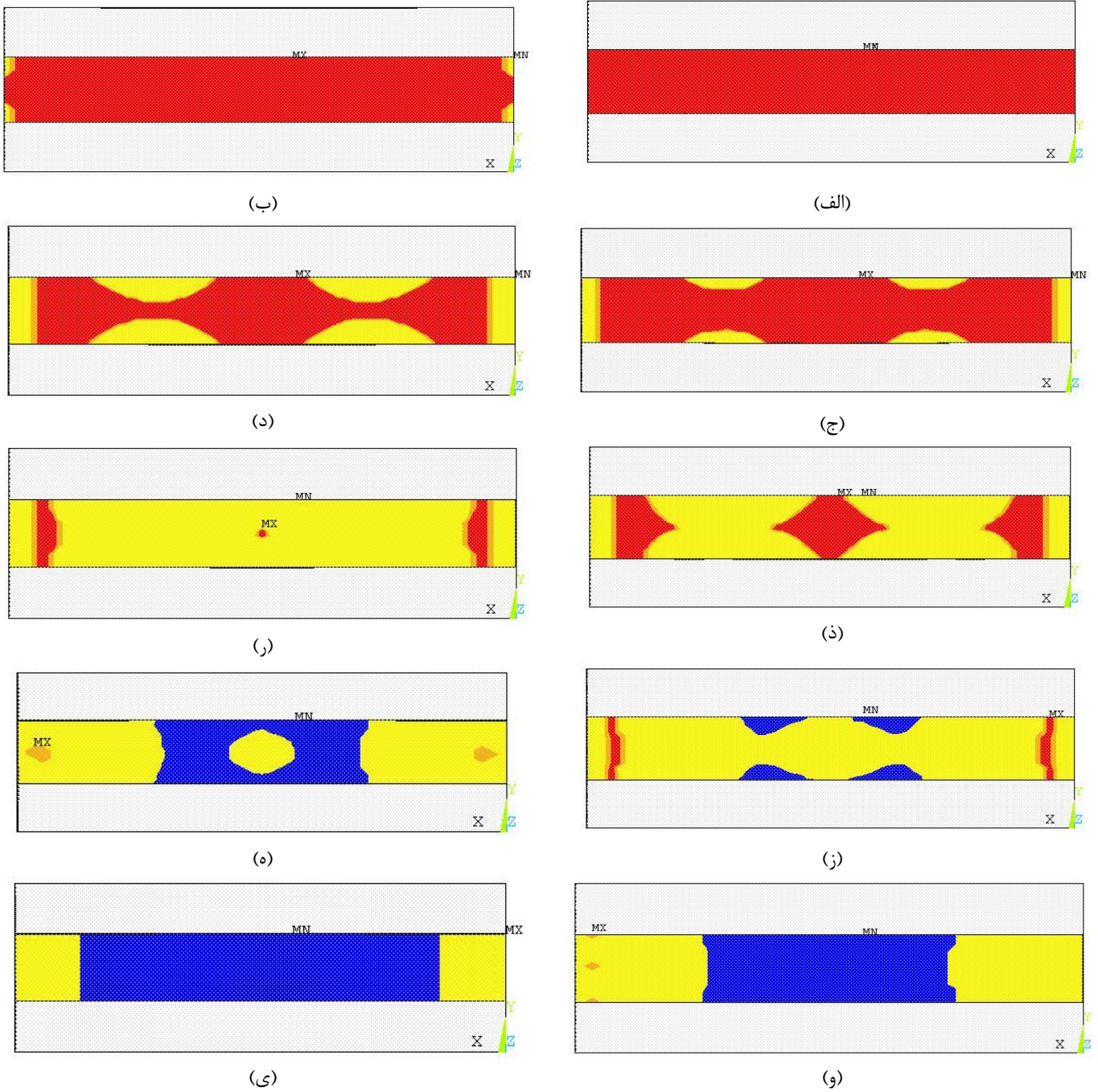
$$\Delta_n = \frac{u_n}{\bar{u}_n} \quad (4)$$



