

# کمینه‌سازی تنش تورق در اتصال چسبی تک‌لبه با استفاده از الگوریتم زنبور عسل

کیامهر روزبخش‌زاده<sup>۲</sup>

گروه مهندسی مکانیک،  
دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

سعید یعقوبی<sup>\*۲</sup>

گروه مهندسی مکانیک، واحد شوشتر،  
دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۳۱)

محمد شیشه‌ساز<sup>۱</sup>

گروه مهندسی مکانیک،  
دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

## چکیده

در پژوهش حاضر، اتصالات چسبی تک‌لبه به‌منظور کاهش میزان تورق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. توزیع تنش‌های عمودی و برشی به‌وجود آمده در این اتصال، با استفاده از معادلات الاستیسیته دو بعدی، روابط تنش- کرنش و کرنش-جابه‌جایی به‌دست آمده است. کمینه‌سازی تنش تورق، با استفاده از الگوریتم زنبور عسل انجام شده و متغیرهای فرآیند شامل ضخامت لایه‌های چسب شونده و لایه چسب می‌باشند. اتصال کامپوزیتی تحت بار کششی بوده و لایه‌های چسب شونده و چسبی به‌صورت همسان‌گرد و در ناحیه الاستیک خطی در نظر گرفته شدند. نتایج تحقیق بیان‌کننده آن بود که با نسبت بهینه ضخامتی ۲/۵۴، می‌توان تنش تورق را تا حدود ۳۶٪ کاهش داد. با افزایش نسبت مدول یانگ و در نتیجه نامتقارن‌تر شدن اتصال چسبی، بیشینه مقدار تنش تورق کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش مدول یانگ چسب شونده زیرین، منجر به بر هم خوردن توزیع تنش در سطح تماس چسب‌شونده نرم‌تر (لایه بالایی) با چسب شده و این در حالی است که توزیع تنش در سطح دیگر چسب، تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند.

**واژه‌های کلیدی:** اتصال چسبی، تنش تورق، لایه چسب شونده، لایه چسبی، بهینه‌سازی

## Minimization of Peeling Stress in an Adhesively Single-lap Joint Using the Bees Algorithm

M. Shishesaz

Mechanical Engineering  
Department, Shahid Chamran  
University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

S. Yaghoubi

Mechanical Engineering Department,  
Shoushtar Branch, Islamic Azad  
University, Shoushtar, Iran

K. Roozbakhzadeh

Mechanical Engineering  
Department, Shahid Chamran  
University of Ahvaz, Ahvaz,  
Iran

(Received: 04/March/2020 ; Accepted: 20/May/2020)

### ABSTRACT

In the present research work, the reduction of peel stress in the adhesively bonded single-lap joints has been studied. The distributions of normal and shear stresses generated in the adhesive joint were obtained using the two-dimensional elasticity theory, as well as the stress-strain and strain-displacement relationships. Minimization of the peel stress was performed using the bees algorithm, during which the process variables included the adhesive and adherends thicknesses. The composite joint was loaded by a tensile force while the adherends and adhesive layers were considered to behave as isotropic materials with linear elastic properties. The results showed that based on an optimum thickness ratio of 2.54, the magnitude of the peel stress can be reduced by 36%. As Young's moduli ratio, and consequently, the asymmetric adhesion bonding increased, the maximum amount of peeling stress decreased. Also, the increase in Young's modulus of the bottom layer led to the disruption of stress distribution at the interface of the softer adherend (top layer) and the adhesive layer, while this effect was almost absent at the other interface.

**Keywords:** Adhesive joint, Peeling stress, Adherend layer, Adhesive layer, Optimization.

۱- استاد: Mshishesaz@scu.ac.ir

۲- مربی (نویسنده پاسخگو): S.yaghoubi@iau-shoushtar.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد: Kiamehr67@yahoo.com

## ۱- مقدمه

چسبها به شدت در برابر تنش‌های عمودی آسیب‌پذیر می‌باشند. تنش‌های عمودی میان لایه‌های<sup>۱</sup> در صورت بزرگ بودن، منجر به جدا شدن لایه چسب<sup>۲</sup> از چسب شونده‌ها<sup>۳</sup> (لایه‌های چسبیده شده) می‌شوند که به این پدیده تورق<sup>۴</sup> یا لایه لایه شدن می‌گویند. هیچ‌گاه نمی‌توان تمامی تنش‌های عمودی را که موجب پدید آمدن اثر تورق در سطح اتصال می‌شوند، حذف نمود. علت اصلی به وجود آمدن تنش تورق در سطح اتصال، وجود بار خارج از مرکز<sup>۵</sup> وارد شده به اتصال است که خود باعث به وجود آمدن گشتاور خمشی و در نتیجه تنش عمودی می‌شود. مقدار این تنش با اعمال تغییراتی در ابعاد و نسبت طول و ضخامت چسب قابل کنترل و بهینه‌سازی می‌باشد.

در زمینه اتصالات چسبی مواد مرکب پژوهش‌هایی در گذشته صورت گرفته است. گلند و ریزنر<sup>۶</sup> [۵]، اولین کسانی بودند که اثر خمشی در اجزای اتصال را که منجر به ایجاد تنش تورق در لایه چسب می‌شود، در تحلیل خود وارد کردند. نتیجه کار آن‌ها برای توزیع تنش برشی شبیه به پژوهش‌های قبلی، اما با این اختلاف که مقدار تنش برشی در دو انتها بیشتر بود، به دست آمد. دلیل این اختلاف احتساب تنش تورق در اتصال بود که موجب اضافه شدن مقدار تنش برشی شد. ژائو و لو<sup>۷</sup> [۶] بر اساس روابط الاستیسیته دو بعدی و معادلات تعادل، حل بسته‌ای برای تعیین تنش و کرنش در سطح میانی چسب و تنش بین لایه‌ای در سطح مشترک چسب و لایه‌های چسبیده شده به دست آوردند. باوی<sup>۸</sup> و همکاران [۷] به بهینه‌سازی هندسی اتصال تک‌لبه چسبی متشکل از چسب مخلوط<sup>۹</sup> با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و زنبور عسل پرداختند. پارامترهای هدف در این تحقیق، بیشینه کردن بار قابل اعمال و مقاومت مخصوص<sup>۱۰</sup> اتصال در نظر گرفته شد. شیشه‌ساز و همکاران [۸]، توزیع تنش گذرا در اتصالات چسبی تک‌لبه را مطالعه نمودند. در تحقیق ایشان، استخراج

مواد مرکب کاربرد گسترده در صنایعی همچون صنایع الکتریکی، خودروسازی و هوا فضا دارند. یکی از راه‌های دستیابی به خواص مکانیکی و فیزیکی مورد نظر، ترکیب مواد با خواص مختلف تحت عنوان مواد مرکب می‌باشد. هر لایه از مواد مرکب ممکن است خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مختلفی داشته باشد. بنابراین، خواصی مانند استحکام تسلیم بالا، مقاومت در برابر گسیختگی، هدایت الکتریکی و غیره که ممکن است در یک فلز وجود نداشته باشد، می‌تواند در اثر ترکیب مواد به دست آید [۱-۳].

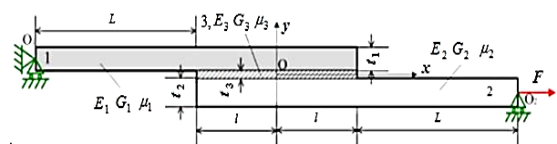
امروزه در بسیاری از سازه‌های عظیم (اعم از فلزی یا کامپوزیتی)، با توجه به وجود محدودیت‌هایی در طی فرآیندهای تولید، مونتاژ، بازرسی و غیره، ساخت یک‌پارچه آن‌ها مقرون به صرفه نبوده و این سازه‌ها را با اتصال قطعات کوچک‌تر به هم‌دیگر متصل می‌سازند. به این ترتیب اتصالات نقش بزرگی در شکل‌گیری سازه‌های بزرگ دارند. اتصالات تقریباً بیشترین عامل خرابی در قطعات سازه‌های هوایی هستند و بنابراین توجه به تمامی پارامترها، مطالعه آن‌ها در حین طراحی سازه بسیار حائز اهمیت است [۴]. اگرچه در ظاهر ساختار اکثر اتصالات ساده به نظر می‌رسند، اما به علت وجود چند لایه مختلف و امکان به کارگیری مواد متفاوت در لایه‌ها، رفتار مکانیکی و در نتیجه تحلیل و طراحی بهینه آن‌ها بسیار پیچیده است. از این رو این مقوله به علت در دست نبودن حل‌های تحلیلی جامع، کمتر مورد توجه قرار گرفته و اکثر کارهای پیشین در این زمینه با استفاده از روش‌های عددی و یا آزمایش‌های تجربی صورت گرفته است. اتصالات چسبی به صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع از اتصالات ممکن است در مواردی که قسمت باریکی از سازه باید اتصال یابد و تنش تکیه‌گاهی در اتصال مکانیکی زیاد باشد (و یا وزن اتصال مکانیکی بیش از حد مجاز باشد)، ترجیح داده شوند. توزیع یکنواخت تنش در طول ناحیه چسبی به علت سطح تماس بالا، مقاومت بالا در برابر خستگی و خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا و قیمت مناسب از خصوصیات برجسته اتصالات چسبی می‌باشند. در طراحی اتصالات چسبی توجه به این نکته ضروری است که شکل اتصال به نحوی انتخاب شود که تنش وارد بر چسب به صورت برشی ظاهر گردد.

