

پاسخ گذاری توزیع تنش برشی در اتصال چسبی تک لبه کامپوزیتی ناشی از شکسته شدن الیاف

محمد شیشه‌ساز^۱ و سعید یعقوبی^{۲*}

چکیده

در این پژوهش، توزیع تنش برشی گذرای ایجاد شده در اثر شکسته شدن الیاف در ماتریس و چسب موجود در اتصال چسبی بررسی شده است. تنش گذرا، پاسخ دینامیکی سیستم در اثر ایجاد ناپیوستگی در الیاف، از لحظه گسسته شدن تا لحظه رسیدن به حالت تعادل می‌باشد. به منظور بررسی این رفتار، معادله‌های حاکم بر حرکت الیاف در اتصال چسبی با ابعاد محدود در حضور گسستگی استخراج شده و تاثیر تعداد الیاف شکسته شده بر توزیع تنش برشی گذرای سازه مرکب بررسی شده است. برای استخراج معادله‌های جابه‌جایی الیاف، از مدل شیرلگ و برای حل معادله‌های، از روش تفاضل محدود صریح استفاده شده است. در ادامه، تاثیر تغییر جنس الیاف و ضخامت لایه چسبی بر توزیع تنش نیز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد الیاف گسسته شده، ضریب تمرکز تنش و در نتیجه تنش برشی در سازه مرکب افزایش می‌یابد. افزون بر این، مقدار تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب با افزایش مدول الاستیسیته الیاف کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که بیشینه تنش برشی در اتصال با الیاف از جنس شیشه ($E = 74 \text{ GPa}$) و گرافیت ($E = 130 \text{ GPa}$)، به ترتیب برای ماتریس ۰/۸۶۱ و ۰/۴۶۳ و برای چسب ۳/۱۹۲ و ۲/۴۰۹ مگا پاسکال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مواد مرکب، الیاف، اتصال چسبی، تنش برشی، تنش گذرا.

۱- استاد گروه مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینای همدان.

*- نویسنده مسئول مقاله: yaghoubisaeed@ymail.com

پیشگفتار

ماده مرکب^۱، بیان‌گر ترکیب دست‌کم دو ماده متفاوت در مقیاس ماکروسکوپی جهت بدست آمدن ماده جدید می‌باشد. این مواد، از قرار گرفتن یک یا تعداد بیش‌تری فاز ناپیوسته (فیبر^۲) درون یک فاز پیوسته (ماتریس^۳) بدست می‌آیند. الیاف (فیبرها) می‌بایست استحکام کششی بسیار بالایی را دارا باشد و به بیان دیگر، بخش اعظم نیرو به وسیله الیاف تحمل شود [۱]. با توجه به کاربرد گسترده اتصالات چسبی^۴ مواد مرکب در صنایع گوناگون، مطالعه رفتار این مواد، بویژه در رویارویی با نقایصی مانند سوراخ و ترک از اهمیت بالایی برخوردار است.

در یک سازه از جنس مواد مرکب، هنگامی که ترک یا هرگونه ناپیوستگی در فیبر ایجاد می‌شود، بارهایی که باید به وسیله این فیبر تحمل گردد، از راه ماتریس به فیبر سالم مجاور انتقال می‌یابد که این امر تمرکز تنش^۵ در اطراف ناپیوستگی را به‌همراه خواهد داشت. ندل^۶ و همکاران [۲]، ضریب تمرکز تنش در نزدیکی یک فیبر شکسته شده در یک ماده مرکب تک‌جهت کربن-اپوکسی^۷ را بررسی کردند. آنالیزهای مقارن‌محور آن‌ها نشان داد که ضریب تمرکز تنش برای تمام حالت‌ها در فیبر مجاور، کم‌تر از عدد ۱/۱۰۴ پیش‌بینی شده به وسیله هاچپس^۸ می‌باشد. رجیبی و همکاران [۳]، اثرات تمرکز تنش در اتصالات چسبی تک‌لبه مواد مرکب را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۹ بررسی کردند. نتایج ناشی از این مدل‌سازی نشان دادند که تغییرات مهم تنش‌ها در ضخامت لایه چسب و نزدیک به انتهای طول اتصال بوجود می‌آید. وانگ^{۱۰} و همکاران [۴]، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و روش تفاضل محدود، توزیع تنش-کرنش در اطراف لبه‌های انتهایی روی هم افتاده شده در یک اتصال تک‌لبه از جنس مواد مرکب را مورد بررسی قرار دادند.

نتایج پژوهش نشان داد، هم‌پوشانی قابل قبولی بین نتایج المان محدود و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. بی‌لرگیل^{۱۱} و همکاران [۵]، آنالیز عددی و آزمایشگاهی بر روی اتصالات‌های مرکب تک‌لبه را انجام دادند که پژوهش‌های آن‌ها در مورد دو نوع اتصال صورت گرفت. نوع نخست همان حالت عادی و سنتی اتصال تک‌لبه بدون چسبندگی میانی بوده است و در نوع دوم، میله‌های الیافی نیز در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان دادند که الیاف، استحکام نهایی و دقت زمانی آسیب دیدن اتصالات را بهبود بخشیده است و این نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی هم‌پوشانی قابل قبولی دارند. چالیتا^{۱۲} و همکاران [۶]، مدل تحلیلی اتصالات‌های دولبه را برای پاسخ به نیروهای هارمونیک ارائه کردند. مدل در نظر گرفته شده، بر پایه مدل بهبود یافته شیرلگ^{۱۳} می‌باشد و آن‌ها، حالت ساده و بهبود یافته شیرلگ را با مدل المان محدود مقایسه نمودند. نتایج بدست آمده نشان دادند که مدل شیرلگ بهبود یافته نسبت به مدل‌های دیگر، به مدل المان محدود نزدیک‌تر است. موسوی‌تبار [۷]، اتصال تک‌لبه مرکبی را که در لبه تحت کشش قرار گرفته است، بررسی کرد. در این کار، افزون بر تنش برشی ایجاد شده در لایه چسبی، توزیع بار محوری در تک‌لایه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل انجام شده در این پژوهش بر اساس تئوری شیرلگ و شیرلگ اصلاح شده می‌باشد و در نهایت، مقادیر استخراج شده از حل با مقادیر بدست آمده از نرم‌افزار عددی انسیس مقایسه شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که در مواد مرکبی که مدول الاستیسیته ماتریس پایین‌تر است، مقادیر بدست آمده با حل عددی هم‌پوشانی مناسبی دارد، ولی در حالتی که مدول ماتریس بالا باشد، تئوری شیرلگ اصلاح شده جواب‌های دقیق‌تری نسبت به تئوری شیرلگ می‌دهد. دانیالی [۸]، مقادیر ضریب تمرکز تنش برای اتصالات‌های چسبی یک‌طرفه دو تک‌لایه و دو چندلایه در حضور ترک را محاسبه نمود. نتایج نشان دادند که وجود ترک، بیش‌ترین تمرکز تنش برشی در لایه چسبی را در همسایگی میانه لبه‌های ترک و بیش‌ترین

1- Composite

2- Fiber

3- Matrix

4- Adhesive Joints

5- Stress concentration

6- Nedele

7- Carbon-Epoxy

8- Hedgepeth

9- ABAQUS

10- Wang

11- Beylgeril

12- Challita

13- Shear-Lag

اتصال چسبی یک سوپه می‌باشد. برای این‌کار، تاثیر شکستگی تعداد متفاوت الیاف، تغییر جنس الیاف، تغییر طول ناحیه چسبی، تغییر ضخامت لایه چسبی، تغییر عرض ماتریس و تغییر محل محاسبه تنش برشی ایجاد شده در چسب، بر رفتار اتصال چسبی بررسی شده است.

مبانی نظری توزیع تنش گذرا در اتصال چسبی

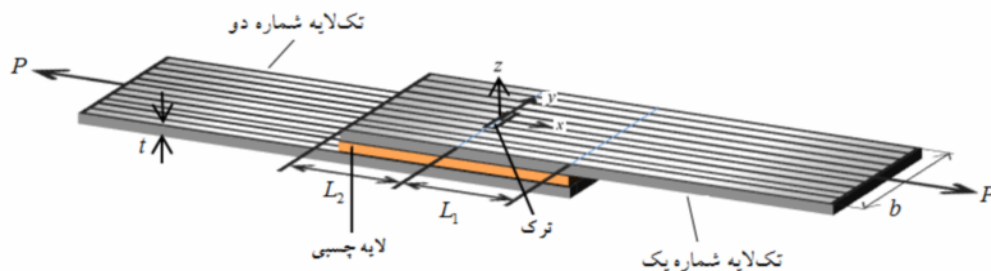
در اتصال چسبی تک‌لبه تحت کشش، دو تک‌لایه به‌وسیله یک لایه چسبی به هم اتصال پیدا می‌کند و بار کششی اعمال شده بر لبه‌ها از نوع استاتیکی می‌باشد. از آن‌جا که این بار اعمال شده از دو سمت در یک راستا قرار ندارد، تنش خمشی ناشی از این ناهم‌راستایی ایجاد می‌شود که در این پژوهش، از این خمش صرف‌نظر شده است [۴ و ۸]. در شکل ۱، یک اتصال تک‌لبه از جنس مواد مرکب مشاهده می‌شود که در آن، دو تک‌لایه به وسیله لایه چسبی به هم متصل شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۱ مشخص است، گسستگی در ناحیه چسبی یکی از تک‌لایه‌ها و در تک‌لایه شماره یک ایجاد شده است. در شکل ۲، نمای تغییر شکل یافته دو بعدی اتصال چسبی نشان داده شده است. با استفاده از تعریف تنش برشی، رابطه (۱) برای تنش برشی اعمال شده بر الیاف از طرف لایه چسبی استخراج می‌گردد.

$$\tau_{zx} = G \cdot (\gamma_{zx}) = G \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = G \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = G \cdot \left(\frac{u_1 - u_2}{\eta} \right) \quad (1)$$

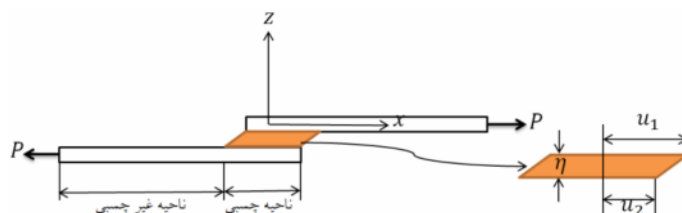
تمرکز تنش کششی در فیبر را در نوک ترک بوجود می‌آورد.