شکل ۳- شرایط مرزی و بارگذاری سازه پانل ساندویچی تقویت شده با پروفیل تقویت کننده



شکل ۴- تغییر شکل سازه پانل ساندویچی تقویت شده با پروفیل تقویت کننده در پایان بارگذاری و بعد از جدایش کامل



شکل ۵- وضعیت اتصال سطح تماس بین پروفیل و پانل ساندویچی در طول بارگذاری

مشاهده می‌شود. در نهایت همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود، بازشدگی کامل در قسمت‌های میانی اتفاق افتاده است. در ادامه، اثر پارامترهای هندسی بر رفتار جدایش اتصال بررسی می‌شود.

### ۳-۱- اثر ضخامت پروفیل و چسب

به منظور تعیین تاثیر ضخامت پروفیل و همچنین ضخامت لایه چسب بر رفتار جدایش بین پروفیل و پانل ساندویچی، تغییرات بار شروع جدایش با تغییر ضخامت‌های پروفیل و چسب مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ تغییرات میزان بار شروع جدایش را برای ضخامت‌های مختلف چسب و پروفیل نمایش می‌دهد.  $T_a$ ، بیانگر ضخامت لایه چسب است. مشخص است که هم افزایش ضخامت پروفیل و هم افزایش ضخامت چسب، جدایش را به تاخیر می‌اندازند و باعث بروز جدایش در بارهای بالاتر می‌گردند. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که تاثیر ضخامت پروفیل در تقویت اتصال، بیشتر از تاثیر ضخامت لایه چسب است. در ضخامت ثابت چسب، افزایش ضخامت پروفیل از ۵ میلیمتر به ۱۰ میلیمتر، سبب ۴۶٪ افزایش در بار جدایش می‌شود، در حالی که در ضخامت ثابت پروفیل، افزایش ضخامت لایه چسب از ۵ به ۱۰ میلی‌متر، ۱۸٪ افزایش در بار جدایش را در پی دارد.

### ۲-۲- شرایط مرزی و بارگذاری

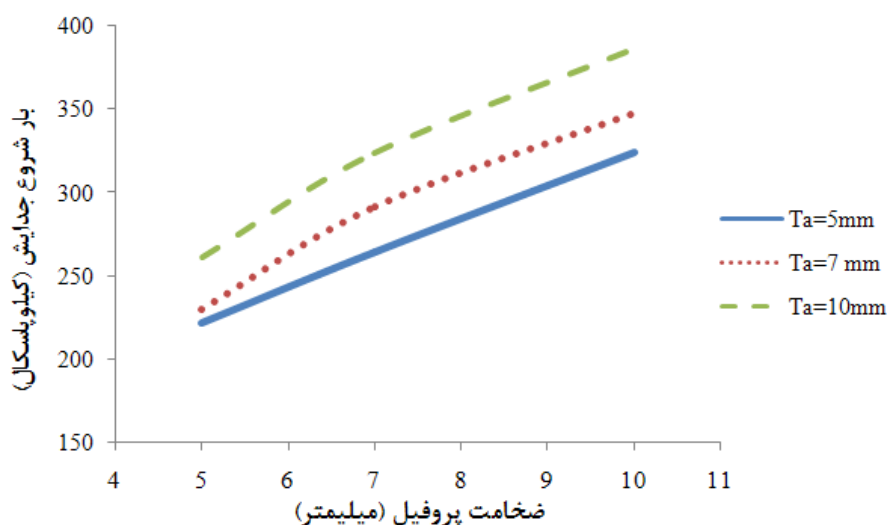
سازه‌های ساندویچی با هسته فوم به طور گسترده جهت تحمل بارهای خمشی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از پروفیل تقویت‌کننده جهت افزایش مقاومت خمشی این سازه‌ها در برابر نیروهای وارده انجام می‌پذیرد. بارگذاری به صورت اعمال بار کششی با توزیع گسترده بر پانل ساندویچی فرض می‌شود.