<sup>1</sup> Interfacial normal stress<sup>2</sup> Adhesive layer<sup>3</sup> Adherend layer<sup>4</sup> Peeling<sup>5</sup> Eccentricity load<sup>6</sup> Goland and Reissner<sup>7</sup> Zhao and Lu<sup>8</sup> Bavi<sup>9</sup> Mixed adhesive<sup>10</sup> Specific strength

در نظر گرفتن اثر مدول یانگ چسب و چسب شونده‌ها صورت گرفته است. اتصال بررسی شده حالت تک‌لبه نامتقارن بوده که تحت تاثیر نیروی کششی در راستای طولی قرار داشته و رفتار مواد تشکیل دهنده آن‌ها در محدوده الاستیک خطی در نظر گرفته شده است.

## ۲- استخراج روابط حاکم بر اتصال چسبی تک‌لبه

در شکل ۱، طرح‌واره یک اتصال چسبی تک‌لبه آورده شده است. دو چسب شونده با ضخامت  $t_1$  و  $t_2$  که به‌وسیله اتصال تک‌لبه و لایه چسب به‌ضخامت  $t_3$  به هم متصل شده‌اند، در شکل مزبور نشان داده شده است. طول ناحیه چسبی<sup>۶</sup> و نواحی غیر چسبی به ترتیب با  $2l$  و  $L$  مشخص شده است. دو انتهای آزاد اجزای اتصال بر روی تکیه‌گاه ساده قرار داشته و نیروی کششی  $F$  را تحمل می‌کنند.  $E_i$  و  $G_i$ ،  $\mu_i$  ( $i=1,2,3$ ) به ترتیب نسبت پواسون، مدول برشی و مدول یانگ برای چسب شونده بالایی، چسب شونده پایینی و لایه چسب می‌باشند. به‌منظور ساده‌سازی مسئله، از فرضیه‌های زیر در این تحلیل استفاده شده است:



شکل (۱): مدل دو بعدی اتصال تک‌لبه.

۱. حالت تنش، صفحه‌ای در نظر گرفته شده است.
۲. لایه‌های چسبیده شده و لایه چسب به‌صورت همسان‌گرد<sup>۷</sup> در نظر گرفته شده‌اند.
۳. تنش برشی در راستای ضخامت چسب به‌صورت ثابت فرض شده است.
۴. معادله تغییرات جابه‌جایی طولی و عرضی در چسب به‌صورت تابعی خطی در جهت ضخامت در نظر گرفته شده است.
۵. از نیروی محوری در چسب صرف‌نظر شده که با توجه به پایین بودن نسبت مدول یانگ چسب به لایه‌های چسبیده شده، فرض معقولی می‌باشد.

معادلات بر مبنای تئوری شیرلگ و حل معادلات بر اساس روش تفاضل محدود صریح صورت گرفت. شهبازی کرمی و همکاران [۹]، توزیع تنش برشی بین لایه‌ای در اتصالات لبه‌ای چسبی در کامپوزیت‌ها را به‌صورت تحلیلی و اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. صلاحی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۰]، تحلیل دینامیکی گذرا از نوع نیمه تحلیلی را برای اتصال چسبی تک لبه مطالعه نمودند. در پژوهشی دیگر، وانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۱۱]، تأثیر نرخ بارگذاری بر رفتار مکانیکی و شکست اتصالات چسبی تک لبه را بررسی کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان دهنده افزایش استحکام برشی اتصال در اثر افزایش نرخ بارگذاری بود. میگوئل<sup>۳</sup> و همکاران [۱۲]، میدان تنش سه بعدی به‌وجود آمده در اتصال چسبی را با استفاده مدل شبیه‌سازی عددی مرتبه بالا ارزیابی نمودند. بررسی میزان دقت مدل ارائه شده در تحقیق ایشان از طریق مقایسه با حل‌های تحلیلی و عددی موجود در مراجع صورت گرفت. بیگ رضایی<sup>۴</sup> و همکاران [۱۳]، با استفاده از تکنیک ناچینگ، استحکام اتصال چسبی تک‌لبه را بهبود دادند. ایشان در این روش، بر روی سطح بیرونی چسب شونده، یک برش به‌صورت مستطیلی و نیم‌دایره به‌وجود آورده و بهبود استحکام اتصال را مشاهده نمودند. بهرا<sup>۵</sup> و همکاران [۱۴]، تحلیل سه‌بعدی تنش سطحی یک اتصال چسبی تک‌لبه از جنس مواد مرکب را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق ایشان، توزیع تنش تورق و تنش برشی در موده‌های مختلف مطالعه شد.

به‌منظور طراحی یک اتصال چسبی با بازده بالا، طراح باید تا حد امکان تنش تورق را کاهش دهد. هدف از پژوهش حاضر، استخراج معادلات تنش در اتصال تک‌لبه چسبی و ارائه طراحی بهینه بر اساس کمینه‌سازی تنش تورق می‌باشد. تا کنون تحقیق در زمینه بهینه‌سازی ابعاد اتصال و انتخاب چسب مناسب به‌مراتب کمتر از دیگر زمینه‌های اتصالات مواد مرکب انجام شده و علت اصلی آن نیز همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، محدودیت و پیچیدگی حل‌های تحلیلی ارائه شده می‌باشد. در پژوهش حاضر، بهینه‌سازی مقادیر ضخامت چسب شونده و چسب اتصال با

<sup>1</sup> Selahi

<sup>2</sup> Wang

<sup>3</sup> Miguel

<sup>4</sup> Beigrezaee

<sup>5</sup> Behera

<sup>6</sup> Overlap length

<sup>7</sup> Isotropic

بر اساس شکل مزبور، معادلات کلی تعادل (به ترتیب در راستای محور  $x$ ،  $y$  و  $z$ ) و شرایط مرزی به ترتیب به صورت روابط (۱) الی (۳) استخراج می گردند [۱۵].

$$\frac{df_1}{dx} + \tau_3 = 0 \quad (۱-الف)$$

$$\frac{df_2}{dx} - \tau_3 = 0 \quad (۱-ب)$$

$$\frac{dQ_1}{dx} + \sigma_{3y}'' = 0 \quad (۲-الف)$$

$$\frac{dQ_2}{dx} - \sigma_{3y}'' = 0 \quad (۲-ب)$$

$$\frac{d\tau_3}{dx} t_3 - (\sigma_{3y}'' - \sigma_{3y}') = 0 \quad (۲-پ)$$

$$\frac{dM_1}{dx} - Q_1 + \tau_3 \frac{t_1}{2} = 0 \quad (۳-الف)$$

$$\frac{dM_2}{dx} - Q_2 + \tau_3 \frac{t_2}{2} = 0 \quad (۳-ب)$$

با توجه به شکل ۲، شرایط مرزی کلی اتصال از تعادل بارهای لبه‌ای به صورت رابطه (۴) به دست می آید.

$$x = -l \Rightarrow M_1 = M_1^*, Q_1 = Q_1^*, f_1 = F, \quad (۴-الف)$$

$$M_2 = Q_2 = f_2 = \tau_3 = 0$$

$$x = +l \Rightarrow M_2 = -M_2^*, Q_2 = Q_2^*, f_2 = F, \quad (۴-ب)$$

$$M_1 = Q_1 = f_1 = \tau_3 = 0$$

به منظور محاسبه بارهای لبه‌ای، می بایست ابتدا سختی خمشی لایه‌ها محاسبه شوند. برای محاسبه این پارامتر باید فاصله محور خنثی تا سطح میانی اتصال (وسط لایه چسب) به دست آید. برای یافتن مکان محور خنثی، از تنش محوری در اتصال در یک مقطع دلخواه به صورت رابطه (۵) انتگرال گیری می شود.

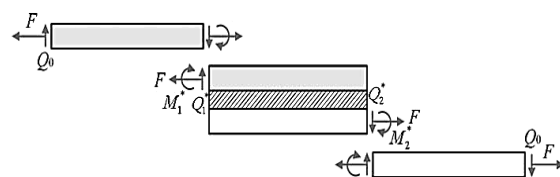
$$\sum F_x = \int_{-(t_2+d)}^{-d} \sigma_x dy + \int_{-d}^0 \sigma_x dy + \int_0^{(t_1-d)} \sigma_x dy = 0 \quad (۵)$$

با در نظر گرفتن توزیع خطی تنش عمودی در طول ضخامت اتصال، فاصله محور خنثی به صورت رابطه (۶) استخراج می گردد [۱۶].

