

# معرفی روش‌های عددی به کار رفته جهت مدلسازی اتصالات چسبی

محمدحسن شجاعی فرد<sup>۱</sup>، حامد سعیدی گوگرچین<sup>۲</sup>، محمدرضا غیبی<sup>۳</sup>

۱ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲ استادیار دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، hsaeydi@iust.ac.ir

۳ دانشجوی دکتری مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۷

## چکیده

در پی کاربرد صنعتی روزافزون از چسب‌ها در ایجاد اتصالات، پیش‌بینی رفتار مکانیکی آنها ضروری است. برای این منظور روش‌های عددی متنوعی توسعه یافته و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است که به‌طور کلی لایه چسب در آنها یا با در نظر گرفتن آسیب یا بدون در نظر گرفتن آن مدلسازی شده است. مطالعات نشان می‌دهد که مدلسازی چسب با در نظر گرفتن آسیب نتایج قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد. از بین این مدل‌ها، مدل ناحیه چسبناک به دلیل سادگی تعیین پارامترهای آن نسبت به مدل‌های آسیب پیوسته به‌عنوان یک مدل ماده برای شبیه‌سازی لایه چسب مورد استقبال قرار گرفته است. این مدل ماده از طریق رابطه‌ای موسوم به قانون کشش - جدایش مشخص می‌شود که متناسب با نوع چسب و نوع بارگذاری اتصال انتخاب می‌شوند. این مقاله، علاوه بر معرفی انواع مدل‌های ناحیه چسبناک، محدودیت‌های روش‌های تعیین پارامترهای قانون کشش - جدایش را مورد بررسی قرار داده است.

**واژگان کلیدی:** روش عددی، مدل ناحیه چسبناک، اتصال چسبی، آسیب پیش‌رونده، قانون کشش - جدایش

## ۱. مقدمه

و ضخامت ورق‌های مورد استفاده در یک اتصال و نیز عدم امکان دسترسی به هر دو طرف ورق‌ها حین ایجاد اتصال از جمله این محدودیت‌ها محسوب می‌شوند [۱]. از سوی دیگر، نیاز روز افزون به خودروهای سبک‌تر، امکان‌سنجی استفاده از مواد سبک‌تر را در پی داشته است. به‌علاوه مطلوب است هزینه تمام‌شده خودروها با کاهش تعداد بخش‌ها یا به‌کارگیری فرایندهای تولید ارزان‌تر تخفیف یابد؛ زیرا قدرت رقابت خودروسازان در بازارهای جهانی با تکیه بر کاهش هزینه‌های خودروها افزایش می‌یابد. با این حال، در طی این امکان‌سنجی‌ها باید

اتصالات چسبی از جمله روش‌هایی هستند که برای استفاده در سازه‌های مکانیکی توسعه یافته‌اند. به‌کارگیری این اتصالات نه تنها به‌منظور دستیابی به استحکام بیشتر می‌باشد، که از منظر ساخت و تولید نیز مورد توجه طراحان قرار گرفته است. پیشرفت‌هایی که در زمینه مشخصات و قابلیت‌های چسب‌ها انجام شده است، خودروسازان را به استفاده از مزایای چسب در ترکیب با روش جوش نقطه‌ای متداول بیشتر ترغیب نموده است. اتصالات چسبی در صنعت خودروسازی جهت فائق آمدن بر محدودیت‌های جوش نقطه‌ای توسعه یافته است. تعداد، جنس

تمام معیارهای استاندارد خودروها مانند استحکام، ایمنی و دوام را نیز شامل گردد.

سازه بدنه خودرو تقریباً یک پنجم وزن کل خودرو را تشکیل می‌دهد. از جمله راه‌حل‌ها برای کاهش وزن خودرو، استفاده از ورق‌های از جنس‌های مختلف، کاهش ضخامت ورق‌ها یا ادغام این دو روش در بدنه خودرو با حفظ یا حتی بهبود استحکام کلی سازه بدنه آن می‌باشد. استفاده از اتصالات چسبی بنا به مزایای مثال‌زدنی آنها، جهت کاهش وزن و بهبود عملکرد تصادف خودروها مورد توجه طراحان خودروهای جدید قرار گرفته است. از جمله مزایای این اتصالات می‌توان به افزایش عمر خستگی و استحکام اتصال اشاره کرد. این مهم به علت توزیع تنش در سطح اتصال دو قطعه به هم حاصل می‌شود. همچنین ویژگی ایجاد اتصال بین مواد غیرمشابه جهت نیل به استفاده از مواد کامپوزیتی در کنار فلزات در سازه بدنه خودرو، دیگر ویژگی بارز این نوع اتصال می‌باشد. بنابراین به منظور طراحی اتصالات در سازه‌های مهندسی لازم است بتوان آنها را مورد تحلیل و بررسی قرار داد؛ یعنی باید بتوان تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از بارگذاری‌های صورت گرفته را به دست آورد. در این راستا، این نوشتار امکان استفاده از روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی را مورد ارزیابی قرار داده و با تکیه بر مدلسازی عددی این اتصالات، روش‌های مختلف مدلسازی لایه چسب را معرفی کرده است.

