



ارائه مدل تئوری و عددی برای پیش‌بینی سفتی اتصالات چسبی دولبه تحت بارگذاری دینامیکی

علی‌رضا شماعی کاشانی*

دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، شرکت مهندسی و ساخت ژنراتور مینا، کرج، ایران
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۶

چکیده

در تحقیق حاضر با ارائه مدلی تئوری مدول اتصال چسبی دولبه در نرخ‌های کرنش مختلف در بازه نرخ کرنش استاتیک تا 10^5 S^{-1} پیش‌بینی می‌شود. بدین منظور با استفاده از پارامترهای هندسی و مدول الاستیک کششی چسبیده و مدول برشی لایه چسب در دو نرخ کرنش متفاوت، سهم هر یک از اجزا از نرخ کرنش اعمالی محاسبه شده و با محاسبه مدول برشی لایه چسب در سهم نرخ کرنش خود، مدول دینامیکی اتصال چسبی دولبه محاسبه می‌شود. مزیت چنین مدلی، پیش‌بینی رفتار هر نوع اتصال چسبی بدون نیاز به انجام آزمایش با داشتن خواص چسبیده و لایه چسب و ابعاد هندسی اتصال است. در کنار مدل تئوری ارائه شده، مدلی المان محدود با استفاده از محیط نرم‌افزار آباکوس صریح ارائه می‌شود که با استفاده از خواص مکانیکی الاستیک اجزای اتصال و چگالی آن‌ها به‌همراه پارامترهای هندسی اتصال، مدول دینامیکی اتصال چسبی را پیش‌بینی می‌کند. مقایسه نتایج، همخوانی مطلوب نتایج مدل تئوری ارائه شده در این تحقیق و مدل المان محدود را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که هر دو مدل، روند افزایش مدول اتصال چسبی دولبه با افزایش نرخ کرنش را پیش‌بینی کرده و حداکثر اختلاف دو مدل کمتر از نه درصد است.

کلمات کلیدی: اتصال چسبی دولبه؛ نرخ کرنش؛ روش تئوری؛ المان محدود.

A Novel Theoretical and Numerical Model to Predict Stiffness of Double Lap Bonded Joints Under Dynamic Loading

AR. Shamaei-Kashani*

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., MAPNA generator Co., Karaj, Iran.

Abstract

In the present research, the modulus of a double lap bonded joint in the strain rate ranges of 0 to 10^5 S^{-1} is predicted by a theoretical model. In this approach, using geometrical parameters of bonded joint, elastic young modulus of adherends and shear modulus of the adhesive layer at two different strain rates, strain rate sharing of bonded joint's constituents can be calculated. Also, using these data, shear modulus of the adhesive layer at its share of strain rate is calculated; Then, using these data, dynamic modulus of double lap bonded joint can be computed. Calculating stiffness of the double lap bonded joint using geometrical parameters of bonded joint and mechanical parameters of constituents without need to do the test is the advantage of this model. Also, in this manuscript, a finite element model (using Abaqus Explicit) is presented in order to predict dynamic modulus of double lap bonded joint using elastic mechanical properties of bonded joint constituents, their densities and bonded joint geometrical parameters. The two presented models show a similar trend in the prediction of double lap bonded joint's modulus; in a way that, at the two models, bonded joint's modulus is increased by increasing strain rate. The maximum difference between the two models is about nine percent.

Keywords: Double Lap Bonded Joint; Strain Rate; Theoretical Method and Finite Element Method.

۱- مقدمه

استفاده از اتصالات چسبی در سال‌های اخیر پیوسته افزایش یافته است. از دلایل اصلی آن می‌توان به سبکی وزن و قیمت مناسب اتصالات چسبی اشاره کرد. علاوه بر این، اتصالات چسبی می‌تواند جایگزین مناسبی برای اتصالات جوشی در صورت عدم امکان استفاده از جوشکاری باشد. تحقیقات بسیاری برای فهم و اندازه‌گیری استحکام و مدول این دسته از اتصالات تحت بارگذاری استاتیکی انجام شده است؛ اما تحقیقات بسیار کمی به بررسی رفتار مکانیکی این دسته از اتصالات تحت بارگذاری دینامیکی پرداخته‌اند.

بیشتر تحقیقات آزمایشگاهی دینامیکی در زمینه اتصالات چسبی، سعی در اندازه‌گیری استحکام ضربه این دسته از مواد داشته‌اند [۱]. انواع مختلف بارگذاری در کارهای محققان مشاهده می‌شود؛ به‌عنوان مثال ساتو و ایلکامی [۲]، رفتار دینامیکی اتصالات چسبی را تحت بارگذاری کششی مطالعه کردند؛ بیورز و الیس [۳]، رفتار دینامیکی این دسته از اتصالات را تحت بارگذاری برشی بررسی کردند. زاچاری و برگر [۴]، میدان تنش اتصال تک‌لبه را با استفاده از روش فوتوالاستیسیته دینامیکی بررسی کردند. کیسلر و لاتایلا [۵]، برای اولین بار از دستگاه میله فشاری هاپکینسون در بررسی رفتار مکانیکی اتصالات چسبی استفاده کردند؛ دستگاهی که برای بررسی رفتار مکانیکی مواد در نرخ‌های کرنش بسیار بالا کاربرد دارد. چالیتا و همکاران [۶]، با بررسی رفتار اتصالات دولبه تحت بارگذاری فشاری و برشی در بازه نرخ کرنش $0.0001/s^{-1}$ تا $10000/s^{-1}$ مشاهده کردند که کرنش شکست اتصال با افزایش نرخ کرنش کاهش می‌یابد، درحالی‌که استحکام برشی اتصال با افزایش نرخ کرنش ابتدا افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار حداکثر خود، در نرخ‌های کرنش بالاتر، کاهش می‌یابد. کارنیرو و همکاران [۷]، رفتار اتصالات چسبی را تحت بارگذاری ترکیبی کشش و برش به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. با مطالعه کارهای محققان مختلف مشاهده می‌شود که نمونه با شکل‌های هندسی متفاوت و با فرآیند انجام تست مختلف برای بررسی رفتار دینامیکی اتصالات چسبی مورد استفاده قرار گرفته است. در توجیه این مورد می‌توان به نبود استاندارد مناسب آزمایش اتصالات چسبی تحت بارگذاری دینامیکی اشاره کرد. لازم به ذکر است تا به‌حال دو استاندارد برای این منظور

تدوین شده است؛ اما از آنجا که نتایج خروجی آن به صورت مقایسه‌ای است و همچنین نتایج آزمایش با دستگاه میله هاپکینسون فشاری^۱ قابل استفاده در آن‌ها نیست، چندان مورد استفاده قرار نمی‌گیرد [۱].