اگر در یک اتصال از جنس مواد مرکب، یک یا تعدادی از الیاف شکسته شود، پس از زمان خاصی اتصال به‌حالت تعادل می‌رسد. از لحظه گسسته شدن الیاف تا پیش از لحظه ایجاد تعادل در آن، توزیع تنش گذرای در سازه مورد نظر ایجاد می‌شود. هاجپس [۹]، برای بدست آوردن ضریب تمرکز تنش استاتیکی و دینامیکی در یک تک‌لایه با ابعاد نامحدود از جنس ماده مرکب، روابطی را بر اساس تئوری شیرلگ استخراج کرد. در ادامه از حلی مشابه حل استاتیکی برای حالت دینامیکی استفاده نمود، ولی به‌علت پیچیدگی حل نتوانست معادله‌های را برای بیش‌تر از سه فیبر شکسته شده حل نماید. میرشکاری [۱۰]، توزیع تنش گذرا در انواعی از مواد مرکب تحت تاثیر ترک را بدست آورد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد فیبر شکسته شده، ضریب تمرکز تنش در ماده مرکب نیز افزایش می‌یابد.

تا کنون، پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تنش گذرا، مربوط به تک‌لایه مرکب و دارای ابعاد نامحدود می‌باشد. از آن‌جایی که در این پژوهش‌ها طول نامحدود بوده، فرض بر آن است که ترک یا گسستگی الیاف در مرکز ورق رخ می‌دهد و تنها ضریب تمرکز تنش و تنش برشی ایجاد شده در ماتریس بررسی شده است. هدف از این پژوهش، بررسی توزیع تنش برشی گذرای ایجاد شده بر اثر شکستگی الیاف در تک‌لایه شماره یک موجود در



شکل ۱- اتصال مواد مرکب تک‌لبه در حضور لایه چسبی.



شکل ۲- تصویر اتصال چسبی در صفحه $x-z$ و مدل تغییر شکل یافته چسب.

می باشد [۸]. در شکل ۳، نمودار جسم آزاد المان فیبر شماره n و ماتریس بین فیبر شماره n و $n-1$ در ناحیه چسبی تک لایه شماره یک و دو آورده شده است. گفتنی است که در شکل ۳، d_f ، d_m ، τ_{zx} و τ'_{zx} به ترتیب ضخامت فیبر، ضخامت ماتریس و تنش برشی وارد شده به الیاف و ماتریس از سمت لایه چسبی می باشند.

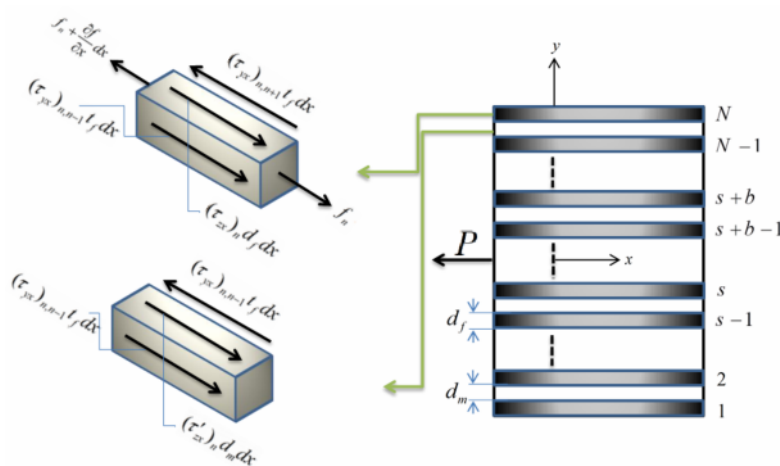
تنش برشی اعمال شده از سمت چسب، باعث اعمال یک نیروی برشی بر ماتریس می شود. به دلیل این که با خطی فرض نمودن تغییر مکان در ماتریس، تنش برشی τ_{yx} در آن ثابت می شود، لذا این نیرو به صورت مساوی بین دو فیبر متصل به ماتریس تقسیم شده است. در رابطه (۲)، چگونگی انتقال این نیروی برشی بیان شده است.

در جایی که G مدول برشی لایه چسبی، η ضخامت لایه چسبی، w تغییر مکان الیاف در راستای محور z ، u_1 تغییر مکان محوری در تک لایه شماره یک و u_2 تغییر مکان محوری در تک لایه شماره دو می باشد.

با توجه به این که مقادیر جابه جایی در راستای y و z در مقابل مقادیر جابه جایی در راستای x ناچیز می باشند، لذا در این رابطه از تغییرات جابه جایی نقاط در راستای z ، نسبت به x صرف نظر شده و تغییر مکان در جهت ضخامت لایه چسبی به صورت خطی در نظر گرفته شده است [۵ و ۸].

استخراج معادله های حاکم بر ناحیه چسبی

هدف از این بخش، استخراج معادله های دیفرانسیل جابه جایی الیاف موجود در تک لایه شماره یک و دو



شکل ۳- نمودار جسم آزاد تک لایه در ناحیه چسبی الف- تک لایه شماره یک، ب- تک لایه شماره دو.

راستای x برای الیاف ناحیه چسبی تک‌لایه شماره یک را می‌توان به صورت رابطه (۴) بیان کرد

$$\sum f_x = m \cdot dx \cdot \ddot{u} \Rightarrow f_n + \frac{\partial f_n}{\partial x} \cdot dx + (\tau_{yx})_{n+1,n} \times \quad (4)$$

$t_f \cdot dx - f_n - F_n - (\tau_{yx})_{n,n-1} \cdot t_f \cdot dx = m \cdot dx \cdot \ddot{u}_n$
در رابطه (۴)، m ، F_n و t_f جرم بر واحد طول الیاف، نیروی معادل وارد شده از سمت لایه چسبی به فیبر شماره n و ضخامت فیبر در راستای محور z می‌باشد و $(\tau_{yx})_{n+1,n}$ ، تنش برشی اعمال شده از سمت ماتریسی است که بین فیبر شماره $n+1$ و n قرار دارد.

تنش برشی اعمال شده بر الیاف از سوی ماتریس، با در نظر گرفتن تغییر مکان خطی در آن و نیروی کششی موجود در الیاف با جابه‌جایی محوری آن، به ترتیب از رابطه‌های (۵) و (۶) بدست می‌آید.

$$\tau_{yx} = G_m \cdot (\gamma_{yx}) = G_m \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = G_m \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5)$$

$$f_n = \sigma_n \cdot A_n = E_n \cdot \varepsilon_n \cdot A_n = E_n \cdot A_n \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

با توجه به این‌که تغییر مکان در ماتریس خطی فرض شده است، تنش برشی اعمال شده از سوی ماتریسی که بین فیبر شماره $n+1$ و n وجود دارد، از رابطه (۷) استخراج می‌گردد.

$$(\tau_{yx})_{n+1,n} = \frac{G_m}{d_m} \cdot (u_{n+1} - u_n) \quad (7)$$

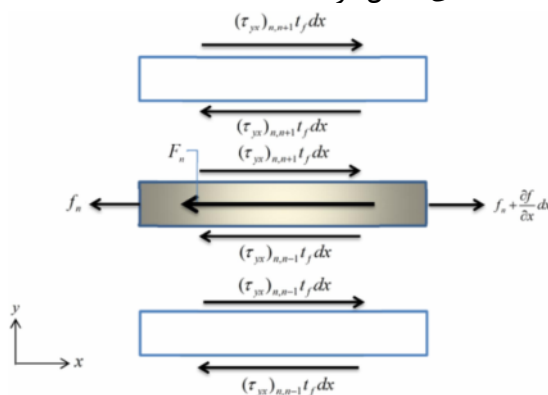
با استفاده از رابطه‌های (۱)، (۳)، (۴) و (۶)، رابطه (۴) (که بیان‌گر معادله‌های تعادل الیاف در نواحی چسبی تک‌لایه شماره یک می‌باشد) برحسب جابه‌جایی‌های الیاف به صورت رابطه (۸) بازنویسی می‌شود.

$$(F_1)_n = \left[\frac{1}{2}(\tau'_{zx})_n + \frac{1}{2}(\tau'_{zx})_{n-1} \right] \cdot d_m \cdot dx = \frac{G}{\eta} \cdot \left[\frac{(u'_{n-1} + u'_n)}{2} - \frac{(v'_n + v'_{n-1})}{2} \right] \cdot d_m \cdot dx = \frac{G}{\eta} \cdot \left[\frac{1}{2} \left(\frac{(u_n + u_{n-1})}{2} + \frac{(u_n + u_{n+1})}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{(v_n + v_{n-1})}{2} + \frac{(v_n + v_{n+1})}{2} \right) \right] \cdot d_m \cdot dx = \frac{1}{2} \left[(\tau_{zx})_n + \frac{1}{2}(\tau_{zx})_{n-1} + \frac{1}{2}(\tau_{zx})_{n+1} \right] \cdot d_m \cdot dx$$

در جایی‌که $(F_1)_n$ ، معرف نیروی انتقال یافته از ماتریس به فیبر است و u_n ، v_n ، u'_n و v'_n به ترتیب جابه‌جایی الیاف و ماتریس شماره n در تک‌لایه شماره یک و دو می‌باشد. در روابط بدست آمده، تغییرات جابه‌جایی ماتریس در راستای x ، نسبت به راستای y خطی فرض شده است. با توجه به این‌که تنش برشی ناشی از لایه چسبی در اتصال با فیبر نیرویی برابر $(\tau_{zx})_n \cdot d_f \cdot dx$ به آن وارد می‌کند، لذا نیروی معادل وارد شده از سوی چسب بر فیبر n ام را می‌توان از مجموع این نیرو و نیروهای انتقال یافته به صورت رابطه (۳) بدست آورد.

$$F_n = (\tau_{zx})_n \cdot d_f \cdot dx + (F_1)_n = (\tau_{zx})_n \cdot (d_f + \frac{1}{2}d_m) \cdot dx + \frac{1}{4}(\tau_{zx})_{n-1} \cdot d_m \cdot dx + \frac{1}{4}(\tau_{zx})_{n+1} \cdot d_m \cdot dx \quad (3)$$

با اعمال تغییرات مورد نظر در نیروی اعمال شده به فیبر و ماتریس، نیروی برشی اعمال شده از سمت چسب از روی ماتریس‌ها برداشته می‌شود و در نهایت، حالت دوبعدی دیاگرام جسم آزاد فیبر و ماتریس به صورت شکل ۴ بدست می‌آید. با توجه به شکل ۴، معادله‌های تعادل در



شکل ۴- نمودار جسم آزاد فیبر و ماتریس در ناحیه چسبی تک‌لایه شماره یک پس از انتقال نیرو از ماتریس به فیبر.