## ۲. روش عددی پیشنهادی در پیش‌بینی اتصالات چسبی

بررسی رفتار مکانیکی اتصالات چسبی به صورت تحلیلی توسط پژوهشگران صورت پذیرفته است. بررسی این مطالعات نشان می‌دهد که تقریباً تمامی مدل‌های ارائه شده بر پایه اتصال چسبی تک‌لبه‌ای با هندسه دوبعدی صورت گرفته است. هندسه دوبعدی ناشی از این فرض می‌باشد که تنش در راستای عرضی نسبت به راستای بارگذاری (طولی) کوچک می‌باشد (فرض تنش صفحه‌ای). در بیشتر این تحلیل‌ها چسب و چسبنده، هر دو، الاستیک خطی در نظر گرفته شده‌اند؛ زیرا فرض غیرخطی بودن مادی، حل تحلیلی مسئله را بسیار پیچیده می‌کند [۲]. از سوی دیگر، رفتار مکانیکی اتصالات چسبی تنها متأثر از هندسه اتصال نیست، بلکه به شرایط مرزی مختلف نیز بستگی دارد. افزایش پیچیدگی هندسه اتصال (شکل) در کنار طبیعت سه‌بعدی آن،

استخراج معادلات حاکم و شرایط مرزی سیستم برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی اتصالات چسبی را دشوارتر می‌کند. در این میان، در نظر گرفتن هندسه و مدل ماده‌های غیرخطی برای اجزای اتصال، حل تحلیلی مسئله را تقریباً غیر ممکن می‌سازد. از سوی دیگر، انجام مطالعات تجربی با محدودیت‌هایی مانند صرف زمان و هزینه بالا و خطا در اجرای آزمون‌ها و اندازه‌گیری‌ها همراه است. به همین دلیل به کارگیری روش‌های عددی در کنار مطالعات تجربی ابزاری کارآمد در بررسی سازه‌ها می‌باشد.

## ۳. روش‌های شبیه‌سازی عددی اتصالات چسبی

با توجه به ماهیت اتصالات چسبی، مطالعات عددی در این زمینه را از منظر بارگذاری می‌توان به چهار گروه تقسیم‌بندی نمود:

۱. اتصال تحت بارگذاری استاتیکی

۲. اتصال تحت بارگذاری دینامیکی

۳. اتصال تحت بارگذاری خستگی

۴. اتصال تحت آثار مخرب محیطی (مانند دما و رطوبت)

همچنین مطالعات عددی صورت‌گرفته در زمینه اتصالات چسبی، با دو فرض صرف‌نظر کردن از آسیب یا در نظر گرفتن آسیب انجام می‌شود. در دسته نخست این مطالعات (صرف‌نظر از آسیب)، لایه چسب به صورت ماده‌ای ویسکوالاستیک [۳]، الاستوپلاستیک [۴] یا الاستیک خطی [۵] در نظر گرفته می‌شود. در این نوع از شبیه‌سازی‌ها، چسب و چسبنده کاملاً پیوندخورده<sup>۱</sup> مدلسازی می‌گردند. در چنین شرایطی نیروی پیوند بین وجهی، قوی‌تر از استحکام خود چسب فرض می‌شود. بنابراین این مدل‌ها برخلاف اینکه توزیع تنش در لایه چسب را به خوبی توصیف می‌کنند، برای توصیف رفتار واماندگی اتصالات چسبی مناسب نیستند [۶]. همچنین از تکنیک بسته‌شدن مجازی ترک<sup>۲</sup> نیز به منظور توصیف رفتار واماندگی اتصالات چسبی بهره برده می‌شود [۷-۸]. در این تکنیک، نیروهای گره‌های<sup>۳</sup> داخلی در دهانه ترک تعیین شده و ترک توسعه داده می‌شود. سپس تحلیل تا پیش از پیشروی ترک به منظور محاسبه جابه‌جایی نسبی بین دو گرهی که در مختصات یکسانی قرار دارند، صورت می‌گیرد. نرخ آزادسازی انرژی به کمک این نتایج محاسبه شده و با مقدار چقرمگی شکست ماده مقایسه می‌گردد. اگر نرخ آزادسازی انرژی بزرگتر از چقرمگی شکست باشد، ترک رشد خواهد کرد. اما این تکنیک تنها در مسائل مکانیک شکست