به عنوان شرایط مرزی نیز، دو انتهای پانل ساندویچی و پروفیل به صورت کامل مقید شده‌اند. در این حالت، سازه تحت خمش قرار می‌گیرد. شرایط مرزی و بارگذاری در شکل ۳، به صورت شماتیک نشان داده شده است.

### ۳- نتایج

پس از انجام مراحل مدلسازی، حل اجزاء محدود مدل در نرم افزار ANSYS 15 انجام گرفت. در اتمام بارگذاری و پس از جدایش کامل، نمودار تغییر شکل سازه در شکل ۴ نمایش داده شده است؛ همچنین رفتار سطح تماس بین چسب و پروفیل در طول زمان بارگذاری، مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵، نحوه جدایش پروفیل از پوسته را برحسب نیروهای وارده نمایش می‌دهد.

با توجه به شکل ۵ مشخص است که تحت اثر بارگذاری خمشی، جدایش ابتدا از گوشه‌های اتصال آغاز شده است و در ادامه در قسمت‌های میانی اتصال نیز رشد جدایش



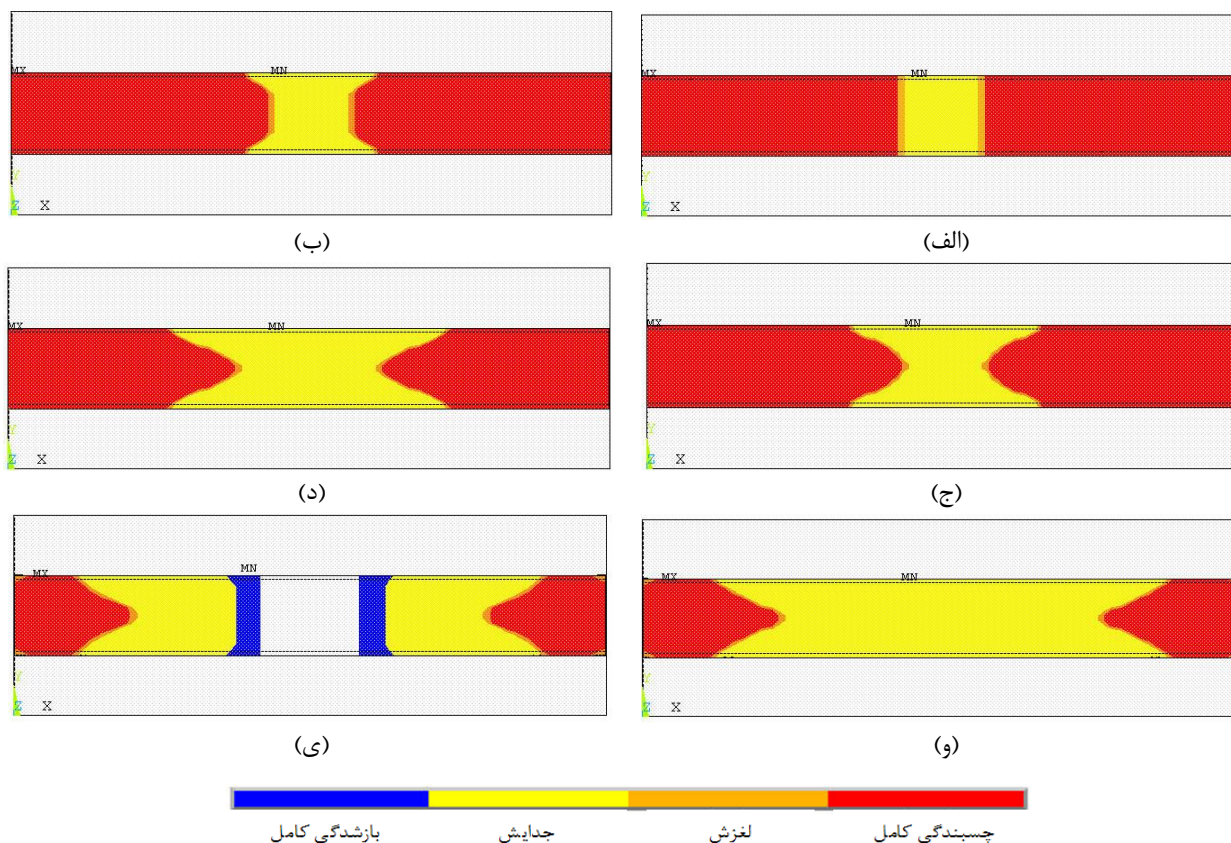
شکل ۶- تغییرات بار شروع جدایش بر حسب ضخامت پروفیل و لایه چسب