همزمان حل شوند. تعداد معادله های بدست آمده برای ناحیه چسبی برابر $2N$ می باشد.

بی بعد سازی معادله های حاکم بر نواحی چسبی

در بی بعد سازی معادله های دیفرانسیل جابه جایی مربوط به ناحیه چسبی، از یک سری پارامترهای بدون بعد استفاده شده که در رابطه های (۱۰) تا (۱۸) معرفی شده است [۸].

$$\xi = \frac{x}{\lambda} \tag{10}$$

$$\tau = \frac{t}{T} \tag{11}$$

$$T = \sqrt{\frac{m}{E_f \cdot A_f}} \cdot \lambda \tag{12}$$

$$F_n = \frac{f}{p} \tag{13}$$

$$\phi_1 = \frac{\lambda^2 \cdot G_m \cdot t_f}{E_f \cdot A_f \cdot d_m} \tag{14}$$

$$\phi_2 = \frac{\lambda^2 \cdot G \cdot d_f}{E_f \cdot A_f \cdot \eta} \tag{15}$$

$$\phi_3 = \frac{\lambda^2 \cdot G \cdot d_m}{4E_f \cdot A_f \cdot \eta} \tag{16}$$

$$\phi_4 = \frac{\lambda^2 \cdot G}{E_f \cdot A_f \cdot \eta} (d_f + 0.5d_m) \tag{17}$$

$$S_{xy} = \frac{E_f \cdot A_f \cdot d_m}{G \cdot p \cdot \lambda} \cdot \tau_{xy} \tag{18}$$

درجایی که ξ ، τ ، λ و T به ترتیب بیان گر مختصه بدون بعد مکانی در جهت الیاف، مختصه بدون بعد زمانی، طول مشخصه و زمان بی بعد شده می باشد. حالت بسته بی بعد شده معادله های حاکم بر ناحیه چسبی به صورت رابطه (۱۹) می باشد.

$$E \cdot W'' - L \cdot W = M \cdot \ddot{W} \tag{19}$$

در جایی که بردار W ، W'' و \ddot{W} به ترتیب به صورت رابطه (۲۰) تا (۲۲) تعریف می شوند.

$$W = \{U_1, U_2, \dots, U_N, V_1, V_2, \dots, V_N\}_{2N \times 1} \tag{20}$$

$$W'' = \{U''_1, U''_2, \dots, U''_N, V''_1, V''_2, \dots, V''_N\}_{2N \times 1} \tag{21}$$

$$\ddot{W} = \{\ddot{U}_1, \ddot{U}_2, \dots, \ddot{U}_N, \ddot{V}_1, \ddot{V}_2, \dots, \ddot{V}_N\}_{2N \times 1} \tag{22}$$

$$\begin{aligned} & E_n \cdot A_n \cdot \left(\frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2}\right) + \frac{G_m \cdot t_f}{d_m} \cdot (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) + \\ & \frac{G \cdot (d_f + 0.5d_m)}{\eta} \cdot (v_n - u_n) + \frac{1}{4} \frac{G \cdot (d_m)}{\eta} \cdot (v_{n-1} - u_{n-1}) + \\ & \frac{1}{4} \frac{G \cdot (d_m)}{\eta} \cdot (v_{n+1} - u_{n+1}) = m \cdot \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2}, 2 \leq n \leq N - 1 \\ & E_1 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}\right) + \frac{G_m \cdot t_f}{d_m} \cdot (u_2 - u_1) + \frac{G \cdot d_f}{\eta} \cdot (v_1 - u_1) + \\ & \frac{1}{2} \frac{G}{\eta} \cdot \left(\frac{v_2 + v_1}{2} - \frac{u_2 + u_1}{2}\right) \cdot d_m = m \cdot \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \\ & E_N \cdot A_N \cdot \left(\frac{\partial^2 u_N}{\partial x^2}\right) + \frac{G_m \cdot t_f}{d_m} \cdot (u_{N-1} - u_N) + \frac{G \cdot d_f}{\eta} \cdot (v_N - \\ & u_N) + \frac{1}{2} \frac{G}{\eta} \cdot \left(\frac{v_N + v_{N-1}}{2} - \frac{u_N + u_{N-1}}{2}\right) \cdot d_m = m \cdot \frac{\partial^2 u_N}{\partial t^2} \end{aligned} \tag{A}$$

از آن جایی که دو فیبر لایه آزاد در مجاورت یک ماتریس قرار دارند، لذا معادله دیفرانسیل حاکم بر آن دو، با بقیه فیبرهای موجود در تک لایه متفاوت می باشد. در رابطه (۸)، u نشان دهنده جابه جایی در راستای x برای الیاف موجود در تک لایه شماره یک و v نشان دهنده جابه جایی در راستای x برای الیاف موجود در تک لایه شماره دو می باشد. با روندی مشابه بخش پیش، معادله های تعادل برای تک لایه شماره دو به صورت رابطه (۹) استخراج می گردد.

$$\begin{aligned} & E_n \cdot A_n \cdot \left(\frac{\partial^2 v_n}{\partial x^2}\right) + \frac{G_m \cdot t_f}{d_m} \cdot (v_{n+1} - 2v_n + v_{n-1}) - \\ & \frac{G \cdot (0.5d_m + d_f)}{\eta} \cdot (v_n - u_n) - \frac{1}{4} \frac{G \cdot d_m}{\eta} \cdot (v_{n-1} - \\ & u_{n-1}) - \frac{1}{4} \frac{G \cdot d_m}{\eta} \cdot (v_{n+1} - u_{n+1}) = m \cdot \frac{\partial^2 v_n}{\partial t^2}, 2 \leq n \leq N - 1 \\ & E_1 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2}\right) + \frac{G_m \cdot t_f}{d_m} \cdot (v_2 - v_1) - \frac{G \cdot d_f}{\eta} \cdot (v_1 - u_1) + \\ & \frac{1}{2} \frac{G}{\eta} \cdot \left(\frac{u_2 + u_1}{2} - \frac{v_2 + v_1}{2}\right) \cdot d_m = m \cdot \frac{\partial^2 v_1}{\partial t^2} \\ & E_N \cdot A_N \cdot \left(\frac{\partial^2 v_N}{\partial x^2}\right) + \frac{G_m \cdot t_f}{d_m} \cdot (v_{N-1} - v_N) - \\ & \frac{G \cdot d_f}{\eta} \cdot (u_N - v_N) + \frac{1}{2} \frac{G}{\eta} \cdot \left(\frac{u_N + u_{N-1}}{2} - \right. \\ & \left. \frac{v_N + v_{N-1}}{2}\right) \cdot d_m = m \cdot \frac{\partial^2 v_N}{\partial t^2} \end{aligned} \tag{9}$$

در نواحی چسبی، به علت حضور تنش برشی ناشی از چسب، معادله های دیفرانسیل تعادل الیاف در دو تک لایه شماره یک و دو به هم وابسته می باشد و باید به صورت

(۲۶)

$$L' = \begin{bmatrix} \phi_1 & -\phi_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\phi_1 & 2\phi_1 & -\phi_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\phi_1 & 2\phi_1 & -\phi_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -\phi_1 & 2\phi_1 & -\phi_1 & 0 \\ \vdots & 0 & \dots & 0 & -\phi_1 & 2\phi_1 & -\phi_1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\phi_1 & \phi_1 \end{bmatrix}_{N \times N}$$

شرایط اولیه و شرایط مرزی

شرایط اولیه موجود در اتصال چسبی، شامل دو مرحله پیش از گسستگی و لحظه گسستگی الیاف می‌باشد. شرایط اولیه در مرحله پیش از گسستگی به گونه‌ای است که بار در تمام فیبرها برابر P (بار کششی اعمال شده بر هر فیبر دور از گسستگی است) بوده و حالت بی‌بعد شده این شرط اولیه به صورت رابطه (۲۷) بیان می‌شود.

$$P_n(\xi, 0) = 1 \quad (27)$$

شرط اولیه بعدی، لحظه گسسته شدن الیاف است که در این لحظه، هر فیبر در حالت سکون قرار دارد و سرعت لحظه‌ای آن به صورت رابطه (۲۸) برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{\partial U_n}{\partial \tau}(\xi, 0) = 0 \quad (28)$$

شرایط مرزی، مربوط به لحظه پس از گسسته شدن الیاف است که برای الیاف سالم و شکسته شده دو شرط کاملاً مجزا برقرار می‌باشد. در الیاف گسسته شده، شرایط مرزی به گونه‌ای است که نیروی اعمال شده بر آن‌ها در محل گسستگی برابر صفر می‌باشد و به صورت رابطه (۲۹) بیان می‌شود.

$$(s \leq n \leq s + b - 1) P_n(0, \tau) = 0 \quad (29)$$

در رابطه (۲۹)، گسستگی از فیبر شماره s شروع شده و تعداد الیاف گسسته شده برابر b می‌باشد. در الیاف سالم، شرایط متفاوت است. با توجه به آن‌که بار بی‌بعد شده در لبه سمت راست برابر یک و در لبه سمت چپ برابر صفر می‌باشد، با استفاده از فرم تفاضل پسرودر لبه اعمال بار و فرم تفاضل پیشرو در لبه آزاد، جابه‌جایی اولیه الیاف سالم در نقطه‌ای هم‌طول با محل گسستگی، بدست می‌آید.