الاستیک خطی<sup>۴</sup> کاربرد دارد و برای اتصالات چسبی با تغییر شکل‌های بزرگ<sup>۵</sup> مناسب نیست [۶]. بنابراین برای تعیین میزان باربری اتصال چسبی و توصیف رفتار واماندگی آن، لایه چسب با استفاده از فرض دوم؛ یعنی در نظر گرفتن آسیب مدلسازی می‌شود. در این میان، استفاده از مدل‌های ناحیه چسبناک<sup>۶</sup> برای پیش‌بینی آسیب در چسب‌ها و توصیف رفتار واماندگی اتصالات چسبی بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. مدل ناحیه چسبناک در حال حاضر به‌عنوان کارآمدترین و قابل اعتمادترین روش برای شبیه‌سازی آسیب پیش‌رونده در اتصالات چسبی شناخته می‌شود. این مدل در چارچوب مکانیک آسیب پیوسته ایجاد شده و توسعه یافته است و برای بهبود عملکرد خود از مفاهیم مکانیک شکست بهره می‌برد. همچنین این مدل برای تنوع وسیعی از مسائل و مواد همگن و ناهمگن شامل فلزات، سرامیک‌ها، بتن‌ها، پلیمرها، مواد ویسکوالاستیک، کامپوزیت‌ها و چسب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۹-۱۰].

#### ۴. مدل ناحیه چسبناک

در مدل ناحیه چسبناک، مسئله اصلی در شبیه‌سازی سازوکار واماندگی، توصیف صحیح اندرکنش‌های چسبناک در طول سطوح شکست است که به کمک قوانینی موسوم به قانون کشش - جدایش صورت می‌پذیرد. مدل ناحیه چسبناک یک مدل پدیدارشناختی<sup>۷</sup> است؛ زیرا ایده اصلی آن از پدیده جدایش بین اتمی سرچشمه گرفته شده است. نمودار شکل ۱. (ب) که با مشتق‌گیری از منحنی انرژی پتانسیل شکست بین اتمی (شکل ۱. الف) حاصل شده است نیز به خوبی نشان می‌دهد که در جدایش بین دو اتم، با افزایش فاصله بین آنها، ابتدا نیروهای چسبندگی تا زمانی که به مقدار بحرانی برسند، افزایش می‌یابند و بعد از آن، افزایش جدایش بین اتم‌ها منجر به کاهش سریع نیروهای چسبندگی می‌گردد [۱۱]. در نهایت، وقتی نیروهای چسبندگی به صفر برسند، اتم‌ها از هم جدا می‌شوند. در حقیقت، با تعمیم این پدیده فیزیکی به حوزه‌های میکرو، میزو و ماکرو مکانیک، توصیف عمومی مدل ناحیه چسبناک در قالب قانون کشش - جدایش شکل گرفته است. بنابراین، با توجه به قوانین کشش - جدایش، مدل‌های ناحیه چسبناک به صورت شکل ۲. تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های پتانسیل پایه، مدل‌هایی هستند که در آنها قوانین کشش - جدایش از توابع پتانسیل

انرژی شکست حاصل می‌شوند. در این میان، در مدل‌های ناحیه چسبناک ذاتی<sup>۸</sup> المان‌های چسبناک با در نظر گرفتن محدوده الاستیک اولیه (از جدایش صفر تا جدایش بحرانی) شبیه‌سازی می‌گردند، اما در مدل‌های غیرذاتی<sup>۹</sup> از این محدوده صرف‌نظر شده و در المان چسبناک، کشش متناظر با جدایش صفر، مقداری محدود در نظر گرفته می‌شود.

مدل‌های پتانسیل پایه، مدل‌هایی هستند که در آنها قوانین کشش - جدایش از توابع پتانسیل انرژی شکست حاصل می‌شوند. در این میان، در مدل‌های ناحیه چسبناک ذاتی<sup>۱۰</sup> المان‌های چسبناک با در نظر گرفتن محدوده الاستیک اولیه (از جدایش صفر تا جدایش بحرانی) شبیه‌سازی می‌گردند، اما در مدل‌های غیرذاتی<sup>۱۱</sup> از این محدوده صرف‌نظر شده و در المان چسبناک، کشش متناظر با جدایش صفر، مقداری محدود در نظر گرفته می‌شود. در مقابل، روابط ساختاری مدل‌های ناحیه چسبناک غیر پتانسیل پایه بر پایه جابه‌جایی مؤثر و کشش مؤثر توسعه یافته‌اند. مدل‌های مبتنی بر کشش، تابعی از کشش و جدایش بحرانی می‌باشند و در مقابل، قوانین کشش - جدایش مبتنی بر جابه‌جایی، تنها تابعی از جدایش بحرانی هستند. با استفاده از جابه‌جایی مؤثر و کشش مؤثر، مدل‌های مختلفی ارائه شده است که از جمله این مدل‌ها می‌توان به قوانین کشش - جدایش چندجمله‌ای درجه سه<sup>۱۲</sup>، دوزنقه‌ای<sup>۱۳</sup>، نمایی<sup>۱۴</sup>، دوزنقه‌ای هموار<sup>۱۵</sup> و مدل دوخطی<sup>۱۶</sup> [۱۳] اشاره کرد. گفتنی است این قوانین به کمک پارامترهایی تعیین می‌شوند که از جمله آنها انرژی شکست چسب<sup>۱۷</sup>، سفتی اولیه المان چسبناک<sup>۱۸</sup> و کشش آزادسازی<sup>۱۹</sup> می‌باشد. این پارامترها طی روش‌هایی استخراج شده و به کار بسته می‌شوند، اما تعیین دقیق پارامترهای مشخص‌کننده مدل‌های ناحیه چسبناک غیرپتانسیل پایه همواره با مشکلاتی همراه بوده است [۱۴].