## ۳-۲- تاثیر عیب اولیه در اتصال

در بخش ۳-۱، نتایج برای حالتی بررسی گردید که اتصال پروفیل به پوسته کاملاً بدون عیب و نقص باشد. هنگامی که ناحیه اتصال دارای یک عیب اولیه باشد، رفتار جدایش متفاوت است. این عیب ممکن است، در مراحل ساخت در اثر وجود حفره، حباب و یا ناخالصی به وجود آمده و یا در طول مدت زمان استفاده در اثر عوامل محیطی یا مکانیکی ایجاد شده باشد. شکل نحوه جدایش پروفیل از پوسته با وجود عیب اولیه را نمایش می‌دهد. وجود عیب در قسمت میانی اتصال باعث شده است که در این حالت برخلاف حالت بدون عیب که جدایش از گوشه‌ها شروع شده بود، رشد ناحیه جدایش از قسمت میانی آغاز شود. همانطور که در این شکل مشاهده

می‌شود، این عیب دقیقاً در وسط سازه و به شکل مستطیلی در نظر گرفته شده است.

تاثیر ضخامت پروفیل و همچنین ضخامت لایه چسب روی تنش آغاز جدایش اتصال معیوب در شکل ۸ بررسی شده است. همانند نمونه‌های بدون عیب، در نمونه‌های دارای عیب اولیه نیز با افزایش ضخامت لایه چسب جدایش به تاخیر می‌افتد؛ اما رفتار اتصال معیوب با زیاد شدن ضخامت پروفیل با حالت اتصال بدون عیب کاملاً متفاوت است. در ضخامت‌های کم پروفیل (ضخامت ۵ میلیمتر)، آغاز جدایش از محل عیب اولیه نبوده، جدایش اتصال مانند اتصال بدون عیب از گوشه‌ها شروع می‌شود. دلیل این امر در این است که با کاهش ضخامت پروفیل، مقاومت خمشی آن نیز کاهش



شکل ۷- وضعیت اتصال سطح تماس بین پروفیل و پانل ساندویچی در طول زمان بارگذاری برای حالت دارای عیب اولیه در قسمت میانی اتصال

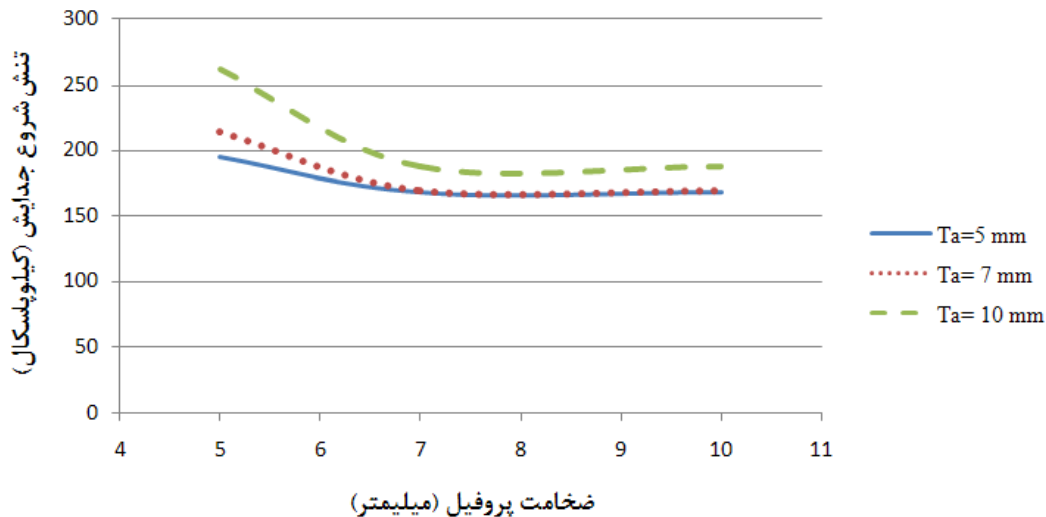
مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در همه حالات، تنش آغاز جدایش در حالت اتصال با عیب اولیه، از اتصال بدون عیب کمتر است. بیشترین میزان کاهش تنش جدایش مربوط به نمونه‌های دارای ضخامت پروفیل ۱۰ میلی‌متر است.