ماتریس‌های M و E موجود در رابطه (۱۹)

ماتریس‌های واحد به ابعاد $2N \times 2N$ می‌باشند. با توجه به الگوریتم متفاوت الیاف گوشه با بقیه الیاف، با نوشتن سه جمله نخست برای هر تک‌لایه، ماتریس L به صورت رابطه (۲۳) بدست می‌آید.

$$L = \begin{Bmatrix} L_1 & L_2 \\ L_3 & L_4 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

$$L_1 = L_4 = \begin{bmatrix} \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 & -\phi_1 + \phi_3 & 0 & \dots & 0 \\ -\phi_1 + \phi_3 & 2\phi_1 + \phi_4 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 2\phi_1 + \phi_4 & -\phi_1 + \phi_3 \\ 0 & \dots & 0 & -\phi_1 + \phi_3 & \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (23-b)$$

$$L_2 = L_3 = \begin{bmatrix} -\phi_2 - \phi_3 & -\phi_3 & 0 & \dots & 0 \\ -\phi_3 & -\phi_4 & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & -\phi_4 & -\phi_3 \\ 0 & \dots & 0 & -\phi_3 & -\phi_2 - \phi_3 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (23-c)$$

در جایی که L_1 تا L_4 هر کدام ماتریس $N \times N$ می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

استخراج معادله های حاکم بر نواحی غیر چسبی

در نواحی غیر چسبی، تنش برشی ناشی از چسب وجود ندارد و از آن جایی که این تنش برشی جابه‌جایی الیاف تک‌لایه شماره یک و دو را به هم مرتبط می‌سازد، لذا در این ناحیه، حل معادله های دیفرانسیل جابه‌جایی دو تک‌لایه از هم مستقل می‌باشد. با روندی مشابه ناحیه چسبی، فرم بسته و بی‌بعد شده معادله های تعادل تک‌لایه شماره یک و دو، به صورت به ترتیب رابطه‌های (۲۴) و (۲۵) آورده شده است.

$$E' \cdot U'' - L' \cdot U = M' \cdot \ddot{U} \quad (24)$$

$$E' \cdot V'' - L' \cdot V = M' \cdot \ddot{V} \quad (25)$$

در جایی که ماتریس‌های E' و M' ، ماتریس‌های واحد به ابعاد $N \times N$ می‌باشند. با استفاده از پارامترهای بی‌بعد معرفی شده، ماتریس L' از رابطه (۲۶) بدست می‌آید.

با استفاده از شرایط اولیه و شرایط مرزی، مقدار جابه‌جایی الیاف در گام مکانی نخست از روابط (۳۳) و (۳۴) بدست می‌آید.

$$W_n^{1,j+1} = -\frac{(\Delta\tau)^2}{M_{n,n}} \sum_{k=1}^{2N} L_{n,k} \cdot W_k^{1,j} + 2(1 - \left(\frac{\Delta\tau}{\Delta\xi}\right)^2 \cdot \left(\frac{E_{n,n}}{M_{n,n}}\right)) \cdot W_n^{1,j} + \left(\frac{\Delta\tau}{\Delta\xi}\right)^2 \cdot \left(\frac{E_{n,n}}{M_{n,n}}\right) \times (W_n^{2,j} + W_n^{0,j}) - W_n^{1,j-1} \quad (33)$$

$n > s + b - 1$ یا $(n < s \quad (1 \leq j \leq S_i))$

در جایی که S_i ، تعداد گام‌های زمانی می‌باشد. با استفاده از رابطه‌های (۳۱) و (۳۲)، مقادیر جابه‌جایی در دو مرحله زمانی نخست بدست می‌آید. برای محاسبه مقادیر جابه‌جایی از مرحله زمانی سوم به بعد، اگر $i = 1$ باشد، از رابطه‌های (۳۳) و (۳۴) و در غیر این صورت، مقادیر جابه‌جایی الیاف از رابطه (۳۰) بدست می‌آید. بردارهای جابه‌جایی ناحیه غیر چسبی تک‌لایه شماره یک و دو نیز مشابه روند ناحیه چسبی استخراج می‌شود.

محاسبه ضریب تمرکز تنش و تنش برشی

تمرکز تنش در مواد مرکب، به‌صورت نسبت بار در نخستین فیبر سالم پس از فیبرهای گسسته شده در محل ایجاد ناپیوستگی ($P_{f_n+b_r}^{(1,j)}$)، به بار در همان فیبر و در فاصله‌ای دور از محل ناپیوستگی (در حالت بی‌بعد شده برابر یک می‌باشد) تعریف می‌شود و فرم بی‌بعد شده آن به‌صورت رابطه (۳۵) بیان می‌گردد [۱۰].

$$K_r = P_{f_n+b_r}^{(1,j)} = \frac{\partial U_{f_n+b_r}^{(1,j)}}{\partial \xi} = \frac{U_{f_n+b_r}^{(2,j)} - U_{f_n+b_r}^{(1,j)}}{\Delta\xi} \quad (35)$$

در رابطه (۳۵)، اندیس $f_n + b_r$ بیان‌گر شماره فیبر مورد نظر می‌باشد.

فرم بی‌بعد شده تنش برشی در ماتریسی که الیاف بالا و پایین آن سالم است و پیش از الیاف گسسته شده قرار دارد، از رابطه (۳۶) محاسبه می‌شود.

$$S_{xy} = U_{f_n-1}^{(2,j)} - U_{f_n-2}^{(2,j)} \quad (36)$$

برای محاسبه تنش برشی ایجاد شده در چسب، از نقاط هم‌طول دو فیبر نظیر در تک‌لایه شماره یک و دو به‌صورت رابطه (۳۷) استفاده می‌شود.

حل معادله های دیفرانسیل حاکم

همان‌گونه که از رابطه‌های (۱۹)، (۲۴) و (۲۵) مشخص است، معادله دیفرانسیل جابه‌جایی الیاف از مرتبه دوم با دو متغیر می‌باشد. برای حل معادله دیفرانسیل بدست آمده، از روش تفاضل محدود صریح استفاده می‌شود [۱۱]. با توجه به آن که مقادیر جابه‌جایی افزون بر مکان، به زمان نیز وابسته می‌باشد، در حالت کلی بردار جابه‌جایی الیاف به‌صورت $u_n^{i,j}$ بیان شده است که در این عبارت، زیرنویس n بیان‌گر شماره فیبر و بالانویس‌های i و j به ترتیب بیان‌گر شماره قسمت‌های گام مکانی و گام زمانی می‌باشد [۱۲].

در ناحیه چسبی، از آن‌جا که جابه‌جایی دو تک‌لایه به هم وابسته می‌باشد، لذا معادله های دیفرانسیل باید به‌صورت هم‌زمان حل شود. برای حل معادله های دیفرانسیل، ناحیه چسبی به دو بخش مجزای سمت راست و سمت چپ ناپیوستگی تقسیم شده است که در نهایت، با اعمال شرایط مرزی موجود در محل گسسته شدن الیاف، جابه‌جایی ناحیه چسبی دو تک‌لایه در قالب بردار W بدست می‌آید. با در نظر گرفتن فرم تفاضل مرکزی برای مشتق دوم مکانی و زمانی، رابطه (۱۹) به‌صورت رابطه (۳۰) برای محاسبه مقدار جابه‌جایی در مقطع زمانی جدید بیان می‌شود.

$$W_n^{i,j+1} = -\frac{(\Delta\tau)^2}{M_{n,n}} \sum_{k=1}^{2N} L_{n,k} \cdot W_k^{i,j} + 2(1 - \left(\frac{\Delta\tau}{\Delta\xi}\right)^2 \cdot \left(\frac{E_{n,n}}{M_{n,n}}\right)) \cdot W_n^{i,j} + \left(\frac{\Delta\tau}{\Delta\xi}\right)^2 \cdot \left(\frac{E_{n,n}}{M_{n,n}}\right) \times (W_n^{i+1,j} + W_n^{i-1,j}) - W_n^{i,j-1} \quad (30)$$

برای محاسبه $W_n^{i,j}$ و $W_n^{i,j-1}$ ، از شرایط اولیه و برای محاسبه $W_n^{i-1,j}$ ، از شرایط مرزی استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن این شرایط، بردار جابه‌جایی در گام مکانی نخست و دوم به ترتیب به‌صورت رابطه‌های (۳۱) و (۳۲) بدست می‌آید.

$$W_n^{2,1} = W_n^{1,1} + \Delta\xi, \dots, W_n^{2N,1} = W_n^{2N-1,1} + \Delta\xi \quad 1 \leq n \leq 2N \quad (31)$$

$$W_n^{i,2} = W_n^{i,1} \quad 1 \leq n \leq 2N \quad (32)$$

جدول ۳- نتایج مربوط به تک لایه با گسستگی در میان ورق.

| تعداد فیبر شکسته شده | ضریب تنش دینامیکی | مقدار همگرا شده | ضریب تنش استاتیکی [۹] | مقدار اختلاف روش |
|----------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|------------------|
| ۱ | ۱/۵۵ | ۱/۳۴ | ۱/۳۳ | ۰/۱۷۵ |
| ۳ | ۲/۰۶ | ۱/۸۲ | ۱/۸۳ | ۰/۱۵۴ |
| ۵ | ۲/۴۰ | ۲/۲۱ | ۲/۲۲ | ۰/۱۴۵ |
| ۷ | ۲/۷۷ | ۲/۵۳ | ۲/۵۵ | ۰/۱۷۸ |
| ۹ | ۳/۰۸ | ۲/۸۲ | ۲/۸۴ | ۰/۱۷۱ |

همان گونه که از جدول ۳ مشخص است، مقادیر ضریب تمرکز تنش همگرا شده به مقدار شایان توجهی با مقادیر ضریب تمرکز تنش استاتیکی استخراج شده از مرجع [۹] هم پوشانی دارد که این نتیجه تاییدی بر صحت روش عددی استفاده شده در این پژوهش می باشد. در شکل ۵، برای نشان دادن دقت حل، زمان بی بعد شده سی واحد در نظر گرفته شده است. از آن جا که در برخی از شکل های رسم شده در بخش های بعد، اختلاف بین نمودارها ناچیز می باشد، لذا برای وضوح بیشتر در سایر نمودارها، زمان بی بعد شده برابر پانزده واحد در نظر گرفته شده است. گفتنی است که در تمام نمودارها، اندیس نشان دهنده مرحله مکانی (i) و مرحله زمانی (j) به ترتیب ۱ و ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است.