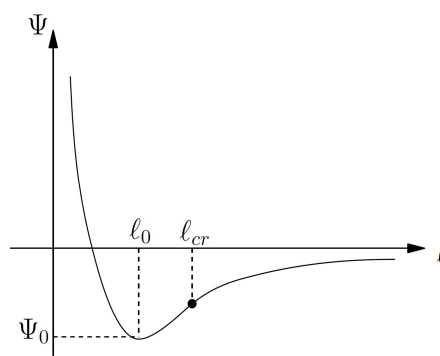
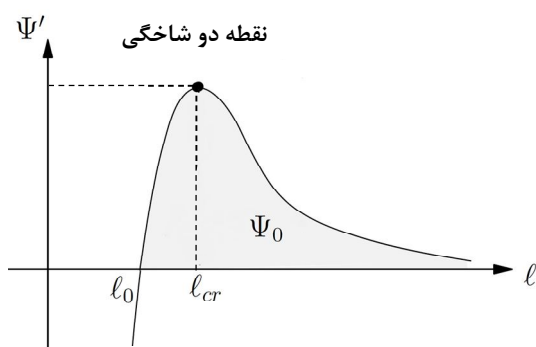
#### ۴-۱. بررسی تأثیر شکل قانون کشش - جدایش بر

##### رفتار مکانیکی اتصالات چسبی

به‌منظور بررسی میزان تأثیر انتخاب قانون کشش - جدایش بر نتایج شبیه‌سازی‌ها، در سال‌های اخیر مطالعاتی صورت پذیرفته است. چاندرا<sup>۲۰</sup> و همکاران (۲۰۰۲) مرور مفصلی بر مدل‌های ناحیه چسبناک ارائه کردند و نیز مقایسه‌ای بین برخی از نتایج دو قانون مختلف نمایی و دو خطی انجام دادند. آنها نشان دادند که

شکل قانون کشش - جدایش اثر قابل توجهی بر نتایج عددی شبیه‌سازی‌ها دارد و بنابراین باید به دقت انتخاب شود و پارامترهای آن بر مبنای آزمون‌های تجربی مناسبی استخراج گردد. به‌ویژه برای آزمون اتصال دولبه‌ای<sup>۲۱</sup>، که مورد بررسی ایشان قرار گرفت، قانون دوخطی نسبت به قانون نمایی انطباق بسیار بهتری را با داده‌های تجربی نشان می‌دهد [۱۳]. وُلُج<sup>۲۲</sup>

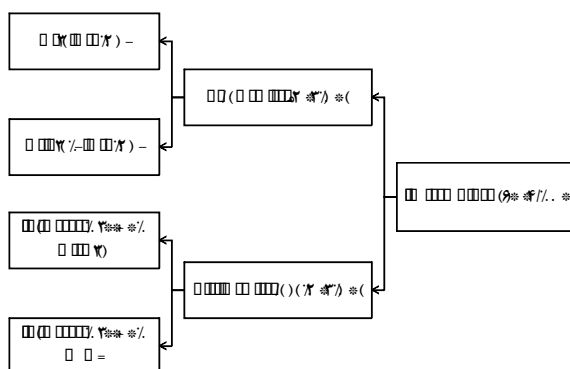
(۲۰۰۴) مقایسه‌ای بین چهار قانون چسبناک دو خطی، سهموی، سینوسی و نمایی را انجام و نشان داد که شکل قانون چسبندگی<sup>۲۳</sup> اثر قابل توجهی روی نتایج مود اول و تست پوست‌کنی<sup>۲۴</sup> دارد. البته در تحلیل تست پوست‌کنی به‌کمک روش المان محدود غیرخطی، مشخصات همگرایی هر چهار مدل مشابه هم گزارش شدند [۱۵].