تحلیل تنش اتصالات چسبی به صورت تئوری موضوع تحقیق، دسته‌ای دیگر از پژوهش‌ها بوده است. آنالیز کلاسیک اتصال چسبی لبه‌ای اولین بار توسط ولکرسن [۸] و سپس گولاند و ریسنر [۹] انجام شده است. ولکرسن فرض کرد که چسب تنها تغییر شکل برشی دارد و چسبنده تنها تحت تغییر شکل کششی است. گولاند و ریسنر دوران در چسبنده را در اتصال تک‌لبه در نظر گرفتند و با استفاده از حل تئوری الاستیسیته تک‌بعدی، توزیع تنش‌های برشی و پوست‌کنی را در اتصال چسبی به‌دست آوردند. در ادامه حل فوق‌گسترش یافت تا تغییر شکل برشی و نرمال چسبنده‌ها را نیز شامل شود [۱۰]. هارت-اسمیت [۱۱]، حل فوق را برای در نظر گرفتن تأثیرات پلاستیسیته در چسب گسترش داده و بروین [۱۲]، حل تحلیلی برای تحلیل رفتار اتصال دولبه ارائه داد. برای پیش‌بینی افت سفتی ناشی از آسیب در چسب در یک اتصال تک‌لبه، اُون و لی-سولیان [۱۳] با استفاده از مجموعه‌ای از فنرهای کششی و برشی که توزیع تنش در هر فنر از رابطه تنش آدامز-پیپات پیروی می‌کرد، مدلی بر مبنای سفتی برای اتصال تک‌لبه توسعه دادند. کومازاوا و کاساهارا [۱۴]، مدلی تئوری برای بررسی تنش‌های برشی و پوست‌کنی در اتصال دولبه با در نظر گرفتن تأثیرات بارهای مکانیکی و حرارتی ارائه دادند. کسننتینی و همکاران [۱۵]، با استفاده از مدلی تئوری و عددی، رفتار هیدرو-ترمو-مکانیکال اتصالات چسبی را مدل کردند. حسونوند و شیشه‌ساز [۱۶]، به‌کمک تئوری مرتبه اول تغییرشکل برشی دوبعدی، تنش ایجادی در اتصالات چسبی را مدل کردند.

استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود، روشی دیگر برای تحلیل رفتار مکانیکی اتصالات چسبی بوده است. به‌دلیل افزایش پیچیدگی هندسه اتصال و نیاز به محاسبات در سه‌بعد، استفاده از این روش روز به روز گسترش یافته است. در روش المان محدود خواص مکانیکی اتصال چسبی برای هر نوع هندسه تحت هر نوع بارگذاری قابل محاسبه است. آنالیز

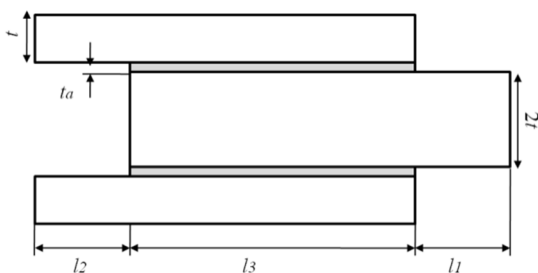
^۱ Split Hopkinson Pressure Bar

اجزای اتصال از نرخ کرنش اعمالی ارائه می‌شود. با استفاده از تنش در بخش‌های مختلف اتصال و سهم نرخ کرنش اجزاء، مدول اتصال کامپوزیتی چسبی تحت بارگذاری دینامیکی محاسبه می‌شود. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس صریح [۲۴]، مدول اتصال محاسبه شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۲- تعریف مسئله

ابتدا مدول اتصال چسبی دولبه تحت بارگذاری کشش داخل صفحه‌ای در حالت استاتیک به صورت تئوری به کمک روش ارائه شده توسط ژیانو و همکاران [23] محاسبه می‌شود. در ادامه رابطه فوق برای حالت دینامیکی گسترش داده می‌شود. در ادامه، نرخ کرنش محاسبه شده و رابطه‌ای برای تقسیم نرخ کرنش بین اجزای اتصال، لایه چسب و چسبنده‌ها، ارائه می‌شود. از سوی دیگر، رابطه‌ای برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته وابسته به نرخ کرنش برای اجزای اتصال ارائه می‌شود. با استفاده از سهم لایه چسب و چسبنده‌ها از نرخ کرنش اعمالی، ابتدا مدول الاستیک لایه چسب و چسبنده‌ها در سهم نرخ کرنش خود محاسبه شده و با قرار دادن مقادیر مدول الاستیک در رابطه مدول اتصال چسبی دولبه، می‌توان مدول اتصال را محاسبه کرد. در انتها با مدل‌سازی المان محدود اتصال چسبی دولبه در نرم‌افزار المان محدود آباکوس صریح، مدول اتصال محاسبه شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شود. شکل ۱ به طور شماتیک اتصال چسبی دولبه را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است، عرض اتصال، b بوده و مدول الاستیسیته چسبنده و مدول برشی چسب نیز به ترتیب E و G است. سایر اطلاعات هندسی در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- شماتیک از اتصال چسبی دولبه

اتصال چسبی تحت بارگذاری ضربه توسط گالبرگر و استیق [۱۷] با در نظر گرفتن سه مدل ساختاری برای لایه چسب با المان محدود صریح انجام شد. ساوا و همکاران [۱۸]، استحکام اتصال چسبی تحت بارگذاری ضربه برشی را با استفاده از دستگاه میله فشاری هاپکینسون و با استفاده از روش اجزای محدود بررسی کردند. چالیتا و همکاران [۱]، با استفاده از اجزای محدود سه‌بعدی، میله فشاری هاپکینسون را روی اتصال چسبی دولبه شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با تمرکز بر تاثیر ماده، هندسه و پارامترهای دینامیکی روی دقت میله فشاری هاپکینسون نشان دادند که روش میله فشاری هاپکینسون، دقت مطلوبی در تخمین مقدار تنش متوسط لایه چسب دارد. با این حال تخمین کرنش متوسط در لایه چسب و حداکثر تنش و کرنش متوسط در لایه چسب چندان مناسب نبود. میگوئل و همکاران [۱۹]، توزیع تنش سه‌بعدی اتصال چسبی را با استفاده از المان محدود از مرتبه بالا محاسبه کردند. استاپلتون و همکاران [۲۰]، با استفاده از المان محدود، مدلی برای طراحی اتصال چسبی با استفاده از تحلیل تنش اتصال ارائه دادند. در این زمینه حیدری و همکاران [۲۱]، خرابی اتصالات چسبی بال هواپیما را با استفاده از المان واسط چسبنده سه‌بعدی مدل کردند.