در این نمونه‌ها، بیش از ۵۱٪ کاهش در تنش آغاز جدایش به دست آمد. نتیجه مهم دیگری که از مقایسه حالت‌های اتصال معیوب و اتصال بدون عیب به دست می‌آید، تاثیر ضخامت لایه چسب در تنش آغاز جدایش است.

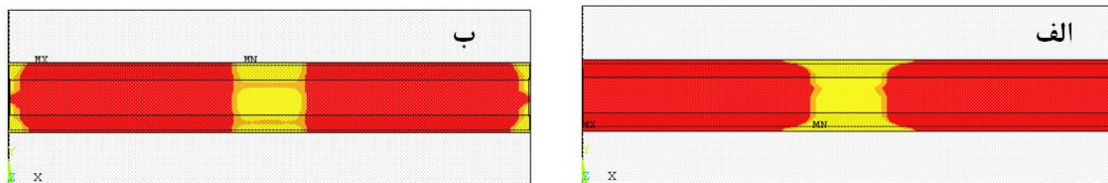
شکل ۱۰ درصد کاهش تنش آغاز جدایش را به ازای تغییرات ضخامت لایه چسب، برای ضخامت پروفیل ۵ میلی‌متر نمایش می‌دهد.

می‌یابد و در نتیجه، در محل عیب صلبیت کمتری از خود نشان داده، به همراه پانل ساندویچی تغییر شکل می‌یابد. به همین ترتیب، با افزایش صلبیت خمشی پروفیل در محل عیب در ضخامت‌های بالاتر، جدایش دقیقا از محل عیب اولیه آغاز می‌شود.

شکل ۹، تفاوت روند رشد جدایش را در نمونه‌های با ضخامت‌های مختلف نمایش می‌دهد. همانطور که اشاره گردید و در شکل ۹ نیز نشان داده شده است، در نمونه با ضخامت پروفیل ۵ میلی‌متر، جدایش از محل گوشه‌ها و در نمونه با ضخامت پروفیل ۱۰ میلی‌متر، جدایش از محل عیب صورت گرفته است.

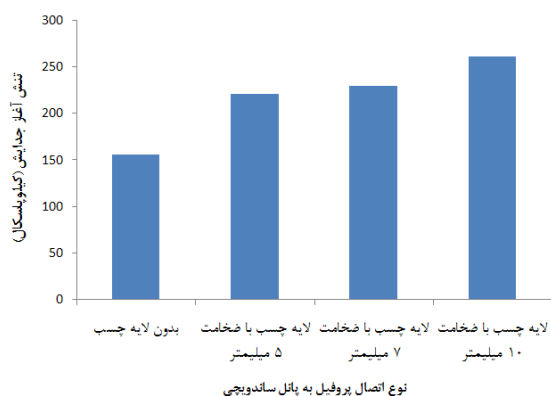


شکل ۸- تغییرات بار شروع جدایش بر حسب ضخامت پروفیل و لایه چسب در اتصال دارای عیب



شکل ۹- روند شروع جدایش در مدل دارای عیب اولیه با ضخامت پروفیل الف) ۱۰ میلی‌متر ب) ۵ میلی‌متر