(ب)

(الف)

شکل ۱. الف) تغییرات انرژی پتانسیل بین اتمی، ب) مشتق آن (کشش بین اتمی) [۱۲]



شکل ۲. تقسیم‌بندی مدل‌های ناحیه چسبناک

آلفانو<sup>۲۵</sup> (۲۰۰۶) برای بررسی اثر شکل قانون کشش - جدایش، چهار قانون دوخطی، خطی - سهموی، نمایی و دوزنقه‌ای را در مود اول مورد مقایسه قرار داد. وی در این بررسی فرض کرد که انرژی شکست چسب ( $G_c$ )، کشش آزادسازی ( $T$ ) و سفتی اولیه المان چسبناک ( $E$ ) در هر چهار مدل برابر هستند تا اینکه بتواند اختلافات احتمالی در پاسخ عددی را صرفاً به شکل خاص منحنی قانون کشش - جدایش مورد استفاده نسبت دهد. مقایسه بین نتایج منحنی نیرو - جابه‌جایی تیر دو لبه یک‌سر گیردار<sup>۲۶</sup> نشان می‌دهد که قانون نمایی با استفاده از مش‌های درشت‌تر، مطابقت خوبی با نتایج

تجربی دارد، اما سه مدل دیگر و به‌خصوص مدل دوزنقه‌ای با نوساناتی همراه است که می‌توان آنها را ناشی از تقریب المان محدود تصور کرد. البته با ریز کردن مش‌ها به اندازه کافی، اختلاف بین مدل‌های مورد بررسی ناچیز گردید. در نهایت، آلفانو بیان کرد که اگر از مش‌های به اندازه کافی ریزی بهره گرفته شود، شکل قانون کشش - جدایش اثر ناچیزی بر حل اجزای محدود خواهد داشت. ناگفته نماند که او بیان نمود با وجود مش‌بندی کنونی، شکل قانون مورد استفاده ممکن است روی میزان تقریب به‌دست آمده تأثیرگذار باشد. قانون کشش - جدایش نمایی برای حل مسئله تیر دو لبه یک‌سر گیردار بهینه

است، در حالی که مصالحه خوبی بین دقت نتایج و زمان حل مسئله به کمک مدل دو خطی وجود دارد. در مقابل مدل دوزنقه‌ای بدترین نتایج را حاصل می‌کند [۱۶]. نویسک<sup>۳۷</sup> و مرزی<sup>۳۸</sup> (۲۰۰۹) برای در نظر گرفتن اثر وابستگی مدل‌های ناحیه چسبناک به نرخ کرنش، از قانون کشش - جدایش سه خطی<sup>۳۹</sup> استفاده کردند. آنها پس از استخراج پارامترهای این مدل، آن را با قانون دو خطی مقایسه کردند و نتایج را به کمک نمونه آزمایشگاهی U شکل صحنه‌گذاری و مشاهده کردند که مقدار حداکثر نیرو در بارگذاری دینامیکی توسط مدل دوخطی به خوبی تخمین زده شده است. اما در بارگذاری شبه‌استاتیکی، مقادیری کمتر از واقعیت برای آن حاصل می‌گردد. علت این امر را می‌توان ناشی از افزایش محلی زیاد نرخ کرنش، درست مقابل دهانه ترک لایه چسب تلقی کرد که مدل مستقل از نرخ کرنش دوخطی نتوانسته است آن را لحاظ نماید. به علاوه ایشان بیان کردند که در شبیه‌سازی لایه چسب با المان‌های چسبناک، وابستگی به مش کم است، به شرطی که المان‌ها کوچکتر از اندازه ناحیه تحت آسیب باشند. پینتو<sup>۳۰</sup> و همکاران (۲۰۰۹) نیز نشان دادند که هندسه سازه (شکل سطح مقطع) و رفتار ماده در انتخاب شکل قانون کشش - جدایش مؤثر است. آنها که به بررسی استحکام اتصال تک‌لبه‌ای با چسبنده‌های مشابه و غیرمشابه پرداختند، به این نتیجه رسیدند که برای اتصالاتی با چسبنده‌هایی با سفتی بالاتر، باید پارامترهای چسبناک به دقت تعیین گردند، به دلیل اینکه در این اتصالات بارهای پوست‌کنی کاهش می‌یابد و اتصال عمدتاً تحت برش قرار می‌گیرد [۱۷]. رید<sup>۳۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) نیز برای بررسی پلاستیکی شدن لایه چسب از سه مدل دوزنقه‌ای، نمایی و دوخطی استفاده کردند. مدل دوخطی استحکام چسب اپوکسی مورد استفاده را ۲۰ درصد کمتر از واقعیت نشان داد. ایشان این خطا را ناشی از نرم‌شوندگی زود هنگام شاخه رشد آسیب این مدل تفسیر کردند [۱۸]. باروز<sup>۳۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵) نیز با استفاده از سه مدل ناحیه چسبناک غیرپتانسیل پایه جدید به بررسی واماندگی اتصال تک‌لبه‌ای پرداختند. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که شکل قانون کشش - جدایش سبب اختلاف محسوسی در پاسخ‌های محاسباتی می‌شود؛ به خصوص اختلاف بین منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی حاصل شده برای سه مدل مختلف با افزایش سفتی نمونه تک‌لبه‌ای (سفتی چسبنده‌ها) بیشتر مشهود می‌گردد [۱۹].