یکی از پارامترهای مهم در اتصال های چسبی، تعیین مقادیر تنش برشی می باشد. در شکل ۶، مقادیر تنش برشی بی بعد ایجاد شده در ماتریس به ازای تعداد متفاوت الیاف گسسته شده در مرکز ناحیه چسبی آورده شده است. همان گونه که مشخص است، با افزایش تعداد الیاف گسسته شده، مقادیر تنش برشی ایجاد شده در ماتریس نیز افزایش می یابد. در شکل ۷، مقادیر تنش برشی ایجاد شده در چسب به ازای تعداد متفاوت الیاف شکسته شده در مرکز ناحیه چسبی نشان داده شده است. برای محاسبه تنش برشی در چسب، از جایگذاری مقادیر جدول ۱ و جدول ۲ در رابطه (۳۷) استفاده شده است. همانند تنش برشی ایجاد شده در ماتریس، با افزایش تعداد الیاف گسسته شده، تنش برشی ایجاد شده در چسب نیز افزایش می یابد.

$$S'_{xy} = U_{f_n}^{(2,j)} - V_{f_n}^{(2,j)} \quad (37)$$

نتایج

محاسبه ضریب تمرکز تنش و تنش برشی در اتصال چسبی، نیازمند مقادیر خواص ماده مرکب و چسب است که در این پژوهش، ماده مرکب مورد نظر دارای فیبری از جنس شیشه و ماتریسی از جنس اپوکسی است و از مقادیر جدول ۱ برای استخراج نمودارها استفاده شده است. در مدل سازی تک لایه و اتصال، هندسه ای در نظر گرفته شده که مشخصات آن در جدول ۲ آمده است.

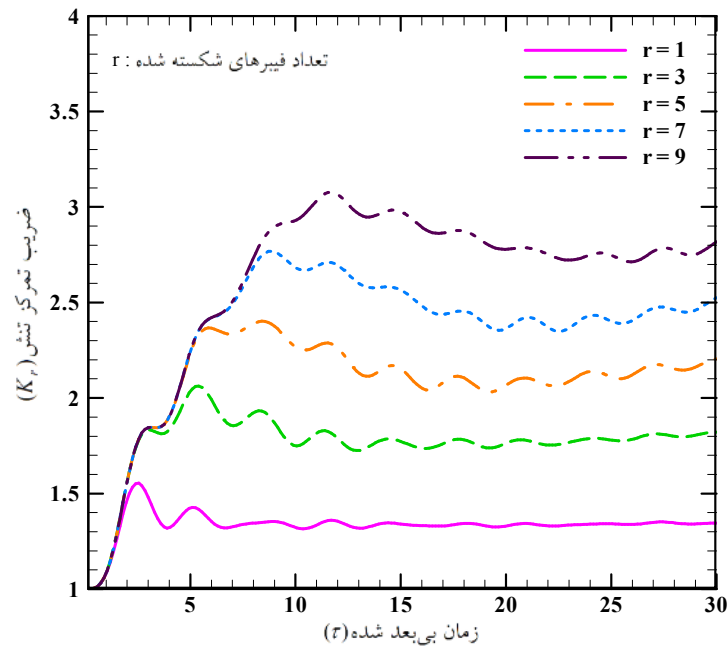
جدول ۱- خواص مکانیکی ماده مرکب و چسب استفاده شده [۴].

| نوع ماده | ماده | مدول الاستیسیته (GPa) |
|----------|---------------|-----------------------|
| فیبر | شیشه | ۷۴ |
| ماتریس | اپوکسی | ۱/۲۸ |
| چسب | فنولیک اپوکسی | ۱/۱۱ |

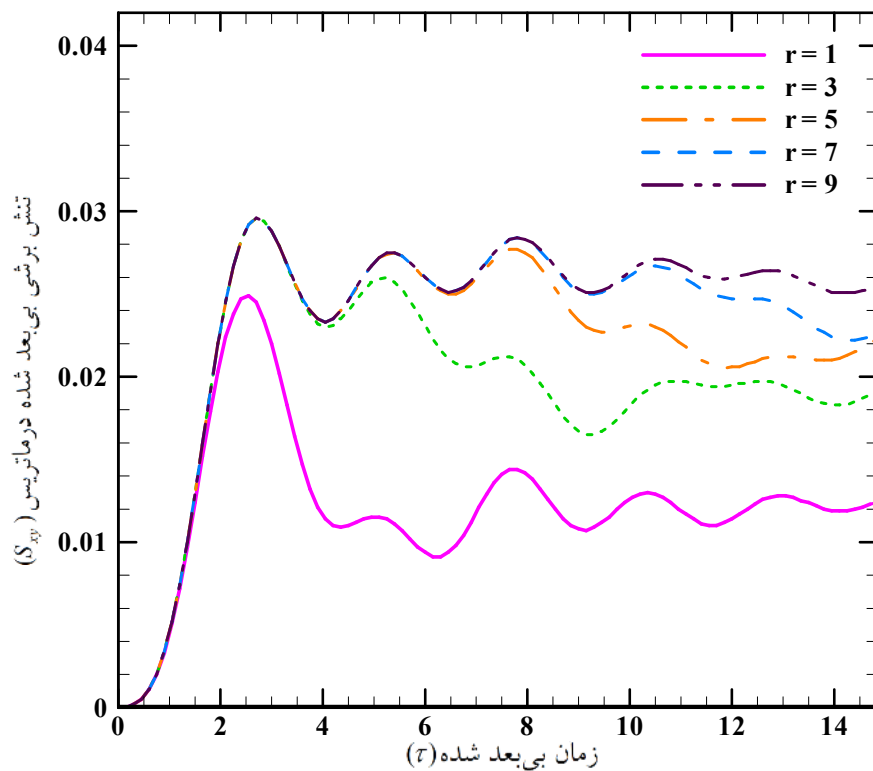
جدول ۲- مشخصات هندسی ماده مرکب مورد نظر

| مشخصات | اندازه |
|---------------------------------|--------------|
| طول هر ورق | ۲۵۰ میلی متر |
| طول ناحیه هم پوشانی | ۵۰ میلی متر |
| ضخامت لایه | ۰/۱ میلی متر |
| ضخامت چسب | ۰/۱ میلی متر |
| عرض فیبر و ماتریس | ۰/۱ میلی متر |
| تعداد الیاف موجود در هر تک لایه | ۲۵ عدد |
| بار اعمال شده به هر چسب شونده | ۱۰۰ نیوتن |

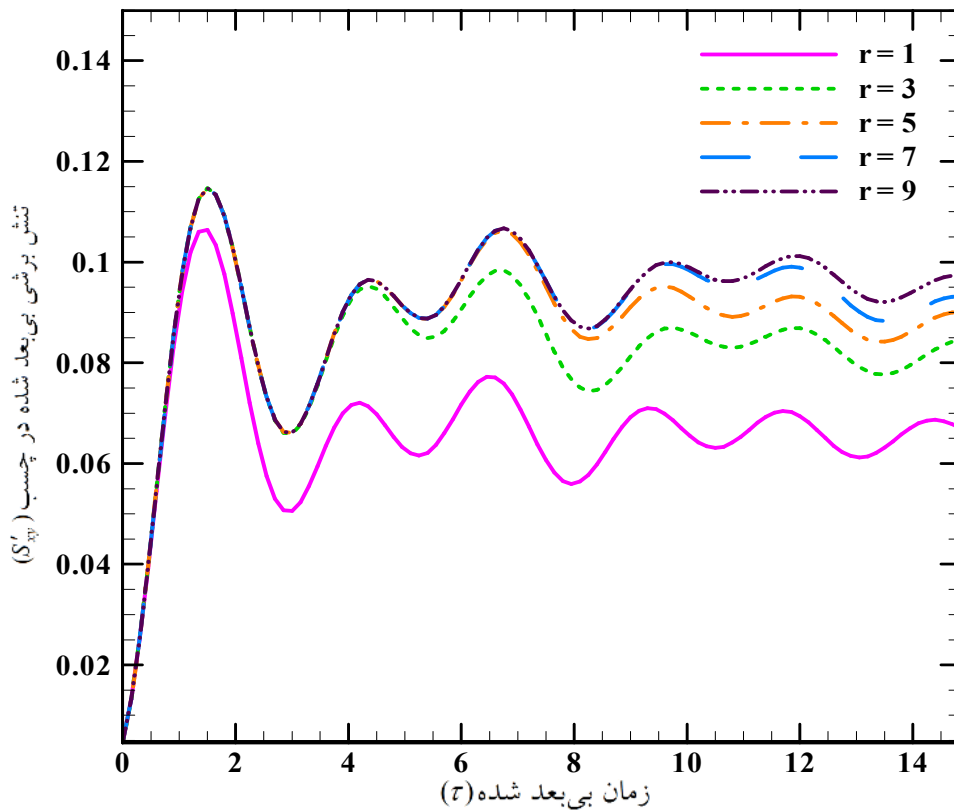
از آن جا که در مرجع [۹]، مقادیر ضریب تمرکز تنش استاتیکی، برای حالتی که گسستگی در وسط یک تک لایه مرکب ایجاد شده وجود دارد، لذا برای صحت روش حل، در ابتدا نتایج مربوط به این حالت بررسی شده است. در شکل ۵، نمودار ضریب تمرکز تنش بر حسب زمان برای حالتی که گسستگی الیاف از وسط تک لایه مرکب شروع شده، ترسیم گردیده است. در جدول ۳، ضریب تمرکز تنش استاتیکی و دینامیکی (بیشینه مقدار ضریب تمرکز تنش) بدست آمده از شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵- نمودار ضریب تمرکز تنش بر حسب زمان در تک لایه، برای حالت گسستگی در میان ورق.