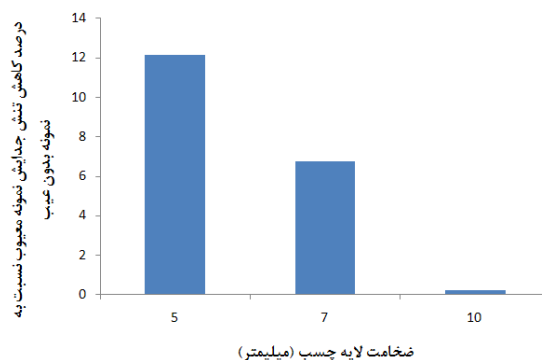


شکل ۱۱- تغییرات بار آغاز جدایش بر حسب عدم وجود و یا وجود لایه چسب با ضخامت‌های مختلف

نمونه با ضخامت چسب ۱۰ میلی‌متر ۴۰٪ است. وجود لایه چسب با خواص الاستیک نرم‌تر از پروفیل و پانل ساندویچی، امکان جابجایی سطوح این اجزاء نسبت به یکدیگر را فراهم کرده، بنابراین سبب به تاخیر افتادن جدایش در اتصال می‌شود.

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، جدایش در اتصال بین پروفیل تقویت‌کننده و پانل ساندویچی به روش اجزاء محدود، مورد بررسی قرار گرفت. برای مدلسازی اتصال چسبی، از المان‌های تماسی و مدل ماده ناحیه چسبیده به صورت دوخطی و با مود ترکیبی استفاده شد. برای مدلسازی پانل ساندویچی، از المان SOLSH190 با قابلیت مدلسازی لایه‌چینی استفاده شد؛ همچنین المان‌های CONTA173 و TARGE170 برای تعریف تماس بین سطوح انتخاب شدند. بارگذاری از نوع بار گسترده کششی روی پانل ساندویچی اعمال شد. روند آغاز و رشد جدایش در طول زمان در مدل المان محدود، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در دو حالت اتصال کامل بدون عیب و اتصال، دارای عیب اولیه مورد توجه قرار گرفتند و مشخص شد که وجود عیب اولیه در اتصال می‌تواند کاهش ۵۱٪ در تنش شروع اتصال را در پی داشته باشد؛ همچنین مشاهده شد، محل آغاز جدایش بسته به کامل یا معیوب بودن اتصال و همچنین ضخامت چسب و پروفیل می‌تواند متفاوت باشد. از این رو، جهت دستیابی به بیشترین حد مقاومت در برابر جدایش انتخاب مناسب پارمترهای تاثیرگذار از قبیل،



شکل ۱۰- نمودار درصد کاهش بار آغاز جدایش بر حسب ضخامت لایه چسب

با توجه به شکل ۱۰ مشخص است که افزایش ضخامت لایه چسب در ضخامت پروفیل برابر ۵ میلی‌متر، اختلاف بین نتایج حالت معیوب و بی‌عیب را کاهش می‌دهد. به طوری که در ضخامت ۱۰ میلی‌متری لایه چسب، رفتار جدایش نمونه‌های معیوب و بدون عیب، کاملاً مشابه یکدیگر است. دلیل این موضوع در این است که همانطور که در نتایج قبلی مشاهده گردید، افزایش ضخامت چسب، جدایش را به تاخیر می‌اندازد. در حالت پروفیل با ضخامت کم، در هر دو نمونه با عیب و بدون عیب، با افزایش ضخامت چسب جدایش از گوشه‌ها شروع می‌شود؛ بنابراین در ضخامت‌های بالاتر برای چسب، محل شروع جدایش یکسان بوده، تاثیرات ناحیه معیوب کاهش می‌یابد.

#### ۳-۳- اثر وجود لایه چسب

برای بررسی اثر وجود یا عدم وجود لایه چسب روی رفتار جدایش اتصال پروفیل به پانل ساندویچی، تحلیل اجزای محدود روی نمونه بدون در نظر گرفتن لایه چسب انجام پذیرفت. در این حالت، اتصال مستقیم بین گره‌های سطوح پروفیل و پانل ساندویچی برقرار شد. شکل ۱۱ مقایسه نتایج تنش شروع جدایش در مدل بدون لایه چسب و مدل‌های دارای ضخامت‌های مختلف چسب را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که عدم وجود لایه چسب، به طور چشمگیری سبب کاهش تنش شروع جدایش اتصال می‌شود، به طوری که نمونه بدون وجود لایه چسب، نسبت به نمونه دارای لایه چسب به ضخامت ۵ میلی‌متر ۲۹٪ کاهش در تنش شروع جدایش پیدا کرده است. این کاهش نسبت به