گفتنی است قوانین کشش - جدایش مختلف ذکر شده به مقادیر پارامترهای چسبناک متفاوتی نیاز دارند که به جز انرژی شکست، سایر پارامترها از روش‌های مشخصی به دست می‌آید. همچنین برای توصیف مشخصات یک ماده، به کار بردن یک قانون برای شبیه‌سازی پدیده آسیب در آن ضروری است، به ویژه اگر هدف، بررسی آثاری چون بارگذاری مود ترکیبی یا بارگذاری سه‌محوری<sup>۳۳</sup> باشد. بنابراین، با توجه به پژوهش‌های انجام شده و اینکه قوانین کشش - جدایش مختلف به پارامترهای چسبناک متفاوتی نیز نیاز دارند، انتخاب قانون کشش - جدایش مناسب برای مدلسازی آسیب در لایه چسب بسیار حائز اهمیت است.

#### ۴-۲. تعیین پارامترهای قوانین کشش - جدایش

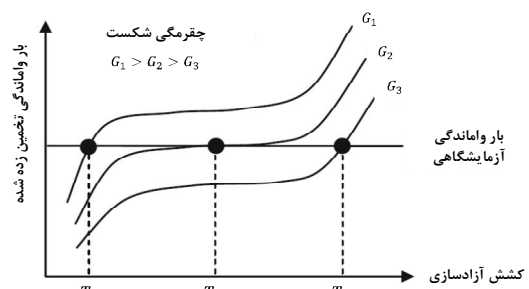
پارامترهای قوانین کشش - جدایش از سه طریق قابل دستیابی هستند: روش معکوس<sup>۳۴</sup>، تکنیک تعیین مشخصه<sup>۳۵</sup> و روش مستقیم<sup>۳۶</sup>. در روش معکوس، نخست شکل قانون کشش - جدایش انتخاب می‌شود و در ادامه کالیبراسیون نتایج عددی به کمک نتایج تجربی به صورت دستی [۱۱] یا به روش بهینه‌سازی [۲۰] انجام می‌پذیرد. در این روش، ایجاد انطباق حداکثری بین نتایج منحنی نیرو - جابه‌جایی عددی با نتایج تجربی منجر به دستیابی به پارامترهای چسبناک می‌گردد. در رویه دستی،  $G_{IC}$  به عنوان پارامتر مادی به مدل ایجاد شده تجویز می‌شود و سایر پارامترهای مدل چسبناک انتخاب شده به نحوی تغییر می‌یابد که انطباق حداکثری تأمین شود. در روش بهینه‌سازی نیز، هدف به حداقل رساندن تابع خطای بین دو منحنی عددی و تجربی است. گفتنی است انتخاب شکل قانون کشش - جدایش به ویژگی‌های چسب اعم از ترد، نیمه‌ترد یا نرم‌بودن آن وابسته است که برای همه چسب‌ها این اطلاعات در دسترس نیست. همچنین در این روش در نظر گرفتن تنها استحکام استاتیکی اتصالات چسبی نمی‌تواند مجموعه یکتا و دقیق از پارامترهای ناحیه چسبناک را به دست بدهد، به طوری که مجموعه‌های مختلفی از این پارامترها را می‌توان در استحکام استاتیکی یکسان پیش‌بینی کرد. در شکل ۳، آثار انرژی شکست و کشش آزادسازی بر بار واماندگی استاتیکی به‌طور شماتیک نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که افزایش انرژی شکست یا کشش آزادسازی، بار واماندگی پیش‌بینی شده را افزایش می‌دهد. بنابراین، اگرچه مجموعه‌های مختلفی از

به منحنی تنش - کرنش نمونه حجمی<sup>۳۷</sup> آن تعیین گردد [۲۴]. در صورتی که چسب ترد باشد، استخراج پارامترهای قانون کشش - جدایش دوخطی به روش معکوس برای آن چسب پیشنهاد می‌گردد، به این دلیل که طبق مطالعات صورت گرفته در حوزه اتصالات چسبی، استفاده از مدل چسبناک دوخطی به منظور شبیه‌سازی چسب‌های ترد، نتایج مطلوبی را به ارمغان آورده است [۱۱، ۲۵-۲۷]. برای دو نوع چسب دیگر نیز استفاده از روش مستقیم پاسخ مطلوب‌تری را حاصل خواهد کرد.