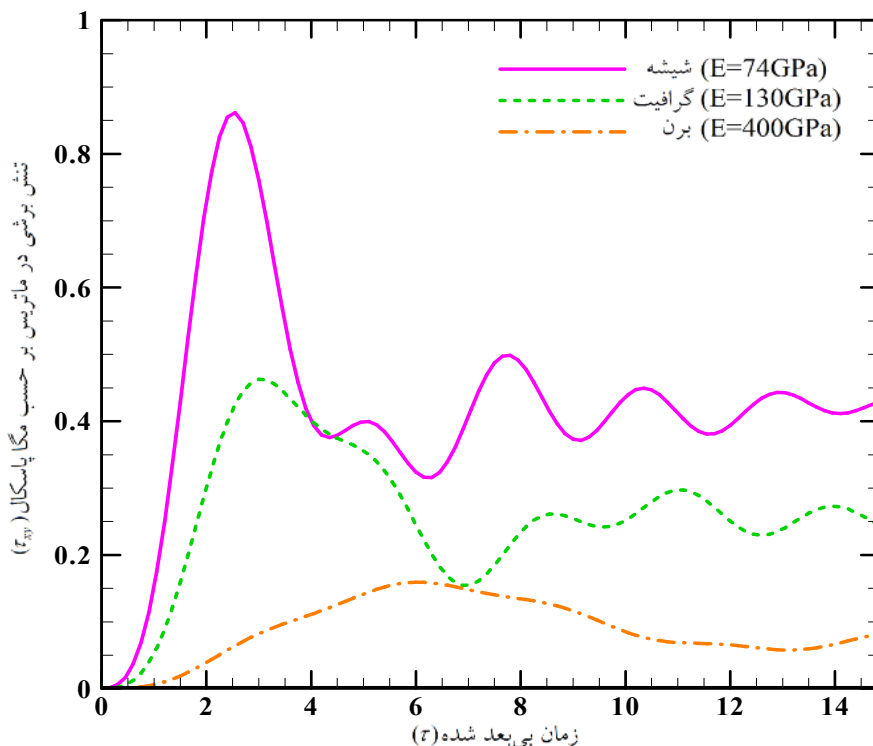
شکل ۶- نمودار تنش برشی ایجاد شده در ماتریس به ازای شکستن تعداد متفاوت الیاف.



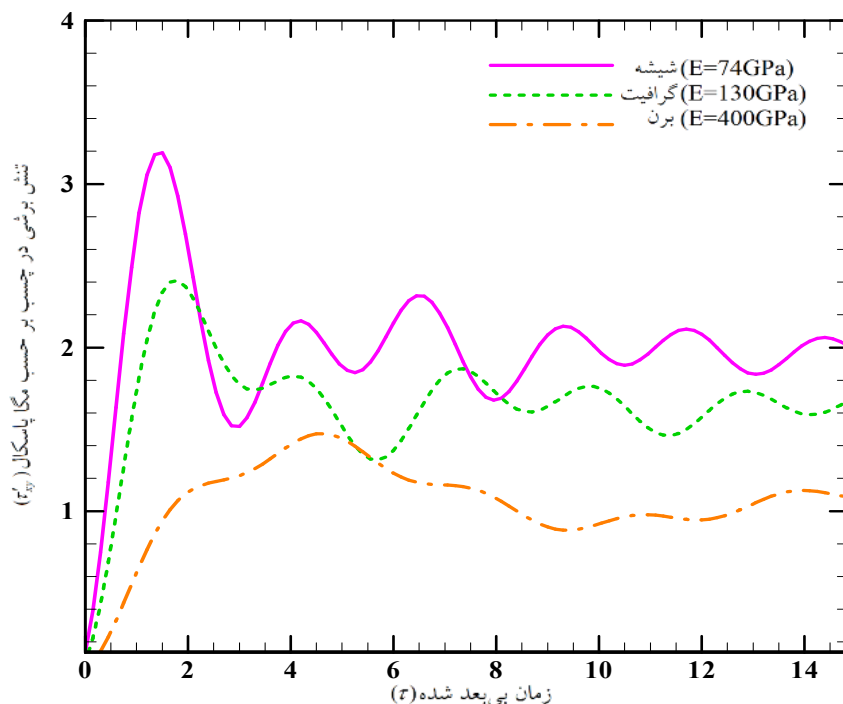
شکل ۷- نمودار تنش برشی ایجاد شده در چسب به ازای شکستن تعداد متفاوت الیاف.

است. در این شکل‌ها، تنش برشی بر حسب زمان برای سه نوع فیبر از جنس شیشه، گرافیت و برن ترسیم شده است.

تاثیر تغییر جنس الیاف، یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب بوده که تاثیرات آن به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده



شکل ۸- نمودار تاثیر تغییر جنس الیاف در تنش برشی بر حسب زمان در ماتریس.



شکل ۹- نمودار تاثیر تغییر جنس الیاف در تنش برشی بر حسب زمان در چسب.

و ۲ استخراج شده است. مقادیر بیشینه تنش برشی به ازای الیاف از جنس شیشه، گرافیت و بر در جدول ۴ آورده شده است. با افزایش مدول الاستیسیته الیاف، مدول الاستیسیته کلی ماده مرکب افزایش پیدا می کند. در اثر

گفتنی است که در همه حالتها، تعداد الیاف شکسته شده یک عدد و محل گسستگی در مرکز ناحیه چسبی و در فیبر شماره سیزده می باشد. نمودار تنش برشی با استفاده از رابطه (۱۸) و مقادیر موجود در جدول های ۱

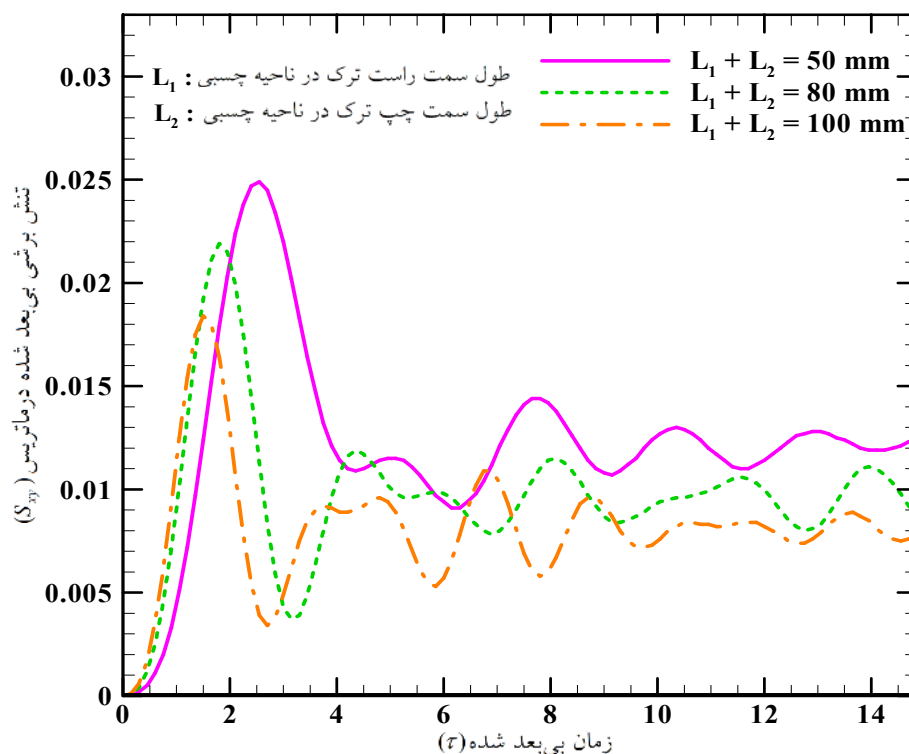
پرداخته شده است. هدف از این بخش، بررسی تاثیر طول ناحیه چسبی بر تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب می‌باشد. برای این کار، نمودار تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب، در حالتی که طول ناحیه چسبی ۵، ۸ و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده، به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

افزایش مدول الاستیسیته ماده مرکب، انتظار رفته که سازه کامپوزیتی استحکام بیش‌تری پیدا کرده و مقادیر تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب و نیز مقدار شوک وارد شده به سازه (بیشینه مقدار تنش برشی) کاهش یابد که مقادیر موجود در جدول ۴ و شکل‌های ۸ و ۹ این موضوع را تایید می‌کند.