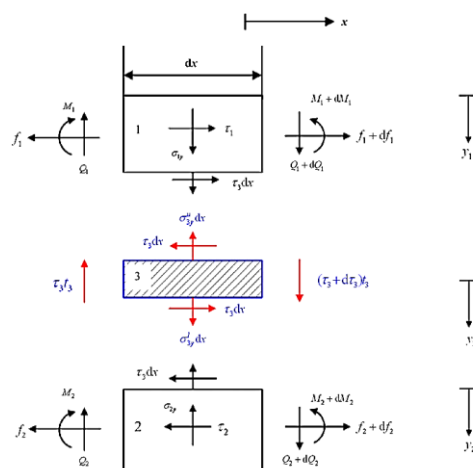
$$d = \frac{1}{2} \left( \frac{E_1 t_1^2}{1 - \mu_1^2} - \frac{E_2 t_2^2}{1 - \mu_2^2} \right) \times \left( \frac{E_1 t_1}{1 - \mu_1^2} + \frac{E_2 t_2}{1 - \mu_2^2} \right)^{-1} \quad (۶)$$

۶. از فرضیه خمش استوانه‌ای<sup>۱</sup> در محاسبه خیز در ناحیه چسبی و لایه‌های چسبیده استفاده شده است.

بر اساس اتصال ارائه شده در شکل مزبور، کرنش‌های مربوط به سه لایه ذکر شده در اتصال و  $\sigma_{ix}, \sigma_{iy}, \tau_i$  ( $i=1,2,3$ ) تنش‌ها و  $\varepsilon_{ix}, \varepsilon_{iy}, \gamma_i$  کرنش‌های مربوط به سه لایه ذکر شده در اتصال و  $\sigma_{3y}''$  به ترتیب تنش ناشی از تورق در سطوح بالا و پایین لایه چسب می باشند (تنش تورق میان لایه‌ای که مورد بحث این پژوهش است). پارامتر  $\tau_3 = \tau_3(x) = \tau_m$  تنش برشی میانگین در چسب بوده (تنش برشی در چسب ثابت فرض شده است) و  $f_i, Q_i, M_i$  ( $i=1,2,3$ ) به ترتیب بیان گر نیروی کششی، نیروی برشی و گشتاور خمشی در هر یک از سه جزء اتصال می باشند.  $M_i^*$  و  $Q_i^*$  ( $i=1,2$ ) به ترتیب نیروی برشی و گشتاور خمشی در انتهای دو جزء بالایی و پایینی اتصال بوده که بارهای لبه‌ای نیز نامیده می شوند (شکل ۲). سایر لبه‌های اتصال عاری از تنش می باشند. در شکل ۳، دیاگرام جسم آزاد برای یک المان کوچک از ناحیه اتصال نشان داده شده است.



شکل (۲): نمودار تعادل نیرویی اتصال تک لایه [۱۵].



شکل (۳): نمودار جسم آزاد تعادل تنش در المان موجود در ناحیه اتصال چسبی.

<sup>1</sup> Cylindrically bent plate theory

$$\sigma_{ix} = \frac{f_i}{t_i} + \frac{6M_i(2\rho_i - 1)}{t_i^2} \quad 0 \leq y_i \leq t_i, \rho_i = \frac{y_i}{t_i} \quad (11)$$

مطابق با روابط الاستیسیته دوبعدی، مولفه‌های تنش در رابطه مزبور باید معادلات تعادل ارائه شده در رابطه (۱۲) را ارضا نمایند.

$$\frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_i}{\partial y_i} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (12\text{-الف})$$

$$\frac{\partial \sigma_{iy}}{\partial y_i} + \frac{\partial \tau_i}{\partial x} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (12\text{-ب})$$

از جای‌گذاری رابطه (۱۱) در معادلات تعادل و همچنین در نظر گرفتن شرایط پیوستگی تنش برشی بین چسب و چسب شونده‌ها و شرایط سطح آزاد در بالا و پایین چسب شونده‌ها، مولفه‌های تنش برشی به‌صورت رابطه (۱۳) استخراج می‌گردند.

$$\tau_1 = \tau_3(3\rho_1^2 - 2\rho_1) - 6Q_1(\rho_1^2 - \rho_1)/t_1 \quad (13\text{-الف})$$

$$\tau_2 = \tau_3(3\rho_2^2 - 2\rho_2 + 1) - 6Q_2(\rho_2^2 - \rho_2)/t_2 \quad (13\text{-ب})$$

با اعمال روندی مشابه و با قرار دادن رابطه (۱۳) در معادلات تعادل، مولفه‌های تنش‌های عمودی برای چسب شونده‌ها به‌صورت رابطه (۱۴) به‌دست می‌آیند.

$$\sigma_{1y} = \frac{d\tau_3}{dx}(-\rho_1^3 + \rho_1^2) + \sigma_{3y}''(-2\rho_1^3 + 3\rho_1^2) \quad (14\text{-الف})$$

$$\sigma_{2y} = \frac{d\tau_3}{dx}(-\rho_2^3 + 2\rho_2^2 - \rho_2) - \sigma_{3y}'(2\rho_2^3 - 3\rho_2^2 + 1) \quad (14\text{-ب})$$

$$\sigma_{3y} = \sigma_{3y}'' - \frac{d\tau_3}{dx}t_3(\rho_3 + 0.5) \quad (14\text{-پ})$$

لازم به‌ذکر است که در روابط فوق،  $\rho_i$  ( $i=1,2,3$ ) ضخامت بی‌بعد لایه‌ها بوده و در رابطه (۱۵) ارائه شده است.

$$0 \leq \rho_i \left( = \frac{y_i}{t_i} \right) \leq 1 \quad (i=1,2) \quad (15\text{-ب})$$

$$-0.5 \leq \rho_3 \left( = \frac{y_3}{t_3} \right) \leq 0.5 \quad (15\text{-پ})$$

با محاسبه ممان خمشی جهت محاسبه صلبیت خمشی لایه‌ها و ناحیه چسبی، رابطه (۷) حاصل می‌شود. در این رابطه،  $D_1$  و  $D_2$  به‌ترتیب سختی خمشی لایه‌های ۱ و ۲ در نواحی غیر چسبی و  $D_3$  سختی خمشی در ناحیه چسبی است.

$$D_1 = \frac{E_1 t_1^3}{12(1 - \mu_1^2)} \quad (7\text{-الف})$$

$$D_2 = \frac{E_2 t_2^3}{12(1 - \mu_2^2)} \quad (7\text{-ب})$$

$$D_3 = \frac{E_1}{3(1 - \mu_1^2)} [(t_1 - d)^3 + d^3] + \frac{E_2}{3(1 - \mu_2^2)} [(t_2 + d)^3 - d^3] \quad (7\text{-پ})$$

برای محاسبه گشتاورهای لبه‌ای، ابتدا می‌بایست رابطه خیز در نواحی مختلف اتصال را به‌دست آورده و سپس با توجه به تئوری خمش استوانه‌ای و از ارتباط بین گشتاور و خیز ( $w$ ) که در رابطه (۸) ارائه شده، استفاده نمود.

$$\frac{d^2 w_i}{dx_i^2} = -\frac{M_i}{D_i} \quad (i=1,2,3) \quad (8)$$

با اعمال شرایط مرزی نیرویی حاکم بر اتصال، میزان نیروی برشی و گشتاور خمشی به‌ترتیب به‌صورت روابط (۹) و (۱۰) به‌دست می‌آیند.

$$Q_1^* = -D_1 \frac{d^3 w_1}{dx_1^3} \Big|_{x_1=L_1} \quad (9\text{-الف})$$

$$Q_2^* = -D_2 \frac{d^3 w_2}{dx_2^3} \Big|_{x_2=0} \quad (9\text{-ب})$$

$$M_1^* = -D_1 \frac{d^2 w_1}{dx_1^2} \Big|_{x_1=L_1} \quad (10\text{-الف})$$

$$M_2^* = -D_2 \frac{d^2 w_2}{dx_2^2} \Big|_{x_2=0} \quad (10\text{-ب})$$

تنش عمودی طولی در اجزای اتصال ( $i=1,2$ ) را می‌توان در راستای ضخامت، خطی فرض کرده و به‌صورت رابطه (۱۱) بیان نمود. لازم به‌ذکر است که در این رابطه، از تنش عمودی طولی در چسب صرف‌نظر شده است [۱۶].