#### ۳-۴. محدودیت‌های مدل‌های ناحیه چسبناک

به‌طور کلی توسعه قوانین غیرپتانسیل پایه به‌خاطر عدم نیاز آنها به سیستم متقارن نسبتاً آسان است. اما روابط حاکم بر این مدل‌ها در شرایط مود ترکیبی دلخواه، پاسخ قابل اطمینانی را ارائه نمی‌کند؛ زیرا آنها تمام مسیرهای جدایش ممکن را در نظر نمی‌گیرند [۲۸]. به‌عبارت دیگر این مدل‌ها تحت شرایط مود ترکیبی ممکن است به نتایج اشتباهی همگرا شوند. از نظر محاسبات عددی، در قوانین غیرپتانسیل پایه چون در نقاط بحرانی جدایش مقدار مشتق نامعین است، علامت سفتی مماسی مدل ماده مورد استفاده به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند که سبب مشکلات همگرایی می‌شود؛ یعنی سفتی مماسی در نظر گرفته شده در این مدل‌ها منجر به شرایط عدم تقارن می‌شود که تحت این شرایط زمان محاسبات به‌شدت افزایش می‌یابد. همچنین وجود مشکلات ناپایداری مادی<sup>۳۸</sup> [۲۹] و عددی<sup>۳۹</sup> [۳۰] و دشواری استفاده از مدل‌های ناحیه چسبناک غیرپتانسیل پایه در سطوح غیر تخت<sup>۴۰</sup> از دیگر مواردی است که جهت سهولت مدلسازی باید مرتفع گردند. مشکلات ناپایداری زمانی بروز می‌کند که حین اجرای مدلسازی عددی تعدادی از المان‌های چسبناک حذف می‌شوند و این موضوع سبب افزایش زمان همگرایی مسئله می‌گردد. گفتنی است چنانچه مدلسازی رفتار مود ترکیبی مد نظر باشد، هم باید قوانین کشش - جدایش مود خالص اول و دوم استخراج شوند و هم باید از معیارهای شروع و رشد آسیب برای ترکیب آنها با هم و تشکیل قانون مود ترکیبی استفاده گردد. در این میان، نه‌تنها تعیین قوانین موده‌های خالص مستلزم آزمون‌های تجربی است، که تعیین معیار مناسب برای شروع و رشد آسیب و در نهایت صحت‌گذاری قانون مود ترکیبی نیز نیازمند شناخت چسب و حتی اجرای آزمون‌های تجربی

انرژی‌های شکست و کشش‌های آزادسازی مانند  $(T_1, G_1)$ ،  $(T_2, G_2)$  و  $(T_3, G_3)$  می‌تواند استحکام استاتیکی یکسانی را پیش‌بینی نماید، اما تنها یک مجموعه از نظر فیزیکی قابل قبول خواهد بود [۱۱]. در تکنیک تعیین مشخصه، هر کدام از پارامترهای مدل ناحیه چسبناک به‌طور مستقل و طی آزمون‌های مشخصی استخراج می‌گردد [۲۱]. در این روش نیز لازم است که نخست قانون کشش - جدایش مناسب انتخاب شود. اما این تکنیک به‌دلیل دشواری انجام آزمایشات خاص آن و در نهایت همبستگی نه‌چندان خوب پارامترهای استخراج‌شده با هم تقریباً مورد استقبال واقع نشده است. گفتنی است توسعه این روش به‌منظور فائق‌آمدن بر دشواری استخراج پارامترهای چسبناک به روش معکوس (کالیبراسیون) بوده است. برای استخراج پارامترهای مدل‌های ناحیه چسبناک، به تازگی از روش‌های مستقیم بهره گرفته می‌شود. این روش‌ها یا مبتنی بر مکانیک شکست الاستیک خطی هستند [۲۲] یا بر پایه انتگرال چی استوارند [۲۳]. با وجود اینکه استفاده از این روش انتخاب قانون کشش - جدایش و شناخت رفتار چسب را تسهیل می‌کند، اما همچنان در معدودی از موارد دسته پاسخ یکتایی برای پارامترهای چسبناک مدل انتخاب شده به‌دست نمی‌دهد. به‌علاوه این روش مستلزم ثبت داده‌های آزمایشگاهی دقیق می‌باشد که اجرای آزمون‌های تجربی را زمان‌بر و حتی غیرقابل اعتماد (نیاز به تکرارپذیری بیشتر) می‌کند. به‌طوری‌که در چسب‌های ترد به‌دلیل دشواری پایش ترک، اجرای روش مستقیم به‌ویژه جهت استخراج پارامترهای چسبناک مود دوم تقریباً غیرممکن است.