برای بررسی سفتی اتصال‌های چسبی، بیورز و همکاران [۲۲]، روش‌های مختلفی برای محاسبه سفتی اتصال T-شکل از جنس فولاد کم کربن بررسی کرده و بهترین روش مدل‌سازی سفتی این نوع اتصال را ارائه کردند. ژیانو و همکاران [۲۳]، مدلی تئوری به منظور پیش‌بینی سفتی داخل صفحه اتصال چسبی ارائه کردند. لازم به ذکر است که مدل‌های فوق، گام اول در مدل‌سازی رفتار مکانیکی اتصالات چسبی بوده و برای بررسی شکست و پارامترهای استحکامی اتصال مدل فوق نیاز به گسترش دارد.

هدف کلی این تحقیق، ارائه روشی به منظور مدل‌سازی مدول اتصالات چسبی تحت بارگذاری دینامیکی است. تحقیقات مختلف به بررسی این پارامتر مکانیکی اتصالات چسبی دولبه تحت بارگذاری استاتیکی پرداخته‌اند [۲۲، ۲۳]. در حالی که تاکنون مدول اتصال چسبی تحت بارگذاری دینامیکی بررسی نشده است. برای این منظور در این تحقیق، ابتدا تنش در قسمت‌های مختلف اتصال تحت بارگذاری دینامیکی محاسبه شده، در ادامه روابطی برای محاسبه سهم

۳- تحلیل تئوری اتصال چسبی دولبه

در این قسمت رابطه‌ای برای پیش‌بینی مدول اتصال چسبی دولبه تحت بارگذاری دینامیکی به صورت تئوری ارائه می‌شود. با اعمال نیروی F به مقطع اتصال دولبه، اتصال دچار تغییر شکل می‌شود. این تغییر شکل شامل، چهار قسمت است: تغییر شکل نرمال ناحیه با طول ۱۱، تغییر شکل نرمال ناحیه با طول ۱۲، تغییر شکل نرمال ناحیه با طول ۱۳ و تغییر شکل برشی ناحیه با طول ۱۳. روندنمای مدل تئوری ارائه شده در این تحقیق در شکل ۲ آورده شده است.

مطابق روندنمای فوق با دریافت خواص مکانیکی استاتیکی اجزای اتصال و پارامترهای هندسی اتصال دولبه به همراه نرخ کرنش اعمالی به عنوان ورودی مدل، ابتدا با استفاده از خواص مکانیکی استاتیکی و پارامترهای هندسی رابطه‌ای برای محاسبه مدول اتصال در شرایط استاتیکی ارائه می‌شود. سپس با استفاده از رابطه مدول استاتیکی اتصال و نرخ کرنش اعمالی، سهم هریک از اجزای اتصال شامل، لایه چسب و چسبنده از نرخ کرنش اعمالی محاسبه می‌شود. در ادامه برای محاسبه مدول اتصال در حالت دینامیکی لازم است، رابطه‌ای برای محاسبه مدول الاستیک اجزای سازنده اتصال دولبه وابسته به نرخ کرنش ارائه شود.

با ارائه مدل فوق می‌توان مدول الاستیک لایه چسب یا چسبنده را در هر نرخ کرنش دلخواه محاسبه کرد؛ با داشتن مدول الاستیک دینامیکی اجزای سازنده و رابطه ارائه شده برای مدول اتصال، می‌توان مدول اتصال چسبی دولبه را در هر نرخ کرنش دلخواه محاسبه کرد.

۳-۱- کرنش نرمال نواحی با طول 11، 12، 13

با اعمال نیروی F به پایه میانی اتصال، تغییر شکل طولی این قسمت را می‌توان محاسبه کرد. از آنجا که تنش کششی در طول ۱۱ ثابت است، داریم:

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F}{2bt} \quad (1)$$

و در نتیجه کرنش نرمال از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} = \frac{F}{2btE} \quad (2)$$

تغییر شکل در ناحیه با طول ۱۲ مشابه قبل محاسبه می‌شود، با این تفاوت که نیروی ایجاد کننده تغییر شکل برای هر پایه اتصال با طول ۱۲ نصف نیروی وارد بر اتصال است. بدین ترتیب کرنش نرمال در این ناحیه از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} = \frac{F}{2btE} \quad (3)$$

جابجایی طولی ناحیه همپوشانی ناشی از تغییر شکل برشی چسب و تغییر شکل کششی چسبنده‌ها است. برای ساده‌سازی و از آنجا که در ناحیه همپوشانی اتصال دولبه دوچسبنده وجود دارد، نیروی اعمالی F ، بین این دو تقسیم می‌شود. از آنجا که در اتصال دولبه، در ناحیه با طول ۱۳ تنش در چسبنده از حداکثر مقدار خود تا صفر تغییر می‌کند، فرض می‌شود که توزیعی خطی در این ناحیه برای تنش وجود دارد که مقدار آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

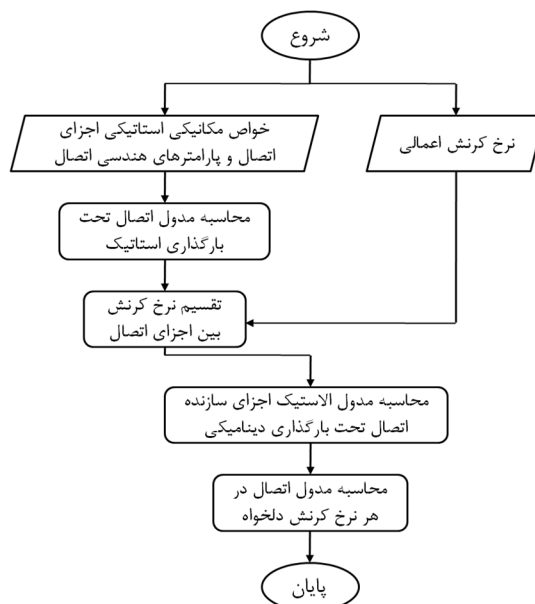
$$F_3 = \frac{F}{2} \quad (4)$$

و در نتیجه کرنش نرمال عبارت می‌شود از:

$$\varepsilon_3 = \frac{F}{2btE} \quad (5)$$

۳-۲- کرنش برشی ناحیه اتصال

در این ناحیه نیروی وارد بر اتصال به طور مساوی بین دو لایه چسب تقسیم می‌شود و تنش برشی در ناحیه اتصال با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:



شکل ۲- روندنمای مدل تحلیلی اتصال چسبی دولبه

کرنش بالاتر از 1 s^{-1} می‌توان نشان داد با تقریب خوبی از رابطه (۱۱) پیروی می‌کند [۲۷]:

$$G(\dot{\varepsilon}) = \begin{cases} G & \dot{\varepsilon} \leq 1 \text{ s}^{-1} \\ G(1 + C \ln \dot{\varepsilon}) & \dot{\varepsilon} > 1 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (11)$$

که در رابطه فوق G مدول برشی استاتیکی پلیمر است و C ثابت مادی رابطه است که با داشتن مدول الاستیک برشی در دو نرخ کرنش متفاوت قابل محاسبه است. با استفاده از رابطه (۱۱) و محاسبه مدول برشی لایه چسب و ثابت در نظر گرفتن مدول الاستیک کششی چسبنده و با داشتن پارامترهای هندسی مسئله، مدول اتصال در هر نرخ کرنش دلخواه قابل محاسبه است.