## ۳- الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل

یک مسئله بهینه‌سازی عبارت است از یافتن یک یا چند جواب موجه که مربوط به مقادیر بحرانی یک یا چند تابع هدف باشند. منظور از یافتن چنین جواب‌های بهینه‌ای در یک مسئله، اغلب طرح یک جواب جهت حداقل ساختن هزینه ممکن ساخت یا حداکثر ساختن قابلیت اطمینان ممکن و یا غیره است. الگوریتم زنبور عسل شامل گروهی مبتنی بر الگوریتم جستجو است که اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسعه یافت و هدف آن، شبیه‌سازی رفتار جستجوی غذای گروه‌های زنبور عسل است. از بین گروهی از زنبورها تعدادی به‌عنوان مأمورین اکتشاف انتخاب می‌شوند که این زنبورها به طور تصادفی گلزارها را یکی پس از دیگری جستجو نموده و آن‌ها را بر اساس دو عامل کیفیت غذا و مقدار انرژی مورد نیاز برای رسیدن به آن گلزار ارزیابی می‌کنند [۱۷]. سپس زنبورها از طریق یک رقص چرخشی و جنبشی با دیگر زنبورها ارتباط برقرار می‌نمایند. این رقص‌ها شامل اطلاعاتی همچون جهت گلزارها (با استفاده از زاویه خورشید و گلزار)، فاصله گلزار تا کندو (استمرار رقص) و دسته‌بندی کیفیت گلزارها (فرکانس رقص) می‌باشند [۱۸]. سپس با توجه به اطلاعات رسیده شده در مورد کیفیت و کمیت گلزارها، مکان‌های مناسب برای فرستادن زنبورهای بیشتر مشخص می‌شوند [۱۹]. فلوچارت این الگوریتم در شکل ۴ به‌صورت خلاصه بیان شده است.

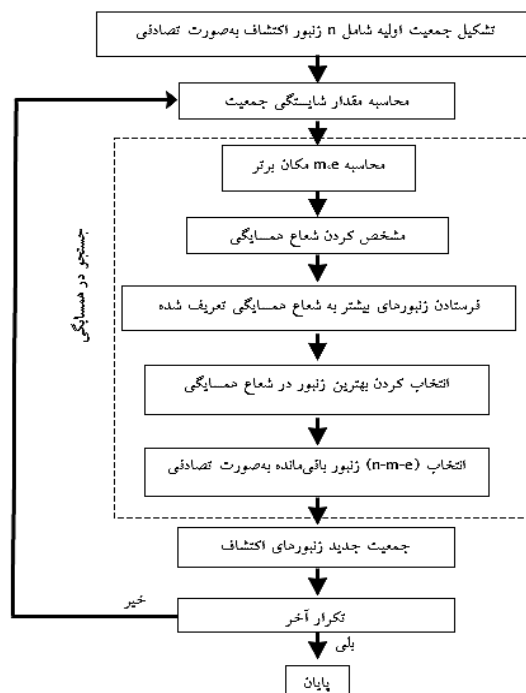
## ۴- نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش‌های پیشین بیان شد، هدف از پژوهش حاضر کمیته‌سازی تنش تورق در اتصال چسبی تک‌لبه است. به‌منظور بررسی دقت و صحت سنجی حل تحلیلی ارائه شده، در ابتدا نمودارهای توزیع تنش تورق بی‌بعد شده  $(\sigma_{3y}''/P, \sigma_{3y}'/P)$  در سطح اتصال لایه چسب و لایه چسبیده با حل اجزای محدود ارائه شده در مرجع [۱۵] مقایسه می‌شوند. اتصال نامتقارن به شکلی از اتصال لبه‌ای اطلاق می‌شود که در آن خواص هندسی، فیزیکی و یا هر دو آن‌ها در هر یک از چسب شونده‌ها با دیگری متفاوت باشد. بدین منظور، مشخصات انتخابی برای اتصال تک‌لبه نامتقارن در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس ابعاد ارائه شده در جدول مزبور، نمودار توزیع تنش تورق به‌دست آمده از حل‌های تحلیلی و عددی در شکل ۵ آورده شده است.

**جدول (۱):** مشخصات اتصال تک‌لبه نامتقارن جهت مقایسه با حل اجزاء محدود.

لایه	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	ضخامت (mm)	طول (mm)
بالایی	۷۰	۰/۳۴	۲	۴۰
پایینی	۱۴۰	۰/۳۴	۲	۴۰
چسب	۰/۷	۰/۴	۰/۲	۲۰

در جدول ۲، مقایسه عددی مقادیر بیشینه به‌دست آمده از حل تحلیلی اتصال تک‌لبه نامتقارن با حل اجزای محدود مرجع ارائه شده است. روند تغییرات و مقادیر تنش تورق به‌دست آمده از شکل ۵ و جدول ۲ نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب نتایج تحلیلی با حل اجزای محدود موجود در مراجع می‌باشند. در سطح فوقانی چسب، تنش در لبه سمت چپ افزایش و در لبه سمت راست کاهش می‌یابد (این اثر با نامتقارن‌تر شدن اتصال افزایش می‌یابد). نحوه تغییرات توزیع تنش در سطح زیرین چسب عکس سطح فوقانی بوده، به‌گونه‌ای که منجر به متعادل شدن تنش در هر دو لبه این لایه می‌شود. به‌منظور بررسی اثر جنس چسب شونده‌ها و جنس چسب بر روی توزیع تنش تورق و همچنین بیشینه مقدار آن در اتصال، از سه نوع چسب و سه نوع چسب شونده مختلف استفاده شده است (در مجموع نه ترکیب مختلف تشکیل می‌شود). چسب شماره ۱ مدول یانگ



شکل (۴): فلوچارت مربوط به الگوریتم زنبور عسل [۲۰].

**جدول (۲):** مقایسه حل تحلیلی و اجزای محدود اتصال تک‌لبه نامتقارن.

روش حل	بیشترین تنش تورق بی‌بعد شده در لبه سمت راست	بیشترین تنش تورق بی‌بعد شده در لبه سمت چپ
حل اجزای محدود	۰/۴۸	۰/۷۴
حل تحلیلی حاضر	۰/۴۳	۰/۸۱
خطا %	۱۰	۹

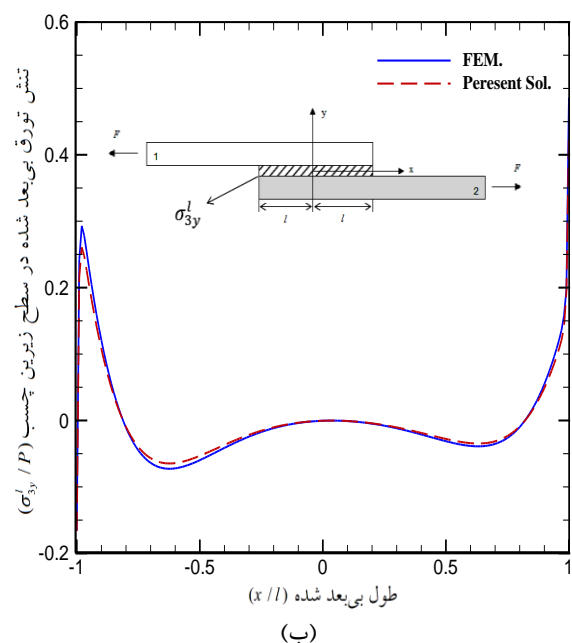
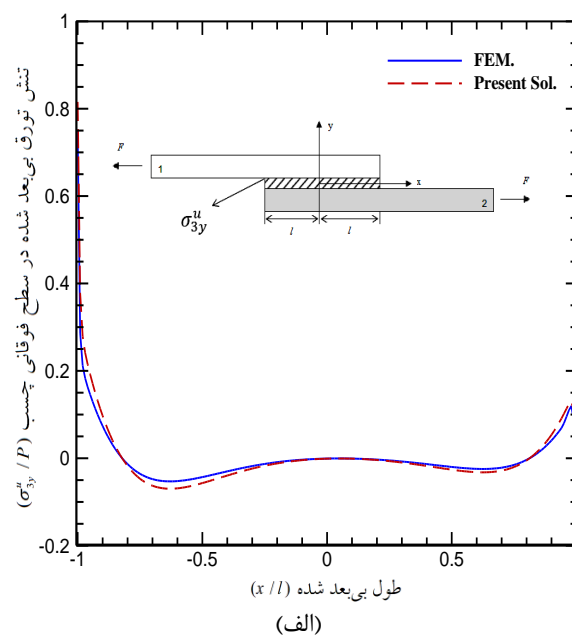
**جدول (۳):** مشخصات مواد انتخابی برای اتصال چسبی.