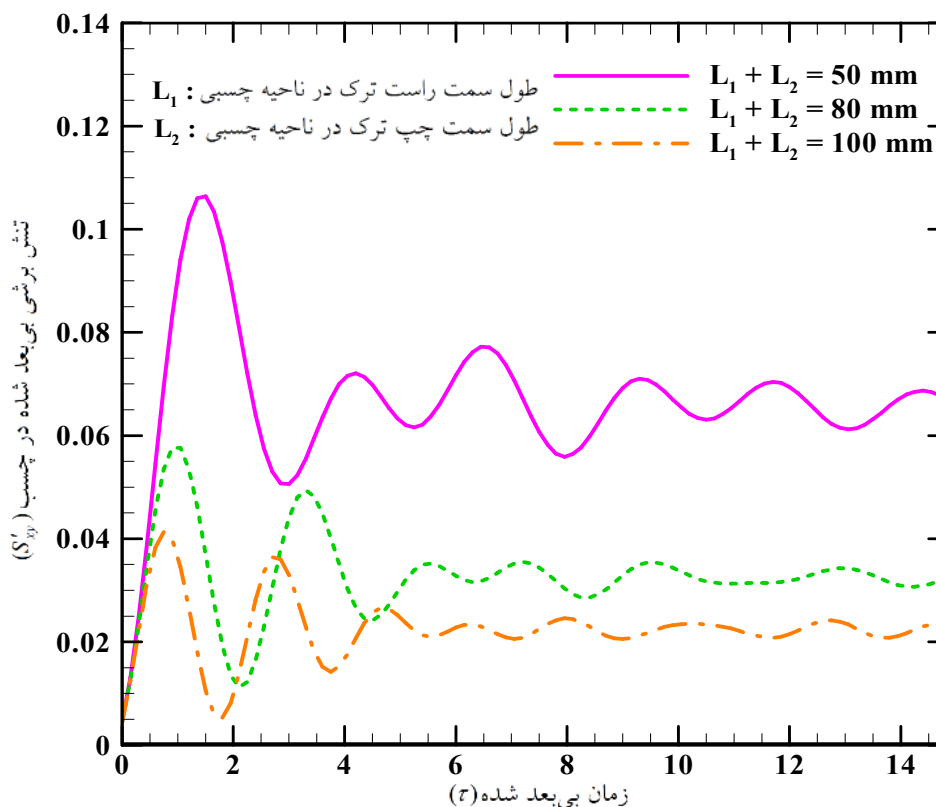
یکی از پارامترهای مهم در توزیع تنش اتصال، تغییر طول ناحیه چسبی می‌باشد که در این بخش، به آن

جدول ۴- مقادیر بیشینه تنش برشی به ازای سه فیبر مورد نظر.

| نوع الیاف | بیشینه تنش برشی در ماتریس (مگا پاسکال) | بیشینه تنش برشی در چسب (مگا پاسکال) |
|-----------|--|-------------------------------------|
| شیشه | ۰/۸۶۲ | ۳/۱۹۲ |
| گرافیت | ۰/۴۶۳ | ۲/۴۰۹ |
| بر | ۰/۱۵۹ | ۱/۴۷۴ |



شکل ۱۰- نمودار تاثیر تغییر طول ناحیه چسبی بر تنش برشی در ماتریس.



شکل ۱۱- نمودار تاثیر تغییر طول ناحیه چسبی بر تنش برشی در چسب.

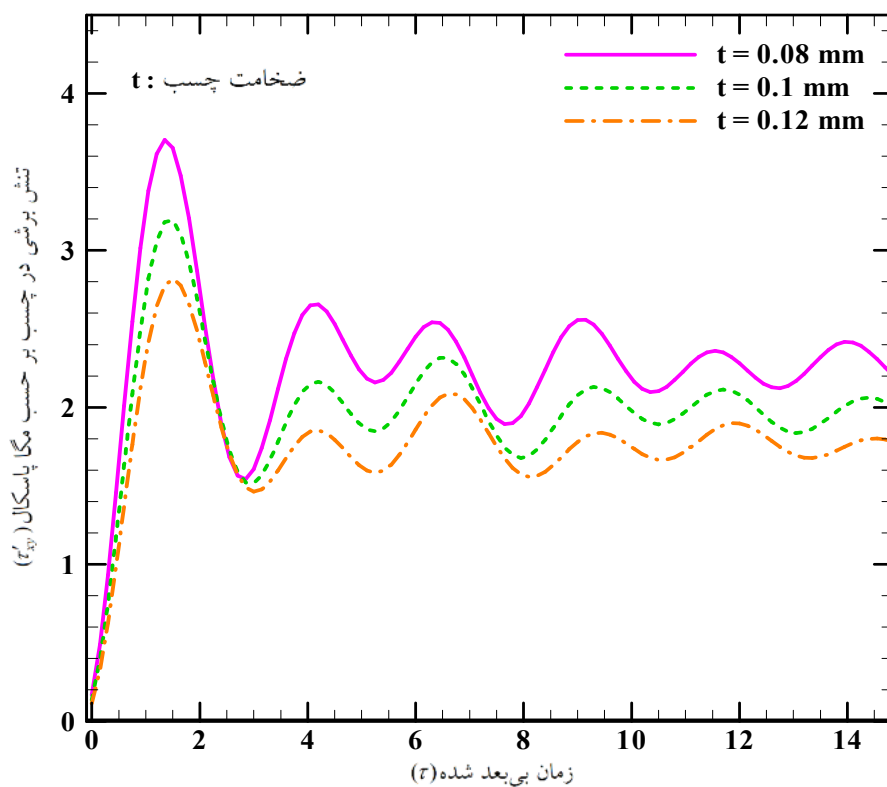
می‌باشد. انتظار می‌رود که با افزایش ضخامت این لایه، مقدار تنش برشی ایجاد شده در چسب کاهش یابد که شکل ۱۲ این تغییرات را نشان می‌دهد.

یکی دیگر از پارامترهای موثر بر تغییر تنش برشی ایجاد شده در مواد مرکب، تغییر فاصله بین الیاف (عرض ماتریس) بوده که در این بخش، تاثیرات آن مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۳ و ۱۴، به ترتیب تاثیر تغییر عرض ماتریس بر نمودار تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب برای حالتی که شروع شکستگی الیاف از فیبر شماره سیزده باشد، نشان داده شده است.

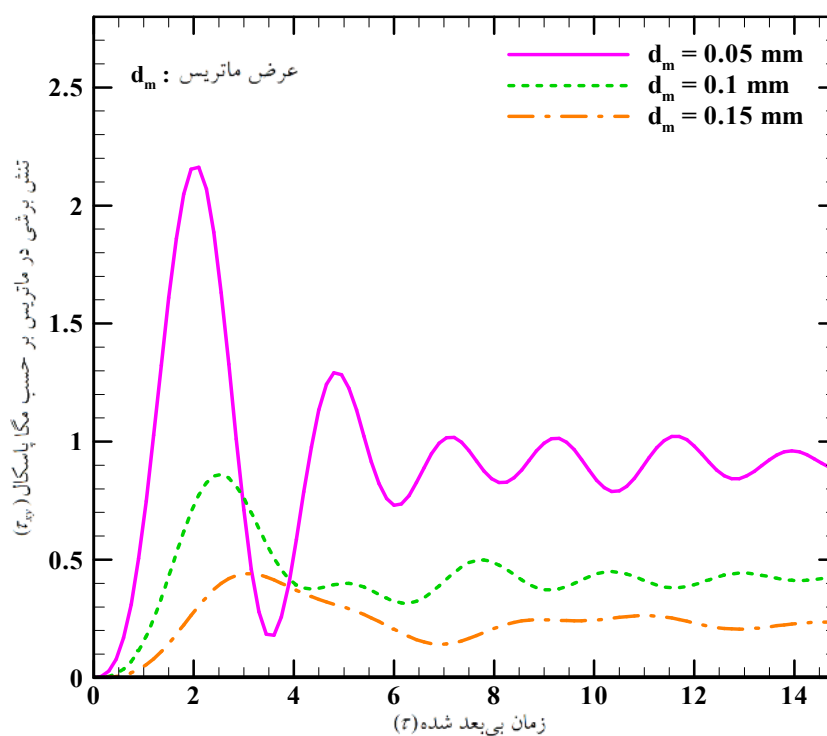
با افزایش ناحیه چسبی، جابه‌جایی الیاف کم‌تر می‌شود و در نتیجه، انتظار می‌رود که ضریب تمرکز تنش و در نتیجه، تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب نیز کاهش یابد. بر این اساس، نتایج بدست آمده از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ منطقی می‌باشد.

گفتنی است که در هر سه حالت، طول گسستگی ثابت در نظر گرفته شده و تعداد الیاف شکسته یک عدد فرض شده است. از آنجایی که با افزایش طول ناحیه چسبی، طول بیش‌تری از الیاف با چسب در ارتباط است، لذا مقدار بیش‌تری از بار اعمال شده به الیاف به وسیله چسب جذب می‌شود و در نتیجه، با افزایش طول ناحیه چسبی، مقدار بار اعمال شده به فیبر، جابه‌جایی و در نتیجه تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب کاهش یافته که نمودارهای استخراج شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ گویای این موضوع می‌باشد.