۳-۴-۱- سهم اجزای اتصال از نرخ کرنش اعمالی به سازه

در بخش قبل رابطه برای محاسبه مدول الاستیک برشی وابسته به نرخ کرنش پلیمر محاسبه شد؛ اما برای محاسبه مقدار مدول برشی لازم است، سهم لایه چسب از نرخ کرنش اعمالی به اتصال مشخص شود.

$$\varepsilon_{\text{adhesive}} = \left(\frac{1}{2bl_3G}\right)F$$

$$\varepsilon_{\text{adherend}} = \varepsilon_t - \varepsilon_{\text{adhesive}} = \left(\frac{5}{4btE}\right)F \quad (12)$$

در حالت کلی مشتق‌گیری از روابط فوق به دلیل وابسته بودن خواص مواد سازنده اتصال، کار ساده‌ای نیست. اگرچه خواص الاستیک اجزای سازنده اتصال وابسته به نرخ کرنش هستند، اما در یک نرخ کرنش خاص ثابت هستند. مشابه چنین استدلالی در تحقیق شکرپه و همکاران [۲۷] برای مواد کامپوزیتی مشاهده می‌شود؛ بنابراین نرخ کرنش اجزای سازنده اتصال مانند ذیل محاسبه می‌شود:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{adhesive}} = \left(\frac{1}{2bl_3G}\right)\dot{F} = \left(\frac{a}{2bl_3G}\right)\dot{\varepsilon}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{adherend}} = \left(\frac{5}{4btE}\right)\dot{F} = \left(\frac{5a}{4btE}\right)\dot{\varepsilon} \quad (13)$$

که پارامتر a با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$a = \frac{4btEl_3G}{5l_3G + 2tE} \quad (14)$$

با محاسبه سهم لایه چسب از نرخ کرنش اعمالی از رابطه (۱۳)، مدول الاستیک برشی دینامیکی چسب در هر نرخ کرنش دلخواه با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه شده، با قرار

$$\tau = \frac{F_3}{A_3} = \frac{F}{2bl_3} \quad (6)$$

در نتیجه کرنش برشی در لایه چسب برابر می‌شود با:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{F}{2bl_3G} \quad (7)$$

۳-۳- محاسبه مدول اتصال تحت بارگذاری استاتیکی

با محاسبه کرنش نرمال و برشی در چسب و چسبنده‌ها، کرنش کل اتصال قابل محاسبه است. از آنجا که کرنش برشی تحت بار کششی یا فشاری تغییر شکل در جهت کرنش نرمال ایجاد می‌کند، کرنش کل اتصال را می‌توان از رابطه (۸) محاسبه کرد:

$$\varepsilon_t = \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \gamma \quad (8)$$

با جایگذاری روابط (۲)، (۳)، (۵) و (۷) در رابطه (۸) داریم:

$$\varepsilon = \left(\frac{5}{4btE} + \frac{1}{2bl_3G}\right)F \quad (9)$$

بدین ترتیب مدول اتصال را می‌توان با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه کرد:

$$E_{\text{bond}} = \frac{4l_3EG}{5l_3G + 2tE} \quad (10)$$

همان‌طور که از رابطه فوق مشاهده می‌شود، سفتی اتصال با افزایش ضخامت چسبنده‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش طول ناحیه اتصال، مدول الاستیسته چسبنده‌ها و مدول برشی لایه چسب مقدار آن افزایش می‌یابد.

۳-۴- محاسبه مدول اتصال تحت بارگذاری دینامیکی

از رابطه (۱۰) مشاهده می‌شود، برای محاسبه مدول اتصال چسبی دولبه، علاوه بر پارامترهای هندسی، مدول الاستیسته چسبنده و مدول برشی چسب مورد نیاز است. رفتار الاستیک پلیمرها از جمله اپوکسی SA80 به شدت وابسته به نرخ کرنش است [۲۵]؛ درحالی‌که برخی مراجع از تاثیر نرخ کرنش بر رفتار الاستیک فلزات صرف‌نظر کرده‌اند [۲۶]؛ بنابراین برای محاسبه مدول اتصال تحت شرایط بارگذاری دینامیکی لازم است، تغییرات مدول الاستیک برشی اپوکسی SA 80 در نظر گرفته شود. نشان داده شده است، مدول الاستیسته پلیمرها در نرخ کرنش کمتر از 1 s^{-1} تقریباً ثابت و برابر مدول الاستیک استاتیکی است؛ درحالی‌که در نرخ

جدول ۱- خواص مکانیکی اجزای سازنده اتصال چسبی دولبه [۶]

ماده	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
SA 80	۱۲۳۰	۲/۵	۰/۴
S235	۷۸۰۰	۲۰۰	۰/۳

جدول ۲- ابعاد هندسی اجزای سازنده اتصال چسبی دولبه (میلی‌متر) [۶]

ماده	l1	l2	l3	t	ta	b
بعد هندسی	۲	۲	۱۴	۲	۰/۱۲	۱۲

جدول ۳- سهم نرخ کرنش لایه چسب و چسبنده‌ها از نرخ کرنش اعمالی به اتصال چسبی دولبه

سرعت (m/s)	نرخ کرنش (s^{-1})	سهم لایه چسب از نرخ کرنش کل (s^{-1})	سهم چسبنده از نرخ کرنش کل (s^{-1})
۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۱	۰/۰۰۹۲۷	۰/۰۰۷۲۵
۳	۱۶۶/۶۷	۱۵۴/۵۹	۱۲/۰۸
۸	۴۴۴/۴۴	۴۱۲/۲۳	۳۲/۲۱
۱۹	۱۰۵۵/۵۶	۹۷۹/۰۷	۷۶/۴۹