لایه	تنش تسلیم (MPa)	نسبت پواسون	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	مدول یانگ (GPa)
چسب ۱	۹/۲	۰/۴	۱۰۶۵	۰/۵۰
چسب ۲	۳۴	۰/۳۷	۱۶۳۰	۲/۴
چسب ۳	۴۳	۰/۳۵	۱۷۰۰	۴/۷
چسب شونده ۴	۱۵۰	۰/۳۴	۲۷۰۰	۷۰
چسب شونده ۵	۲۷۰	۰/۲۲	۷۲۰۰	۱۴۰
چسب شونده ۶	۳۳۵	۰/۲۹	۷۸۰۰	۲۱۰

#### ۴-۱- به‌دست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای طراحی

هدف از این پژوهش، یافتن هم‌زمان ضخامت بهینه چسب و نسبت ضخامت دو چسب شونده به هم به‌ازای نسبت‌های مختلف مدول یانگ آن‌ها می‌باشد. پارامترهای بهینه‌سازی و محدوده تغییرات آن‌ها جهت بهینه‌سازی اتصال تک‌لبه نامتقارن در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج تحقیق برای مقادیر  $E_2 / E_1$  برابر ۲ الی ۱۰ محاسبه شده است. مدول یانگ چسب شونده اول و ضخامت چسب شونده دوم ثابت در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای ثابت اتصال تک‌لبه

پایینی دارد و چسب‌های شماره ۲ و ۳ سخت‌تر می‌باشند. همین خصوصیت نیز در انتخاب چسب شونده‌ها ملاک قرار گرفته است. مشخصات چسب و چسب شونده‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.



**شکل (۵):** توزیع تنش تورق به‌وجود آمده در لایه چسبی اتصال تک‌لبه نامتقارن، الف- سطح فوقانی و ب- سطح

زیرین.

<sup>1</sup> Av138M-Epoxy Adhesive

<sup>2</sup> Av2013-Epoxy Adhesive

<sup>3</sup> DP8005-Epoxy Adhesive

<sup>4</sup> Aluminum

<sup>5</sup> Cast iron

<sup>6</sup> Steel

پس از انجام فرآیند بهینه‌سازی، نتایج پارامترهای بهینه شده در جدول ۷ آورده شده است.

**جدول (۷):** نتایج بهینه‌سازی اتصال نامتقارن به‌ازای نسبت‌های مختلف مدول یانگ چسب شونده‌ها.

پارامتر طراحی	کمترین (mm)	بیشترین (mm)
$t_3$	۰/۰۵	۱
$t_1$	۱	۱۰

پارامترهای بهینه شامل ضخامت لایه چسب شونده بالایی و ضخامت لایه چسبی با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف سختی خمشی بوده و هدف از انجام فرآیند بهینه‌سازی، کمینه‌سازی تنش تورق به‌وجود آمده در چسب می‌باشد. لازم به‌ذکر است که مقادیر ارائه شده در جدول مزبور بر حسب میلی‌متر می‌باشند. افزایش مدول یانگ چسب شونده پایینی، موجب افزایش سختی خمشی شده و این اثر، توزیع تنش در سطوح فوقانی و زیرین چسب را تغییر می‌دهد. برای جلوگیری از برهم خوردن توزیع تنش تورق و افزایش تمرکز تنش، باید ضخامت چسب شونده اول (با فرض ثابت بودن مدول یانگ آن) افزایش یابد. مشاهده می‌شود که با ده برابر شدن نسبت مدول یانگ لایه‌ها، ضخامت بهینه چسب شونده اول به ۴/۹ میلی‌متر رسیده است (کمتر از ۲/۵ برابر ضخامت چسب شونده دوم). نتایج به‌دست آمده برای ضخامت چسب شونده، مستقل از مدول یانگ چسب بوده و فقط با تغییر مدول یانگ چسب شونده دوم تغییر می‌کند. تغییرات ضخامت بهینه لایه چسبی برای هر سه نوع چسب ارتباط مستقیمی با ضخامت چسب شونده اول دارد و در هر سه نوع، تقریباً به‌میزان افزایش نسبت ضخامت چسب شونده اول به دوم، ضخامت بهینه لایه چسبی نسبت به‌حالت متقارن افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، هنگامی‌که نسبت مدول یانگ چسب شونده‌ها (لایه دو به یک) برابر هفت است، نسبت ضخامت بهینه آن‌ها (لایه یک به دو) برابر ۲/۱۵ بوده و ضخامت بهینه لایه چسب تقریباً ۲/۱۵ برابر ضخامت بهینه اتصال متقارن با همان چسب‌ها می‌باشد. در مثال ذکر شده، ضخامت بهینه لایه چسبی به‌ترتیب برای نوع ۱، ۲ و ۳ برابر با ۰/۱۷۳، ۰/۲۵۷ و ۰/۲۳۸ میلی‌متر بوده و ضخامت بهینه اتصال متقارن با همان چسب‌ها به‌ترتیب برابر ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۱ میلی‌متر می‌باشد. اختلاف اندک در نسبت‌ها، به‌دلیل

نامتقارن در جدول ۵ ارائه شده است. مدول یانگ لایه بالایی اتصال ثابت فرض شده و مقدار آن برابر ۷۰ گیگاپاسکال می‌باشد. ورودی‌های اصلی الگوریتم زنبور عسل در این پژوهش در جدول ۶ آورده شده است.

**جدول (۴):** محدوده انتخابی پارامترهای بهینه‌سازی اتصال تک‌لبه نامتقارن.

نسبت مدول یانگ ( $E_2 / E_1$ )	بهرینه لایه ۱ ( $t_1$ )	ضخامت بهینه چسب ۱	ضخامت بهینه چسب ۲	ضخامت بهینه چسب ۳
۱	۲	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۱۰
۲	۲/۶	۰/۱۰۵	۰/۱۵۷	۰/۱۴۴
۳	۳/۱	۰/۱۲۴	۰/۱۸۶	۰/۱۷۰
۴	۳/۴	۰/۱۳۸	۰/۲۰۴	۰/۱۸۸
۵	۳/۸	۰/۱۵۲	۰/۲۲۹	۰/۲۰۹
۶	۴	۰/۱۶۰	۰/۲۴۰	۰/۲۲۰
۷	۴/۳	۰/۱۷۳	۰/۲۵۷	۰/۲۳۸
۸	۴/۵	۰/۱۸۰	۰/۲۷۱	۰/۲۴۷
۹	۴/۷	۰/۱۸۷	۰/۲۸۲	۰/۲۵۸
۱۰	۴/۹	۰/۱۹۵	۰/۲۹۵	۰/۲۶۹

**جدول (۵):** پارامترهای ثابت اتصال تک‌لبه نامتقارن.

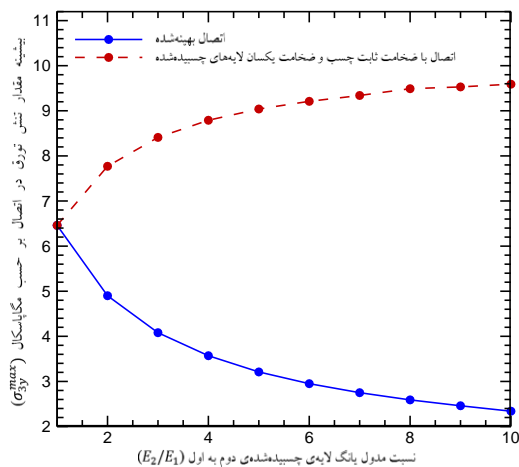
پارامتر	اندازه (mm)
$L_1$	۱۰۰
$L_2$	۱۰۰
l	۲۵
$t_2$	۲

**جدول (۶):** ورودی‌های اصلی الگوریتم زنبور عسل.

پارامترهای الگوریتم	نماد	مقدار
تعداد زنبورها	n	۵۰
تعداد مکان‌های انتخاب شده	m	۲۰
تعداد بهترین مکان‌ها	e	۵
شعاع همسایگی	ngh	$(x_j^{\max} - x_j^{\min}) / ۵۰$
تعداد زنبورهای فرستاده شده برای مکان‌های منتخب	$N_e$	۱۰
تعداد زنبورهای فرستاده شده برای بهترین مکان‌ها	$N_m$	۲۰
تعداد محاسبه تابع هدف	$i_{\max}$	۲۰۰۰

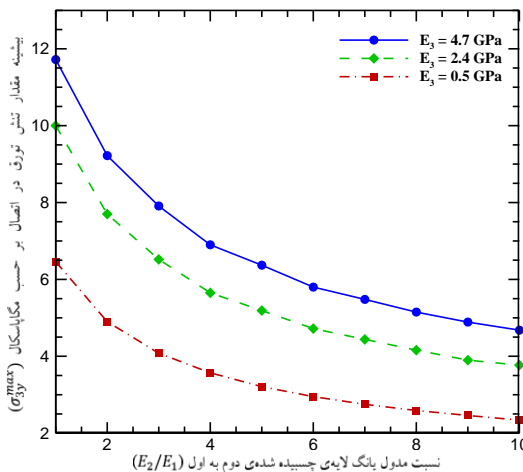


در شکل ۶، مقادیر تنش تورق در اتصال نامتقارن بهینه شده با حالت بهینه نشده مقایسه گردیده است. مشاهده می‌شود که با رسیدن به حالت بهینه، تنش تورق در اتصال کمتر از حالت متقارن شده و با زیاد شدن نسبت مدول یانگ دو چسب شونده، این اختلاف بیش‌تر نیز می‌گردد. در حالت بهینه نشده، روند افزایشی تنش در اتصال، با زیاد شدن نسبت مدول یانگ‌ها مطابق شکل مزبور به سرعت کاهش می‌یابد. در شکل ۷، بیشینه مقدار تنش تورق در اتصال نامتقارن بهینه شده برای سه نوع چسب مورد نظر، با هم مقایسه گردیده است. مقدار تابع هدف ( $\sigma_{3y}^{max}$ ) برای هر سه نوع چسب، با نامتقارن‌تر شدن اتصال، تقریباً به یک اندازه کاهش یافته است (کاهش ۶۰٪ برای چسب شماره ۳، ۶۲٪ برای چسب شماره ۲ و ۶۴٪ برای چسب شماره ۱، از حالت متقارن تا نامتقارن‌ترین حالت).