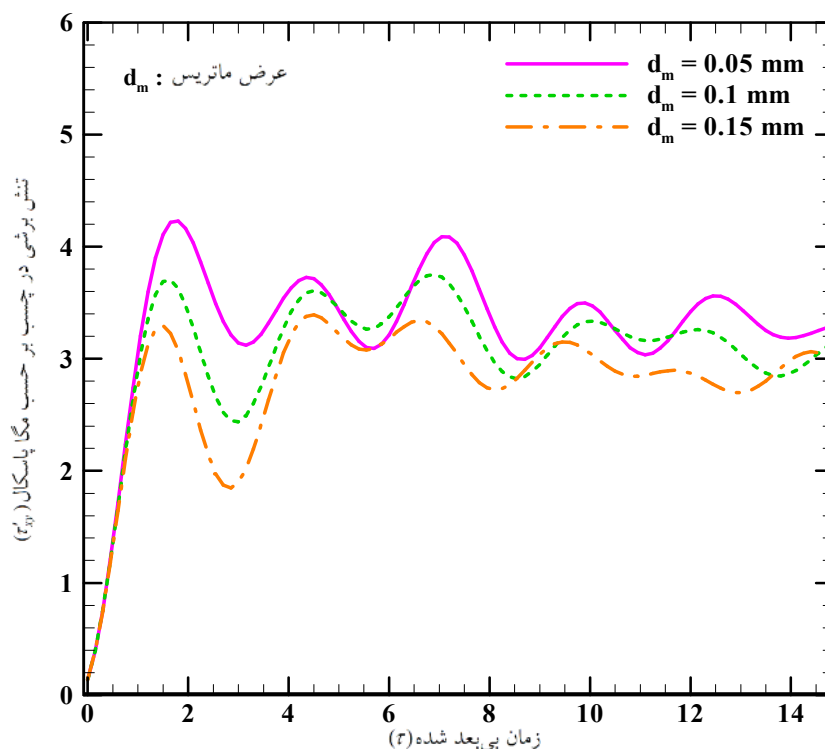
هدف از این بخش، بررسی تاثیر تغییر مقدار ضخامت لایه چسبی در تنش برشی ایجاد شده در چسب می‌باشد. در شکل ۱۲، نمودار تنش برشی بوجود آمده در چسب بر حسب زمان برای سه ضخامت متفاوت لایه چسبی با مقادیر ۰/۰۸، ۰/۱ و ۰/۱۲ میلی‌متر نشان داده شده است. از رابطه (۱) مشخص است که بین مقدار تنش برشی در چسب و ضخامت لایه چسبی رابطه عکس برقرار



شکل ۱۲- نمودار تاثیر تغییر ضخامت لایه چسبی بر تنش برشی ایجاد شده در چسب.



شکل ۱۳- نمودار تاثیر تغییر عرض ماتریس بر تنش برشی ایجاد شده در ماتریس.



شکل ۱۴- نمودار تاثیر تغییر عرض ماتریس بر تنش برشی ایجاد شده در چسب.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، توزیع تنش برشی گذرای ناشی از شکسته شدن الیاف در اتصال چسبی تک‌لبه بررسی شده است. نتایج بدست آمده از این پژوهش دربرگیرنده موردهای زیر است:

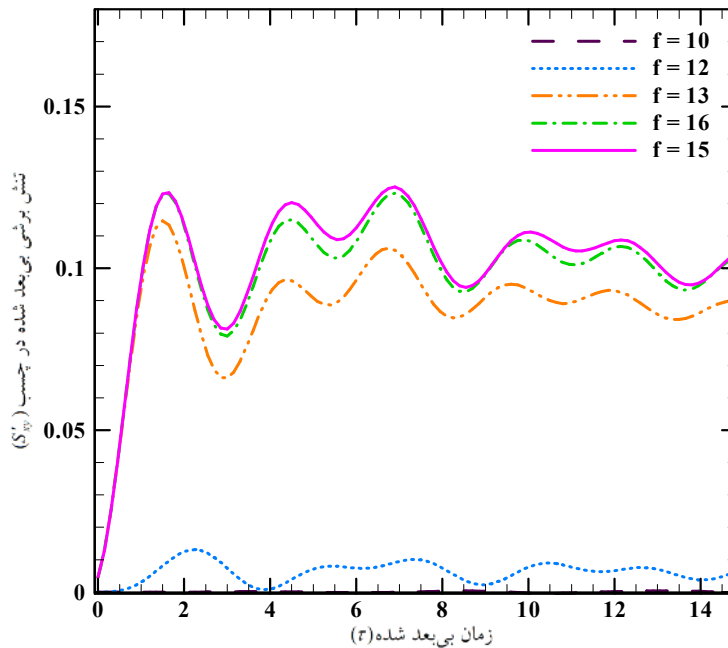
از نمودارهای بدست آمده از بخش نتایج می‌توان دریافت که اثر دینامیکی شکست الیاف بر تمرکز تنش و توزیع تنش برشی ایجاد شده در ماده مرکب قابل ملاحظه است.

- با توجه به حضور چسب در اتصال کامپوزیتی و هم‌چنین، پیوند میان الیاف و ماتریس، مشاهده شده که پس از مدت زمان خاصی، نوسان‌های تنشی از بین رفته و مقادیر تنش به عدد ثابتی همگرا می‌شود.

- جنس الیاف، تاثیر زیادی بر تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب دارد. هر چه مقدار مدول الیاف بیش‌تر شود، مقدار شوک وارده به اتصال چسبی (بیشینه مقدار تنش برشی در ماتریس و چسب) کم‌تر خواهد شد. بیشینه مقدار تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب

در بخش‌های گذشته، برای محاسبه تنش برشی ایجاد شده در چسب، از رابطه (۳۷) استفاده شده است. اکنون هدف از این بخش، بررسی مقادیر تنش برشی ایجاد شده در چسب به‌ازای جابه‌جایی محل محاسبه آن در زیر ترک (محل ناپیوستگی الیاف) و ناحیه دور از ترک می‌باشد. در شکل ۱۵، یک اتصال از جنس مواد مرکب با گسستگی ایجاد شده در مرکز ناحیه چسبی برای پنج فیبر شکسته نشان داده شده است.

شروع گسستگی از فیبر شماره سیزده می‌باشد و f_1 بیان‌گر شماره فیبری از تک‌لایه شماره یک بوده که تنش برشی در زیر آن محاسبه شده است. از نمودارهای بدست آمده از شکل ۱۵ می‌توان دریافت که در ناحیه زیر الیاف دور از ترک (گسستگی الیاف)، مقادیر تنش برشی ایجاد شده در لایه چسبی نسبت به ناحیه زیر الیاف گسسته شده ناچیز می‌باشد. بیش‌ترین مقدار تنش برشی در چسب، در زیر فیبر وسط الیاف شکسته شده (در این مثال فیبر شماره پانزده) ایجاد می‌شود و هر قدر از این فیبر فاصله گرفته شود، مقدار تنش برشی زیر آن نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵- نمودار تاثیر تغییر مکان محاسبه تنش برشی ایجاد شده در چسب.

و ۰/۴۶۳ و برای چسب ۳/۱۹۲ و ۲/۴۰۹ مگا پاسکال می‌باشد.

- با افزایش طول ناحیه چسبی، مقدار بیش‌تری از الیاف با چسب درگیر شده و امکان جابه‌جایی الیاف کم‌تر می‌شود. با کاهش مقادیر جابه‌جایی، تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب نیز کاهش می‌یابد.
- بیش‌ترین مقدار تنش برشی در چسب، در زیر فیبر وسط الیاف شکسته شده ایجاد می‌شود و هر قدر از این فیبر فاصله گرفته شود، مقدار تنش برشی زیر آن نیز کاهش می‌یابد.

References

- ۱- سید محسن محسنی شکیب، "مکانیک سازه‌های مرکب"، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، موسسه چاپ و انتشارات، ۱۳۸۹.
- 2- M. R. Nedele and M. R. Wisnom, "Stress concentration factors Around a Broken Fiber in a Unidirectional Carbon Fiber-Reinforced Epoxy", Institute of Structures and Design, Vol 25, pp. 549-557, 1994.
- ۳- ایرج رجبی، فرهاد رحیمی، کامبیز بخشنده، "اثرات تمرکز تنش در اتصالات چسبی یک‌لبه کامپوزیتی"،

در حضور الیاف از جنس برن با مدول ۴۰۰ گیگا پاسکال، به‌ترتیب ۰/۱۵۹ و ۱/۴۷۴ مگا پاسکال بوده و این در حالی است که در حضور الیاف از جنس شیشه با مدول ۷۴ گیگا پاسکال، مقادیر بیشینه تنش برشی در ماتریس و چسب، به‌ترتیب ۰/۸۶۲ و ۳/۱۹۲ مگا پاسکال می‌باشد.

- با افزایش مدول الاستیسیته الیاف، مدول الاستیسیته کلی ماده مرکب افزایش پیدا می‌کند. در اثر افزایش مدول الاستیسیته ماده مرکب، مقدار تنش برشی ایجاد شده در ماتریس و چسب کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که بیشینه تنش برشی با الیاف از جنس شیشه ($E = 74 \text{ GPa}$) و گرافیت ($E = 130 \text{ GPa}$)، به‌ترتیب برای ماتریس ۰/۸۶۱ و

چهاردهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۸۵.

- 4-Z.Y. Wang, L. Wang, H. Deng and J.W. Tong, "An Investigation on Strain/Stress Distribution Around the Overlap End of Laminated Composite Single-Lap Joints", Composite Structures, Vol 89, pp. 589-595, 2009.
- 5-B. Beylergil, Y. Cunedioğlu and A. Aktas, "Experimental and Numerical Analysis of Single Lap Composite Joints with Inter-Adherend Fibers", Composite Part B, Vol 42, pp. 1885-1896, 2011.

6-G. Challita and R. Othman, "Analytical Model of the Double-Lap Bonded Joints Response to Harmonic Loads", Composite Part B, Vol 42, pp. 1885-1896, 2011.

۷-هاشم موسوی تبار، "تحلیل تنش اتصالات چسبی کامپوزیتی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، شهریور ۱۳۸۸.

۸-مجید دانیالی، "بررسی تمرکز تنش ناشی از وجود ترک در اتصالات مواد مرکب"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، اسفند ۱۳۹۰.

9-J.M.Hedgepeth, "Stress Concentration in a Filamentary Structures", TND-882, 1961.

۱۰-عرفان میرشکاری، "پاسخ گذاری توزیع تنش در چند لایه مرکب سه بعدی تحت ترک"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، اردیبهشت ۱۳۸۸.

11-S. C. Chapra and R. P. Canale, Numerical Method of Engineering, 6rd ed., McGraw-Hill, New York, 2010.

12-D. L. Logan and A First Course in the Finite Element Method, 4rd ed., Thomson, University of Wisconsin-platteville, 2007.