جدول ۴- پاسخ تحلیلی مدول اتصال چسبی دولبه در نرخ‌های کرنش متفاوت

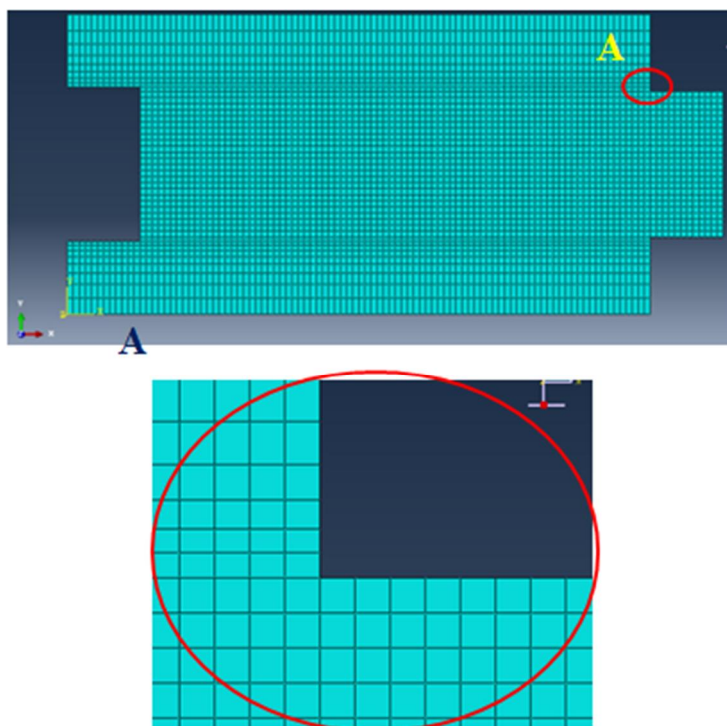
سرعت (m/s)	نرخ کرنش (s^{-1})	مدول اتصال چسبی دولبه (GPa)
۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۱	۱۱/۶
۳	۱۶۶/۶۷	۲۱/۲
۸	۴۴۴/۴۴	۲۲/۹
۱۹	۱۰۵۵/۵۶	۲۴/۳

دادن نتیجه در رابطه (۱۰) مدول اتصال در نرخ کرنش اعمالی محاسبه می‌شود.

۴- تحلیل المان محدود

حل المان محدود اتصال دولبه با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. در مسئله اتصال دولبه چسبی تحت بارگذاری دینامیکی، علاوه بر آن‌که غیرخطی بودن هندسی در مسئله وجود دارد، غیرخطی بودن مادی نیز به دلیل رفتار دینامیکی ماده وجود دارد. در مسئله حاضر به دلیل رفتار غیرخطی مادی و هندسی و تاثیرات اینرسی ناشی از نرخ کرنش بالا، از آباکوس صریح استفاده شده است [۲۴].

به منظور مدل‌سازی رفتار دینامیکی اتصال لازم است، خواص مادی در نرخ کرنش مطلوب به نرم افزار معرفی شود. برای این منظور از مدول برشی لایه چسب در نرخ‌های کرنش متفاوت استفاده می‌شود (مقادیر مدول برشی در جدول ۴ ارائه شده است)؛ همچنین از تغییرات خواص مکانیکی چسبنده فولادی در نرخ‌های کرنش متفاوت صرف‌نظر می‌شود. اتصال دولبه شکل ۱ مدل‌سازی شده و خواص مادی برای آن تعریف می‌شود. لازم به ذکر است، کل اتصال به‌صورت یک‌پارچه مدل شده و سپس با پارتیشن‌بندی، نواحی مختلف آن از یکدیگر جدا شده و به هر قسمت خواص مادی جداگانه نسبت داده می‌شود. دو نوع شرایط مرزی برای قطعه در نظر گرفته می‌شود؛ بدین نحو که درجات آزادی یک طرف اتصال کاملاً بسته شده و از طرف دیگر با سرعت V حرکت داده می‌شود. قبل از حل مسئله لازم است، قطعه المان‌بندی شود. برای حصول نتایج مناسب، المان‌بندی مناسب قطعه بسیار ضروری است؛ همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، از آن‌جا که هدف بررسی تغییرات تنش در لایه چسب نیست، لایه چسب در ضخامت به یک المان تقسیم شده، ولی برای مشاهده بهتر تغییرات تنش در راستای طول و حصول نتایج دقیق‌تر هر میلی‌متر طول اتصال به چهار المان تقسیم می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در لایه چسب و نواحی اطراف آن المان‌ها مربعی هستند. لازم به ذکر است، چسبنده‌ها دارای المان تنش صفحه چهارضلعی خطی از نوع CPS4R با انتگرال کاهش‌یافته و کنترل



شکل ۳- مدل المان محدود اتصال چسبی دولبه

بدين ترتيب برای المان خطی با انتگرال گیری کاهش یافته تنها یک نقطه گوسی آن هم در مرکز المان وجود دارد. البته المان خطی با انتگرال کاهش یافته بسیار انعطاف پذیر است که این انعطاف پذیری بیش از حد ناشی از خطای عددی خود المان بوده که آورگلاسینگ^۳ نامیده می شود. در نرم افزار المان محدود آباکوس یک مقدار کوچک سفتی آورگلاس مصنوعی برای المان مرتبه اول با انتگرال کاهش یافته تعریف می شود تا انتشار مود خطای آورگلاس را محدود کند.

لازم به ذکر است، این سفتی زمانی موثرتر است که تعداد المان های زیادی در مدل استفاده شود؛ بنابراین زمانی که از المان خطی با انتگرال کاهش یافته و کنترل آورگلاس استفاده شود، باید المان بندی مناسبی برای سازه در نظر گرفته شود تا نتایج دقت مطلوبی داشته باشد [۲۴].

لازم به ذکر است که تعداد المان مدل المان محدود ۴۰۰۸ المان است که از این تعداد ۳۸۴۰ المان از نوع CPS4R بوده و ۱۶۸ المان از نوع CPE4R است.

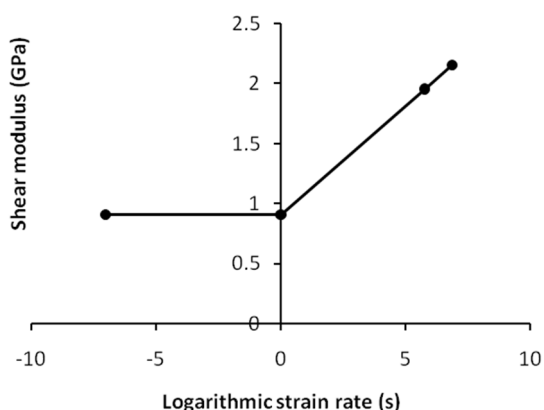
آورگلاس^۱ بوده و المان لایه چسب از نوع کرنش صفحه چهارضلعی خطی از نوع CPE4R با انتگرال کاهش یافته و کنترل آورگلاس است.