شکل (۶): مقایسه بیشینه مقدار تنش تورق در اتصال نامتقارن بهینه نشده با حالت بهینه شده.

نامتقارن بهینه نشده با حالت بهینه شده.



شکل (۷): تاثیر جنس چسب بر بیشینه مقدار تنش تورق بهینه شده در اتصال نامتقارن.

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بوده که جواب تقریبی را به دست آورده‌اند. بیشینه تنش تورق در اتصال را مشخصات چسب شونده بالایی تعیین می‌کند؛ زیرا در لایه نرم‌تر اتصال بوده و با افزایش ضخامت آن تا حد بهینه، تنش تورق میان لایه‌ای کمینه می‌شود.

#### ۴-۲- اثر بهینه‌سازی بر بیشینه مقدار تنش تورق

در جدول ۸، مقادیر مقایسه‌ای تنش تورق در اتصال نامتقارن بهینه شده و بهینه نشده آورده شده است. منظور از بهینه نشده، اتصال نامتقارنی است که در آن دو چسب شونده دارای ضخامت یکسان هستند. در حالت متقارن، بیشینه مقدار تنش تورق در اتصال برابر ۶/۴۶ مگاپاسکال بوده که با افزایش مدول یانگ لایه دوم (نامتقارن شدن اتصال)، این تنش در اتصال بهینه نشده افزایش می‌یابد. در نتیجه با به کار بردن چسب شونده سخت‌تر در یکی از لایه‌ها، تنش تورق نه تنها در اتصال کاهش پیدا نکرده، بلکه مقدار آن افزایش می‌یابد. این در حالی است که چسب شونده سخت‌تر باید تنش تورق در اتصال را کاهش دهد. علت آن همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، عدم توزیع یکنواخت تنش در سطوح فوقانی و زیرین چسب می‌باشد که با زیاد شدن سختی یکی از لایه‌ها، این اختلاف افزایش پیدا می‌کند.

جدول (۸): مقایسه مقدار تنش تورق در اتصال نامتقارن

بهینه شده و بهینه نشده برای چسب شماره ۱.

نسبت مدول یانگ چسب شونده‌ها ( $E_2/E_1$ )	نسبت بهینه ضخامت لایه‌ها ( $t_1/t_2$ )	مقایسه مقدار تنش تورق در اتصال بهینه شده (MPa)	مقایسه مقدار تنش تورق در اتصال بهینه نشده (MPa)
۱	۱	۶/۴۶	۶/۴۶
۲	۱/۳	۴/۹۰	۷/۷۷
۳	۱/۵۵	۴/۰۸	۸/۴۱
۴	۱/۷	۳/۵۷	۸/۷۹
۵	۱/۹	۳/۲۱	۹/۰۴
۶	۲	۲/۹۵	۹/۲۱
۷	۲/۱۵	۲/۷۵	۹/۳۴
۸	۲/۲۵	۲/۵۹	۹/۴۹
۹	۲/۳۵	۲/۴۶	۹/۵۳
۱۰	۲/۴۵	۲/۳۴	۹/۵۹

مواد مورد استفاده در اغلب اتصالات، مدول یانگی در این بازه طراحی دارند. مشاهده می‌شود که در نامتقارن‌ترین حالت ( $E_2/E_1=10$ ) نیاز به ضخامت ۲/۵ برابری برای لایه نرم‌تر (چسب شونده بالایی) جهت بهینه کردن اتصال است. استفاده از ضخامت بهینه شده چسب شونده منجر به افزایش وزن اتصال نامتقارن می‌گردد. در بخش بعد، اثر افزایش وزن اتصال در حالت بهینه شده با سایر حالت‌ها بررسی می‌شود.

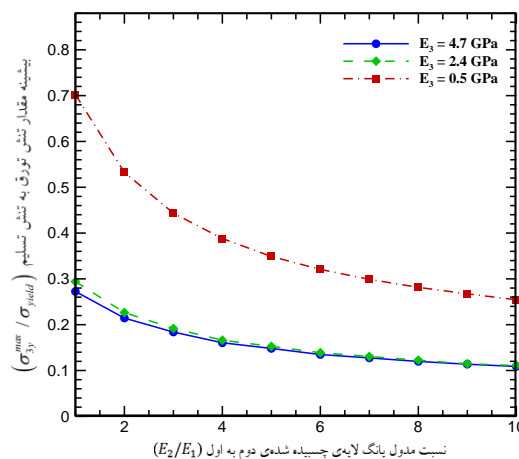
#### ۴-۳- اثر بهینه‌سازی بر وزن اتصال چسبی

بر اساس توضیحات ارائه شده در بخش‌های پیشین مشخص است که اتصال بهینه شده نامتقارن، وزن بیشتری نسبت به اتصال‌های متقارن و نامتقارن بهینه نشده دارد (به‌علت ضخامت بیشتر لایه بالایی). برای یافتن وزن هر یک از اتصال‌ها، چگالی مواد به کار رفته در اتصال برای تمامی نسبت‌های مدول یانگ مورد نیاز می‌باشد. از این‌رو، فقط برای سه نوع چسب شونده معرفی شده در جدول ۳ و چسب شماره ۱، نتایج ارائه گردیده است. محاسبه میزان وزن اتصال چسبی از طریق رابطه (۱۶) امکان‌پذیر است.

$$m = bt_1(2l+L)\rho_1 + bt_2(2l+L)\rho_2 + 2bt_3l\rho_3 \quad (16)$$

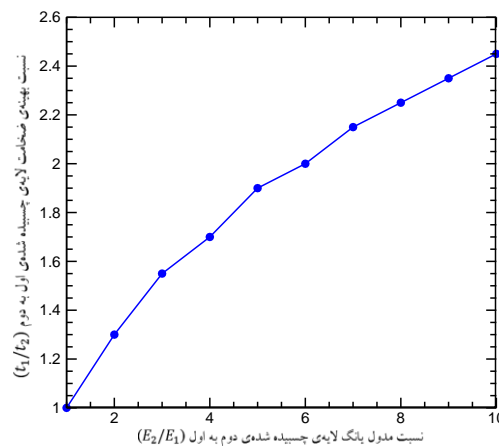
در رابطه فوق،  $\rho_i$  ( $i=1,2,3$ )، به ترتیب چگالی چسب شونده بالایی، پایینی و چسب بوده و  $b$  عرض اتصال می‌باشد. در جدول ۹، مقایسه وزن اتصال نامتقارن بهینه شده با اتصال بهینه نشده ارائه گردیده است. در جدول مزبور، وزن و بیشینه تنش تورق در اتصال برای تمامی ترکیب‌های ممکن جهت ساخت یک اتصال نامتقارن و متقارن از آلومینیوم، چدن و فولاد آورده شده است. سه ردیف اول جدول شامل اتصالات متقارن و سه ردیف دوم شامل اتصالات نامتقارن برای سه نوع چسب شونده ذکر شده می‌باشند. مقایسه وزن و تنش در اتصال نامتقارن بهینه نشده با بهینه شده برای اتصال چدن-فولاد (لایه بالایی از چدن و پایینی از فولاد) به‌ازای ۸٪ افزایش وزن، ۲۴٪ کاهش در بیشینه مقدار تنش تورق را نشان می‌دهد. برای اتصال آلومینیوم-چدن به‌ازای ۸٪ افزایش وزن، ۳۶٪ کاهش در بیشینه مقدار تنش تورق به‌وجود آمده و در نهایت برای اتصال آلومینیوم-فولاد، به‌ازای ۱۴٪ افزایش وزن، ۵۲٪ کاهش در بیشینه مقدار تنش تورق رؤیت شده است. از

از مقایسه چسب نرم (شماره ۱) با چسب سخت (شماره ۳) مشاهده می‌شود که با افزایش حدود ده برابری مدول یانگ چسب (۰/۵ به ۴/۷ گیگاپاسکال)، مقدار بیشینه تنش تورق در اتصال (به‌صورت میانگین) حدود دو برابر شده است. با مراجعه به جدول ۳، ملاحظه می‌شود که تنش تسلیم چسب سخت بیش از چهار برابر چسب نرم است (۴۳ به ۹/۳ مگاپاسکال). در این مسئله، چسب نرم به تنش تسلیم خود بسیار نزدیک شده، اما چسب سخت به کمتر از یک سوم تنش تسلیم خود می‌رسد. چسب‌های نرم اگرچه تنش تورق کمتری ایجاد می‌کنند، اما معمولاً به‌علت استحکام پایین، گزینه مناسبی برای بارگذاری‌های سنگین نمی‌باشند. نسبت تنش تورق به تنش تسلیم برای سه نوع چسب در شکل ۸ مقایسه شده است.