- delamination in composite materials. *J Compos Mater* 37(16): 1415-1438.
- [7] Minguet PJ, O'Brien TK (1996) Analysis of test methods for characterizing skin/stringer debonding failures in reinforced composite panels. *ASTM STP* 1274: 105-124.
- [8] Wagner W, Balzani C (2008) Simulation of delamination in stringer stiffened fiber-reinforced composite shells. *Comput Struct* 86(9): 930-939.
- [9] Bertolini J, Castanié B, Barrau JJ, Navarro, JP (2009) Multi-level experimental and numerical analysis of composite stiffener debonding. Part 1: Non-specific specimen level. *Compos Struct* 90(4): 381-391.
- [10] Bertolini J, Castanié B, Barrau JJ, Navarro JP, Petiot C (2009) Multi-level experimental and numerical analysis of composite stiffener debonding. Part 2: Element and panel level. *Compos Struct* 90(4): 392-403.
- [11] Khalili SMR, Ghaznavi A, Ghaznavi A (2013) Effect of Joint Geometry on the Behavior and Failure Modes of Sandwich T-Joints Under Transverse Static and Dynamic Loads. *J Adhesion* (just-accepted).
- [۱۲] آیدین غزنوی اسگویی، محمد رضا خلیلی، امین غزنوی اسگویی (۲۰۱۴) تاثیر هندسه بر رفتار و مدهای شکست اتصال T شکل پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری عرضی. *مجله مدل سازی در مهندسی* ۱۲(۳۶): ۸۵-۱۰۱.
- [13] Gulasik H, Coker D (2014) Delamination-Debond Behaviour of Composite T-Joints in Wind Turbine Blades. In *Journal of Physics: Conference Series* 524(1): 012043. IOP Publishing.
- [14] Zhou DW, Louca LA, Saunders M, (2008). Numerical simulation of sandwich T-joints under dynamic loading. *Compos Part B-Eng* (39): 973-9
- ضخامت لایه چسب و همچنین ضخامت پروفیل ضروری است. در یک اتصال کامل بدون عیب، افزایش ضخامت لایه چسب و همچنین ضخامت پروفیل، باعث بهبود رفتار جدایش می‌شود. این در حالی است که در اتصال دارای عیب اولیه، افزایش ضخامت پروفیل، نقش کاهنده در تنش شروع جدایش ایفا می‌کند.
- ### مراجع
- [1] Davies GAO, Hitchings D, Ankersen J (2006) Predicting delamination and debonding in modern aerospace composite structures. *Compos Sci Technol* 66(6): 846-854.
- [۲] مرتضی باقری، علی اصغر جعفری، مرتضی صادقی فر (۱۳۹۳) تمهینه‌سازی وزنی و کمانشی پوسته‌های تقویت‌شده کامپوزیتی لایه‌ای. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*، دوره ۴، شماره ۱، بهار، صفحه ۳۷-۴۹.
- [۳] امین نارکی، پویان قابضی (۱۳۹۲) تحلیل مخازن جدار ضخیم کامپوزیتی تحت اثر فشار و دمای سیکلی داخلی. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*، دوره ۳، شماره ۱، صفحه ۱۵-۳۲.
- [4] Yap JW, Scott ML, Thomson RS, Hachenberg D (2002) The analysis of skin-to-stiffener debonding in composite aerospace structures. *Compos Struct* 57(1): 425-435.
- [5] Mikulik Z, Kelly DW, Prusty BG, Thomson RS (2008) Prediction of flange debonding in composite stiffened panels using an analytical crack tip element-based methodology. *Compos Struct* 85(3): 233-244.
- [6] Camanho PP, Davila CG, De Moura MF (2003) Numerical simulation of mixed-mode progressive