عبارت انتگرال گیری کامل مرتبط است با تعداد نقاط گوسی لازم برای انتگرال گیری دقیق عبارت چندجمله ای در ماتریس سفتی المان زمانی که شکل المان منظم باشد. استفاده از انتگرال گیری کامل برای المان های خطی علاوه بر آن که هزینه های محاسباتی را افزایش می دهد، منجر به وقوع پدیده قفل شدن برشی^۲ می شود. به همین دلیل است که توصیه می شود، از این نوع المان تنها در شرایطی استفاده شود که حداقل ممان خمشی در سازه وجود دارد. راه دیگر استفاده از روش انتگرال کاهش یافته است که تنها برای المان های ۴ و ۶ ضلعی قابل استفاده است. این نوع انتگرال گیری عددی از یک نقطه انتگرال گیری، گوسی، کم تر در هر جهت نسبت به انتگرال گیری کامل استفاده می کند.

³ Hourglassing

¹ Hourglass

² Shear Locking



شکل ۴- تغییرات مدول الاستیسیته برشی اپوکسی SA80 نسبت به لگاریتم نرخ کرنش [۲۶]

$$G(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} 890 \text{ MPa} & \dot{\epsilon} \leq 1 \text{ s}^{-1} \\ 890(1 + 0.19 \ln \dot{\epsilon}) \text{ MPa} & \dot{\epsilon} > 1 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (15)$$

با محاسبه مدول الاستیک برشی لایه چسب می‌توان به کمک رابطه (۱۰)، مدول اتصال تحت بارگذاری دینامیکی را محاسبه کرد. جدول ۴ نتایج حاصل را برای نرخ‌های کرنش متفاوت نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ کرنش مدول اتصال پیوسته افزایش می‌یابد. افزایش مقدار مدول اتصال چسبی دولبه در نرخ کرنش ۱۶۶/۷ نسبت به نرخ کرنش ۰/۰۱ چیزی در حدود ۸۲/۷۶ درصد است؛ درحالی‌که این مقدار برای نرخ کرنش ۴۴۴/۴۴ نسبت به نرخ کرنش ۱۶۶/۶۷ برابر ۸/۰۲ درصد و برای نرخ کرنش ۱۰۵۵/۵۶ نسبت به نرخ کرنش ۴۴۴/۴۴ برابر ۶/۵۵ درصد است.

۵-۲- نتایج حل المان محدود اتصال چسبی دولبه

پس از مدل‌سازی اتصال چسبی دولبه در نرم‌افزار المان محدود آباکوس صریح، تعریف خواص مادی و المان‌بندی اتصال، مسئله حل می‌شود. شکل ۵، نمودار حساسیت تحلیل مدول اتصال به المان‌بندی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدول اتصال به تعداد ۴۰۰۸ المان تا ۵۲۰۰ المان مقداری تقریباً یکسان دارد. به عبارت دیگر، حداقل تعداد المان که پاسخ صحیح مسئله را نشان دهد، حدود ۴۰۰۸ المان است. بدین ترتیب، علاوه بر آن‌که در زمان و هزینه محاسباتی صرفه‌جویی می‌شود، از بروز خطاهای

۵- نتایج

در این تحقیق ابتدا مدل تئوری و در ادامه مدل المان محدود برای محاسبه مدول اتصال چسبی دولبه ارائه شد. برای راستی‌آزمایی مدل ارائه شده از نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط چالیتا و همکاران [۶] استفاده شد. اتصال آزمایش شده در مرجع [۶]، متشکل از فولاد S235 به‌عنوان ماده چسبنده و اپوکسی SA80 به‌عنوان ماده سازنده لایه چسب است. خواص مکانیکی لایه چسب و چسبنده در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۲ نیز، ابعاد هندسی اتصال آورده شده است.

۵-۱- نتایج حل تئوری اتصال چسبی دولبه

روندنامای شکل ۲ اجرا شد تا مدول وابسته به نرخ کرنش اتصال چسبی دولبه به‌صورت تئوری محاسبه شود. بدین منظور لازم است تا سهم اجزای سازنده اتصال از نرخ‌های کرنش اعمالی به سازه محاسبه شود. رابطه (۱۴) استفاده شد تا سهم لایه چسب و چسبنده از نرخ کرنش اعمالی ناشی از اعمال بار به اتصال چسبی دولبه در سرعت‌های ۰/۰۰۱۸، ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۱۹ متر بر ثانیه محاسبه شود. جدول ۳ سهم هر یک از اجزای اتصال را از نرخ کرنش اعمالی نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است، نرخ کرنش بارگذاری اعمالی بر اتصال از تقسیم سرعت بارگذاری به طول موثر اتصال حاصل می‌شود. در این تحقیق از تاثیر نرخ کرنش بر مدول برشی فولاد S235 صرف‌نظر شده است، بنابراین مدول الاستیسیته کششی فولاد S235 در هر نرخ کرنش برابر با مقدار الاستیکی آن و برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود؛ اما مدول الاستیک برشی اپوکسی SA80 به‌شدت وابسته به نرخ کرنش است و وابستگی آن به نرخ کرنش از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. برای مشخصه‌سازی رابطه (۱۱)، نیاز به مدول الاستیک برشی اپوکسی SA80 در دو نرخ کرنش متفاوت وجود دارد. بدین منظور از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مرجع [۲۶] استفاده می‌شود. مقدار پارامتر مادی C پس از محاسبه برابر ۰/۱۹ حاصل می‌شود. بدین ترتیب مدول الاستیک برشی لایه چسب از رابطه (۱۵) حاصل می‌شود. شکل ۴ تغییرات مدول الاستیک برشی لایه چسب را برحسب نرخ کرنش نشان می‌دهد.

جدول ۵ نتایج حاصل را برای نرخ‌های کرنش متفاوت نشان می‌دهد. مشابه رفتاری که مدل تئوری ارائه شده برای مدول اتصال چسبی پیش‌بینی کرد، در اینجا نیز مشاهده می‌شود. افزایش مدول اتصال برای نرخ کرنش ۱۶۶/۶۷ نسبت به نرخ کرنش ۰/۰۱ حدود ۷۷/۲۹ درصد است. درحالی که این مقدار برای نرخ کرنش ۴۴۴/۴۴ نسبت به نرخ کرنش ۱۰۵۵/۵۶ برابر ۴/۶۵ درصد و برای نرخ کرنش ۱۰۵۵/۵۶ نسبت به نرخ کرنش ۴۴۴/۴۴ برابر ۳/۶۸ درصد است.