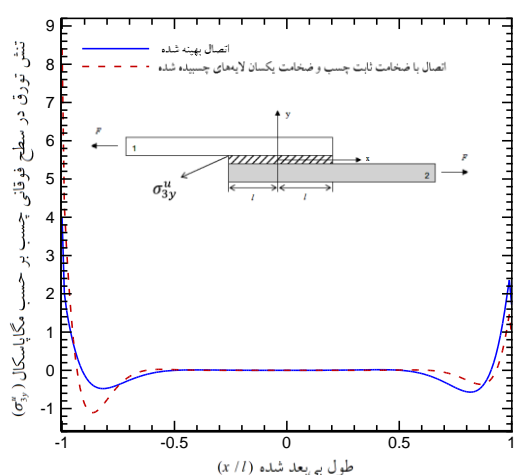
شکل (۸): مقایسه استحکام سه نوع چسب در اتصال نامتقارن.

در شکل ۹، اثر نسبت مدول یانگ لایه‌ها بر تغییرات نسبت ضخامت بهینه چسب شونده‌ها رسم شده است.



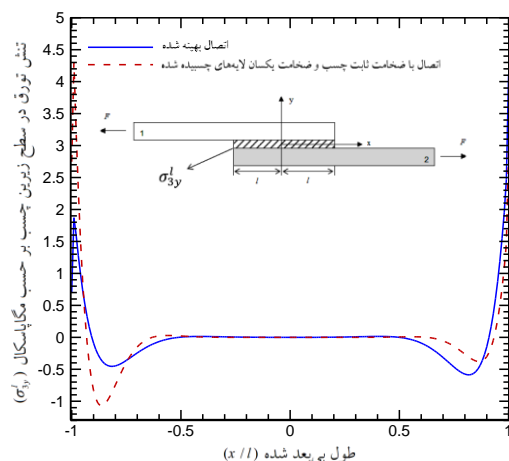
شکل (۹): تاثیر نسبت مدول یانگ لایه‌ها بر نسبت بهینه ضخامت آن‌ها در اتصال نامتقارن.

برابر سه آورده شده است. در این حالت، بیشینه تنش تورق در اتصال بهینه شده برابر ۴ مگاپاسکال بوده و بسیار کمتر از حالت بهینه نشده (برابر ۸/۲ مگاپاسکال) می‌باشد.



شکل (۱۰): مقایسه توزیع تنش تورق در سطح فوقانی چسب برای حالت بهینه شده و بهینه نشده ( $E_2/E_1=3$ ).

نمودار توزیع تنش تورق در سطح زیرین لایه چسب برای نسبت مدول یانگ برابر سه در شکل ۱۱ نشان شده است. مقدار بیشینه تنش در حالت بهینه شده برابر ۴ مگاپاسکال (مشابه سطح فوقانی) و در حالت بهینه نشده برابر ۴/۳ مگاپاسکال می‌باشد که این مقادیر بسیار به هم نزدیک می‌باشند.



شکل (۱۱): مقایسه توزیع تنش تورق در سطح زیرین چسب برای حالت بهینه شده و بهینه نشده ( $E_2/E_1=3$ ).

از مقایسه نتایج شکل‌دهای ۱۰ و ۱۱ می‌توان دریافت که توزیع تنش بهینه شده برای سطح فوقانی و زیرین دارای رفتار و مقدار یکسان (البته در لبه‌های مخالف) بوده و این همان توزیع تنشی می‌باشد که در حالت متقارن به‌دست

مقایسه دو اتصال متقارن چدن و فولاد با اتصال نامتقارن بهینه شده چدن-فولاد مشاهده می‌شود که با افزایش ۱۳٪ وزن اتصال نامتقارن نسبت به اتصال متقارن چدن و افزایش ۴٪ وزن نسبت به اتصال متقارن فولاد، به ترتیب کاهش ۱۴٪ (از ۵/۲۴ به ۴/۵ مگاپاسکال) و ۴٪ (از ۴/۶۷ به ۴/۵ مگاپاسکال) در بیشینه تنش تورق در اتصال به وجود می‌آید. نتایج ذکر شده، نشان از ضرورت استفاده از ضخامت بهینه در اتصال نامتقارن را دارد. در برخی از موارد، می‌توان یک اتصال نامتقارن بهینه شده را جایگزین یک اتصال متقارن نمود.

جدول (۹): مقایسه وزن اتصال نامتقارن بهینه شده با اتصال بهینه نشده.

نسبت مدول یانگ چسب شونده‌ها ( $E_2/E_1$ )	وزن اتصال بهینه نشده (Kg)	تنش تورق در اتصال بهینه شده (MPa)	وزن اتصال بهینه شده (Kg)	تنش تورق در اتصال بهینه شده (MPa)
آلومینیوم-آلومینیوم ( $E_2/E_1=1$ )	۰/۰۴۰۸	۶/۴۶	۰/۰۴۰۸	۶/۴۶
چدن-چدن ( $E_2/E_1=1$ )	۰/۱۰۸۱	۵/۲۴	۰/۱۰۸۱	۵/۲۴
فولاد-فولاد ( $E_2/E_1=1$ )	۰/۱۱۷۰	۴/۶۷	۰/۱۱۷۰	۴/۶۷
چدن-فولاد ( $E_2/E_1=1.5$ )	۰/۱۱۲۸	۵/۹۲	۰/۱۲۲۲	۴/۵۰
آلومینیوم-چدن ( $E_2/E_1=2$ )	۰/۰۷۴۵	۷/۷۷	۰/۰۸۰۶	۴/۹۵
آلومینیوم-فولاد ( $E_2/E_1=3$ )	۰/۰۷۹۰	۸/۴۱	۰/۰۹۰۱	۴/۰۸

#### ۴-۴- اثر بهینه‌سازی بر توزیع تنش تورق در اتصال

برای بررسی توزیع تنش در اتصال چسبی تک‌لبه نامتقارن و نشان دادن اثر افزایش نسبت مدول یانگ لایه‌ها بر توزیع تنش در اتصال، دو نسبت مدول یانگ برابر سه و هفت انتخاب شده و نمودار تنش تورق در سطوح فوقانی و زیرین لایه چسب ترسیم گردیده است. در شکل ۱۰، توزیع تنش تورق در سطح فوقانی لایه چسب برای نسبت مدول یانگ

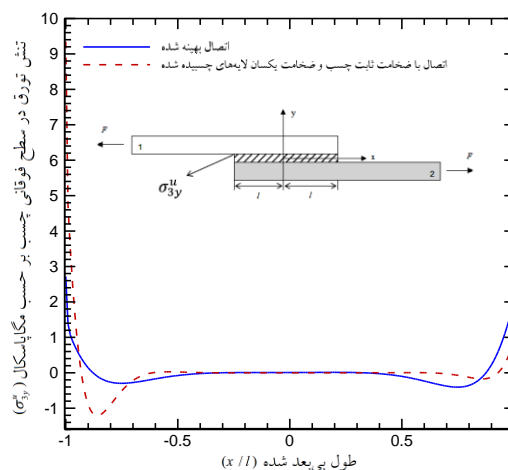
اینجا بالایی) با چسب می‌شود. این در حالی است که توزیع تنش در سطح دیگر چسب، تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند (از نظر اندازه تنش، نه از لحاظ شکل توزیع تنش).