جدول ۵- پاسخ المان محدود مدول اتصال چسبی دولبه در نرخ‌های کرنش متفاوت

مدول اتصال چسبی دولبه (GPa)	نرخ کرنش (s^{-1})	سرعت (m/s)
۱۱/۶	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱۸
۲۰/۵	۱۶۶/۶۷	۳
۲۱/۵	۴۴۴/۴۴	۸
۲۲/۳	۱۰۵۵/۵۶	۱۹

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل المان محدود فوق توانایی پیش‌بینی مدول اتصال چسبی را داراست. روند افزایش مدول اتصال چسبی با افزایش نرخ کرنش، مشابه روندی است که در مدل تئوری مشاهده شد.

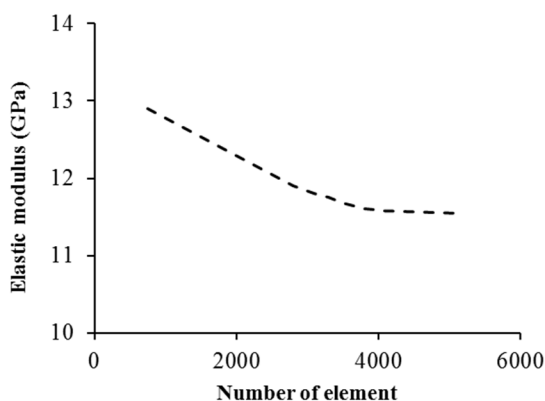
۵-۳- مقایسه نتایج حل تئوری و حل المان محدود اتصال چسبی دولبه

به کمک حل تئوری ارائه شده به سادگی و با استفاده از مفاهیم اولیه اتصالات چسبی می‌توان مدول اتصال چسبی دولبه را در نرخ کرنش دلخواه محاسبه کرد. از سوی دیگر، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس صریح نیز می‌توان با مدل‌سازی و تعریف خواص مادی و المان‌بندی قطعه، مدول اتصال را محاسبه کرد. هر دو روش پاسخ‌هایی نزدیک به هم ارائه می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر اختلاف دو روش در شکل ۷ و جدول ۶ دقت کنید.

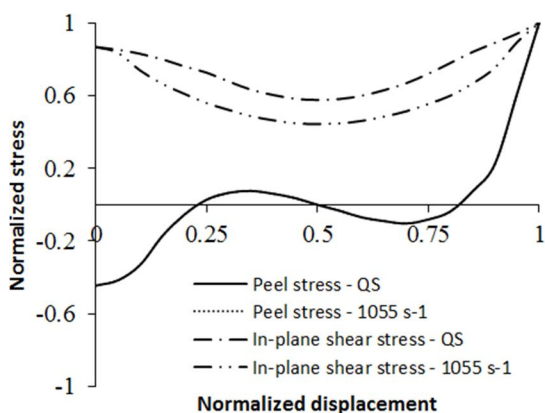
محاسباتی که ممکن است به دلیل تعداد المان زیاد در حل مسئله ایجاد شود، اجتناب می‌شود.

شکل ۶ توزیع تنش پوست کنی و برش داخل صفحه‌ای را برای اتصال چسبی دولبه در نرخ کرنش شبه استاتیکی و ۱۰۵۵/۵۶ نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، برای محاسبه این شکل مقادیر تنش و کرنش در طول اتصال بر مقدار حداکثر خود تقسیم شده است. بدین ترتیب نمودار فوق نمودار تنش نرمالایز شده نسبت به جابجایی نرمالایز شده است.

همان‌گونه که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، تغییرات تنش پوست کنی در راستای طولی اتصال چسبی با نرخ کرنش قابل صرف نظر بوده، درحالی که تنش برشی داخل صفحه با افزایش نرخ کرنش، در دامنه وسیع‌تری تغییر می‌کند.



شکل ۵- حساسیت پاسخ المان محدود به تعداد المان در مدل المان محدود

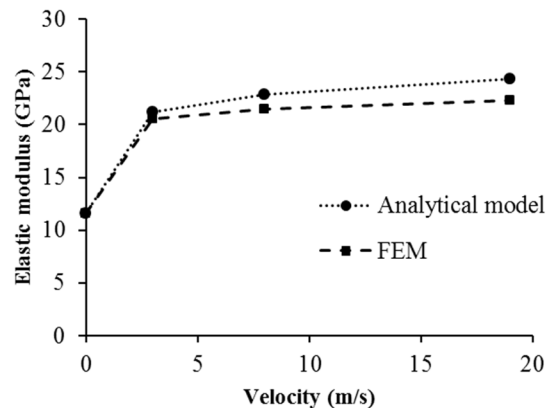


شکل ۶- تغییرات نرمالایز شده تنش کششی طولی، پوست کنی و برش داخل صفحه‌ای در طول اتصال چسبی دولبه

کرنش اجزای سازنده و پارامترهای هندسی اتصال ارائه شد. با ارائه این مدل و بدون نیاز به آزمایش اتصال چسبی دولبه، می‌توان مدول اتصال را در هر نرخ کرنش دلخواه محاسبه کرد. در این مدل ابتدا با داشتن پارامترهای هندسی اتصال، مدول استاتیکی اتصال محاسبه شده، در ادامه سهم هریک از اجزای اتصال، چسب و چسبنده، از نرخ کرنش اعمالی به سازه محاسبه می‌شود. با داشتن سهم نرخ کرنش اجزا، مدول دینامیکی اجزا محاسبه شده، با قراردادن آن در رابطه محاسبه مدول دینامیکی می‌توان مدول اتصال چسبی را در هر نرخ کرنش دلخواه محاسبه کرد. در ادامه مدل المان محدود ارائه شد که توانایی محاسبه مدول اتصال را در هر نرخ کرنش دلخواه دارد. بدین منظور از محیط نرم‌افزار آباکوس صریح استفاده شد. نتایج خروجی مدل‌های ارائه شده، نشان از دقت بالای پیش‌بینی رفتار اتصال چسبی دولبه دارد؛ به طوری که حداکثر اختلاف دو مدل چیزی در حدود ۸/۴ درصد است.

۷- مراجع

- [1] Challita G, Othman R (2010) Finite-element analysis of SHPB tests on double-lap adhesive joints. *Int J Adhes Adhes* 30(4): 236-244.
- [2] Sato C, Ikegami K (1999) Strength of adhesively-bonded butt joints of tubes subjected to combined high-rate loads. *J Adhes* 70(1-2): 57-73.
- [3] Beevers A, Ellis MD (1984) Impact behaviour of bonded mild steel lap joints, *Int J Adhes Adhes* 4(1): 13-16.
- [4] Zachary LW Burger CP (1980) Dynamic wave propagation in a single lap joint. *Exp Mech* 20(5): 162-166.
- [5] Keisler C Lataillade JL (1995) The effect of substrate roughness characteristics on wettability and on the mechanical properties of adhesive joints loaded at high strain rates. *J Adhes Sci Technol* 9(4): 395-411.
- [6] Challita G, Othman R, Casari P, Khalil K (2011) Experimental investigation of the shear dynamic behavior of double-lap adhesively bonded joints on a wide range of strain rates. *Int J Adhes Adhes* 31(3): 146-153.
- [7] Carneiro Neto RM, Sampaio EM, Assis JT (2019) Numerical and experimental analysis of bonded joints with combined loading. *Int J Adhes Adhes* 90: 61-70.
- [8] Volkersen O (1983) Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten



شکل ۷- مقایسه بین روش تئوری و روش المان محدود در محاسبه مدول اتصال چسبی دولبه

جدول ۶- مقایسه مدول اتصال چسبی دولبه در نرخ‌های کرنش متفاوت محاسبه‌شده با روابط تئوری و المان محدود

نرخ کرنش (s^{-1})	تئوری (GPa)	المان محدود (GPa)	اختلاف (%)
۰/۰۱	۱۱/۶	۱۱/۶	۰/۲
۱۶۶/۶۷	۲۱/۲	۲۰/۵	۳/۳
۴۴۴/۴۴	۲۲/۹	۲۱/۵	۶/۲
۱۰۵۵/۵۶	۲۴/۳	۲۲/۳	۸/۴

همان‌طور که از شکل فوق مشاهده می‌شود، روند افزایش مدول اتصال در هر دو روش تئوری و المان محدود مشابه یکدیگر است؛ با این تفاوت که روش المان محدود نسبت به روش تئوری افزایش بیشتری برای مدول اتصال از حالت شبه‌استاتیک به دینامیک (یعنی از نرخ کرنش ۰/۰۱ به ۱۶۶/۶۷) پیش‌بینی می‌کند، ولی در نرخ‌های کرنش دینامیکی روش المان محدود، افزایش کم‌تری در مدول اتصال را نسبت به مدل تئوری پیش‌بینی می‌کند. اختلاف دو روش در پیش‌بینی مدول اتصال چسبی دولبه در نرخ کرنش‌های ۰/۰۱، ۱۶۶/۶۷، ۴۴۴/۴۴ و ۱۰۵۵/۵۶ به ترتیب برابر ۰/۲٪، ۳/۲٪، ۶/۲٪ و ۸/۴٪ است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدلی تئوری برای محاسبه مدول دینامیکی اتصال چسبی دولبه با داشتن خواص مکانیکی وابسته به نرخ

- [19] Miguel AG, Pagani A, Pizzo L, Catapano A, Panettieri E (2020) Accurate evaluation of 3D stress fields in adhesive bonded joints via higher-order FE models. *Mech Adv Mater Struc* 27(4): 61-70.
- [20] Stapelton SE, Stier B, Jones S, Bergan A, Kaleel I, Petrolo M, Carrera E, Bednarczyk B (2019) A critical assessment of design tools for stress analysis of adhesively bonded double lap joints. *Mech Adv Mater Struc* 1-21.
- [21] Heidari M, Salimi-Majd D, Mohhamadi B (2015) Failure analysis of composite wing adhesive joints using 3D cohesive interface element. *Journal of Science and Technology of Composites (JSTC)* 2(2): 31-40. (In Persian)
- [22] Beevers A, Steidler SM, Durodola J, Coackley M (2001) Analysis of stiffness of adhesive joints in car bodies. *J Mater Process Technol* 118: 96-101.
- [23] Xiao XS, Foss PH, Schroeder (2004) Stiffness prediction of the double lap shear joint. Part1: Analytical solution. *Int J Adhes Adhes* 24(3): 229-237.
- [24] Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, ABAQUS/Explicit: User's Manual, 1, (2001), Hibbitt, Karlsson and Sorensen Incorporated.
- [25] Challita G, Othman R, Khalil K (2015) Compression and shear behavior of epoxy SA 80 bulk adhesive over wide ranges of strain rate. *J Polym Eng* 36(2):165-171.
- [26] Johnson GGR, Cook HW (1983) A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. 7th International Symposium on Ballistics. 541-547.
- [27] Shokrieh MM, Mosalmani R, Omidi MJ (2015) A strain-rate dependent micromechanical constitutive model for glass/epoxy composites. *Compos Struct* 121: 37-45.
- Laschenquerschnitten, *Luftfahrtforschung*. 15(1/2): 41-47.
- [9] Goland M, Reissner E (1944) The stresses in cemented joints. *J Appl Mech* 11(1): A17-A27.
- [10] Adams RD, Peppiatt NA (1974) Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *J Strain Anal Eng Des* 9(3): 185-196.
- [11] Hart-Smith LJ (1981) Stress analysis-A continuum mechanics approach (in adhesive bonded joints). *Dev Adhes London Appl Sci Publ* 1-44.
- [12] De Bruyne NA (1944) The strength of glued joints. *Aircr Eng Aerosp Technol* 16(4): 115-118.
- [13] Owens JFP, and Lee-Sullivan P (2000) Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints I. Theoretical model. *Int J Adhes Adhes* 20(1): 39-45.
- [14] Kumazawa H, Kasahara T (2019) Analytical investigation of thermal and mechanical load effects on stress distribution in adhesive layer of double-lap metal-composite bonded joints. *Adv Compos Mater* 28(4): 425-444.
- [15] Kessentini R, Klinkova O, Jrad H, Tawfig I, Haddar M (2018) Analytical and numerical investigation of coupled hygro-thermo-mechanical model of multi-layers bonded structure. *Int J Adhes Adhes* 84: 108-118.
- [16] Hasanvand M, Shishehsaz M (2017) An analysis of stresses evaluation efficacy in adhesive single-lap joints. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 4(4): 49-58. (In Persian)
- [17] Carlberger T, Stigh U (2007) An explicit FE-model of impact fracture in an adhesive joint. *Eng Fract Mech* 74(14): 2247-2262.
- [18] Sawa T, Nagai T, Iwamoto T, Kuramoto H (2008) A study on evaluation of impact strength of adhesive joints subjected to impact shear loadings. in ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition 55-61.