### ۵- نتیجه‌گیری

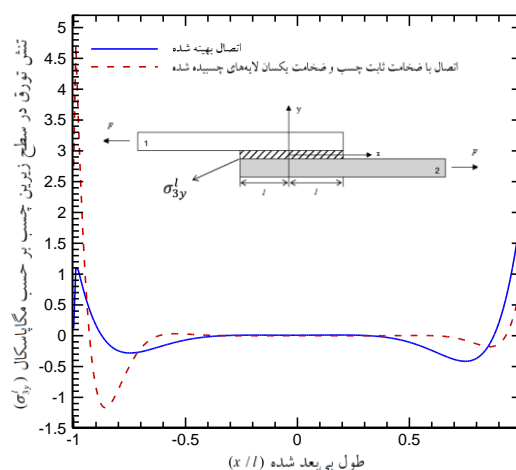
در پژوهش حاضر، بهینه‌سازی تنش تورق در اتصالات چسبی تک‌لبه مواد مرکب مورد بررسی قرار گرفت. در حل تحلیلی ارائه شده، از تئوری الاستیسیته دو بعدی و روابط تنش-کرنش جهت بررسی توزیع تنش در لایه‌های اتصال استفاده شده است. به منظور انجام عملیات بهینه‌سازی، الگوریتم زنبور عسل به کار گرفته شده و مقادیر بهینه پارامترهای فرآیند به دست آمدند. خلاصه نتایج تحقیق در زیر آورده شده است:

- افزایش مدول یانگ لایه چسبی، منجر به افزایش تنش تورق در محدوده طراحی طول ناحیه چسبی و ضخامت چسب شونده‌ها می‌شود. در بازه طراحی ضخامت لایه چسبی، تغییر مدول یانگ چسب، منجر به تغییر نقطه بهینه ضخامت آن شده، اما هم‌چنان چسب با مدول یانگ بیش‌تر، تنش تورق بیش‌تری در اتصال ایجاد می‌کند.
- افزایش مدول یانگ چسب شونده‌ها در محدوده طراحی طول ناحیه چسبی و ضخامت لایه چسبی، منجر به کاهش تنش تورق می‌شود. در محدوده طراحی ضخامت چسب شونده‌ها و در ضخامت‌های بسیار کم، افزایش مدول یانگ چسب شونده‌ها منجر به افزایش تنش تورق شده و با افزایش ضخامت چسب آن‌ها (هنگامی که بیشتر از ۱/۱ میلی‌متر شود) این اثر معکوس می‌گردد.
- اتصالات نامتقارن حاصل از سه چسب شونده معرفی شده در این تحقیق (آلومینیوم، چدن و فولاد)، در حالت بهینه شده به طور متوسط افزایش وزنی بین ۰.۸٪ تا ۱.۴٪ درصد نسبت به حالت بهینه نشده دارند و موجب کاهش ۲.۵٪ تا ۵.۰٪ درصدی تنش تورق در اتصال می‌شوند.
- ضخامت بهینه لایه چسب به نسبت مدول یانگ چسب شونده‌ها و ضخامت چسب شونده بالایی وابسته است. علت وابستگی نتایج به ضخامت

می‌آید. می‌توان دریافت که نامتقارن بودن اتصال، تأثیر چندانی بر توزیع تنش در سطح زیرین چسب ندارد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب توزیع تنش تورق در سطوح فوقانی و زیرین لایه چسب برای نسبت مدول یانگ برابر هفت آورده شده است. نمودارهای ارائه شده در این دو شکل بیان‌کننده آن است که در حالت بهینه شده، توزیع تنش یکسانی در هر دو سطح فوقانی و زیرین به دست می‌آید.



شکل (۱۲): مقایسه توزیع تنش تورق در سطح فوقانی چسب برای حالت بهینه شده و بهینه نشده ( $E_2/E_1=7$ ).



شکل (۱۳): مقایسه توزیع تنش تورق در سطح زیرین چسب برای حالت بهینه شده و بهینه نشده ( $E_2/E_1=7$ ).

همچنین، اختلاف توزیع تنش حالت بهینه نشده در دو سطح، بیش‌تر از حالت قبل شده است. در هر دو حالت (نسبت سه و هفت مدول یانگ لایه‌ها)، لبه سمت چپ سطح فوقانی نقطه بحرانی طراحی است. افزایش مدول یانگ یکی از چسب شونده‌ها (در اینجا پایینی)، منجر به برهم خوردن توزیع تنش در سطح تماس چسب شونده نرم‌تر (در

Structures. Vol. 7, No. 1, 137-145, 2020.

11. Wang, S., Liang, W., Duan, L., Li, G., and Cui, J. "Effects of Loading Rates on Mechanical Property and Failure Behavior of Single Lap Adhesive Joints with Carbon Fiber Reinforced Plastics and Aluminum Alloys", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 106, pp. 2569-2581, 2020.
  12. De Miguel, A., Pagani, A., Rizzo, L., Catapano, A., and Panettieri, E. "Accurate Evaluation of 3D Stress Fields in Adhesive Bonded Joints via Higher Order FE Models", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. Vol. 27, No. 4, pp. 333-345, 2020.
  13. Beigrezaee, M., Ayatollahi M., Bahrami, B., and Da Silva, L. "A New Geometry for Improving the Strength of Single Lap Joints Using Adherend Notching Technique", *The Journal of Adhesion*, 2020.
  14. Behera, R. K., Parida, S. K., and Das, R. R. "3-D Interfacial Stress Analysis of Adhesively Bonded Curved laminated FRP Composite Single Lap Joint", *Materials Today: Proceeding*, 2020.
  15. Zhao, B., Lu, Z. H., and Lu, Y. N. "Closed-form Solutions for Elastic Stress-Strain Analysis in Unbalanced Adhesive Single Lap Joints Considering Adherend Deformations and Bond Thickness", *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Vol. 31, No. 6, pp. 434-445, 2011.
  16. Cheng, S., Chen, D., and Shi, Y. "Analysis of Adhesive Bonded Joints with Nonidentical Adherends", *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 117, No. 3, pp. 605-623, 1991.
  17. Seeley, T. D. "The Wisdom of the Hive: the Social Physiology of Honey Bee Colonies", Harvard University Press, Los Angeles, United States, 2009.
  18. Camazine, S. "Self-organization in Biological Systems", Princeton University Press, United States, 2003.
  19. Kannan, B., and Kramer, S. N. "An Augmented Lagrange Multiplier Based Method for Mixed Integer Discrete Continuous Optimization and its Applications to Mechanical Design", *Journal of Mechanical Design*. Vol. 116, No. 2, pp. 405-411, 1994.
  20. Pham, D., Ghanbarzadeh, A., Otri, S., and Koç, E. "Optimal Design of Mechanical Components Using the Bees Algorithm", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. Vol. 223, No. 5, pp. 1051-1056, 2009.
- چسب شونده بالایی، پایین بودن مدول یانگ آن نسبت به چسب شونده دیگر است که با افزایش ضخامت این لایه، تنش تورق بحرانی کاهش می‌یابد.
- ۶- مراجع**
1. Lee, J., Bae, D., Chung, W., Kim, K., Lee, J., and Cho, Y. "Effects of Annealing on the Mechanical and Interface Properties of Stainless Steel/Aluminum/Copper Clad-Metal Sheets", *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 187, pp. 546-549, 2007.
  2. Li, L., Nagai, K., and Yin, F. "Progress in Cold Roll Bonding of Metals", *Science and Technology of Advanced Materials*. Vol. 9, No. 2, pp. 023001, 2008.
  3. Manesh, H. D., and Shahabi, H. S. "Effective Parameters on Bonding Strength of Roll Bonded Al/St/Al Multilayer Strips", *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 476, No. 1-2, pp. 292-299, 2009.
  4. Shishehsaz, M., and Yaghoubi, S. "The Effect of Fiber Breakage on Transient Stress Distribution in a Single-lap Joint Composite Material", *Journal of Solid Mechanics*. Vol. 7, No. 4, pp. 442-457, 2015.
  5. Goland, M. "The Stresses in Cemented Joints", *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 17, pp. 66-72, 1944.
  6. Zhao, B., and Lu, Z. H. "A Two-dimensional Approach of Single Lap Adhesive Bonded Joints", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. Vol. 16, No. 2, pp. 130-159, 2009.
  7. Bavi, O., Bavi, N., and Shishesaz, M. "Geometrical Optimization of the Overlap in Mixed Adhesive Lap Joints", *The Journal of Adhesion*. Vol. 89, No. 12, pp. 948-972, 2013.
  8. Shishehsaz, M., Moradi, S., and Yaghoubi, S. "Transient Stress Analysis in Adhesive Single Lap Joints of a Composite Material Due to Fiber Breakage", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 4, No. 4, pp. 113-126, 2015. (In Persian)
  9. Shahbazi Karami, J., Malekzadeh Fard, K., and Ahmadi, M. "Analytical and Finite Element Calculation of Interlayer Shear Stress in Adhesive Joint of Composites", *Journal of Aerospace Mechanics*, Vol. 13, No. 1, 2017. (In Persian)
  10. Selahi, E. "Semi Analytical Transient Dynamic Analysis of Composite Adhesive Single Lap Joints", *Mechanics of Advanced Composite*