شکل ۳. آثار انرژی شکست و کشش آزادسازی بر بار واماندگی

استاتیکی [۱۱]

بدین ترتیب جهت استخراج پارامترهای چسبناک توصیه می‌گردد که نخست ماهیت چسب (ترد، نیمه‌ترد یا نرم) با توجه

دیگری می‌باشد. منظور از شناخت چسب، ترد یا نرم بودن آن است؛ زیرا برای چسب‌های ترد، معیارهای مبتنی بر تنش و برای چسب‌های نرم معیارهای مبتنی بر کرنش توصیه می‌گردد. در مقابل، روابط ساختاری مدل‌های پتانسیل پایه این امکان را فراهم می‌آورد که با داشتن پارامترهای مجهول آنها بتوان شکل کلی قانون کشش - جدایش را استخراج کرد. همچنین به کمک این مدل‌ها می‌توان به راحتی ماتریس سفتی مماسی المان‌های چسبناک شبیه‌سازی شده را به دست آورد. محدودیت مدل‌های پتانسیل پایه موجود، به کارگیری آنها را در بارگذاری مود ترکیبی اتصالات چسبی تقریباً غیرممکن ساخته است. از جمله محدودیت‌های مدل‌های پتانسیل پایه این است که رفتار شکست چسبناک را تنها در مود اول می‌توانند مدلسازی نمایند. همچنین برخی از مدل‌ها برای مدلسازی جدایش نسبتاً بزرگ یا واماندگی برشی بین سطحی کامل مناسب نیستند. مدل پرکاربرد زو و نیدلمن نیز تنها برای چسب‌های با ویژگی  $G_{Ic}=G_{IIc}$  قابل استفاده است [۲۸]. بنابراین به کارگیری یک مدل پتانسیل پایه جدید در حوزه اتصالات چسبی ضرورت دارد تا در حد امکان محدودیت‌های مدل‌های قبلی را مرتفع سازد.

## ۵. نتیجه‌گیری

استفاده از اتصالات چسبی در سازه بدنه خودرو به منظور افزایش استحکام استاتیکی و دینامیکی آن موضوعی است که با استقبال طراحان خودروهای جدید روبرو شده است. در این میان، به کارگیری مدل‌های عددی که زمان طراحی اتصال و اجرای آن

را کاهش دهد، بسیار ارزشمند خواهد بود. استفاده از مدل‌های عددی برای پیش‌بینی دقیق استحکام در اتصالات چسبی برای کاهش تعداد تست‌ها در مرحله طراحی ضروری است. در میان مدل‌های آزموده شده برای شبیه‌سازی اتصالات چسبی، مدل‌هایی که پدیده آسیب را در مدلسازی لایه چسب در نظر گرفته‌اند، پاسخ‌های قابل اطمینانی را ارائه می‌دهند. مدلسازی پدیده آسیب در لایه چسب به کمک قوانین کشش - جدایش مبتنی بر جابه‌جایی مؤثر یا قوانین کشش - جدایش پتانسیل پایه صورت می‌گیرد. با این حال، قوانین موجود، خود با محدودیت‌هایی همراه هستند که لازم است آنها جهت بررسی رفتار مکانیکی اتصالات چسبی به ویژه در وضعیت بارگذاری مود ترکیبی مرتفع گردند. از سوی دیگر، شکل قانون کشش - جدایش به ویژه در بارگذاری‌های شبه‌استاتیکی تأثیر قابل توجهی بر رفتار واماندگی اتصالات چسبی دارد. بنابراین ارائه یک مدل ناحیه چسبناک پتانسیل پایه جدید برای غلبه بر محدودیت‌های مدل‌های موجود و استخراج قانون کشش - جدایش کارآمدتر ضروری می‌باشد. نکته حائز اهمیت دیگر تعیین پارامترهای قانون کشش - جدایش مناسب با اتصال چسبی می‌باشد. از میان سه روش معکوس، روش تعیین مشخصه و روش مستقیم توصیه می‌گردد که متناسب با ماهیت چسب (ترد، نیمه‌ترد یا نرم) از روش معکوس برای استخراج پارامترهای چسبناک چسب‌های ترد و از روش مستقیم برای استخراج پارامترهای چسبناک چسب‌های نیمه‌ترد و نرم استفاده شود.

## ۶. مأخذ

- [1] K. Alfredsson, J. L. Högberg, Energy release rate and mode-mixity of adhesive joint specimens, *International Journal of Fracture*, vol. 144, pp. 267-283, 2007.
- [2] L. F. da Silva, P. J. das Neves, R. Adams, J. Spelt, Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature survey, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, pp. 319-330, 2009.
- [3] X. He and S. O. Oyadiji, Influence of mechanical properties of adhesives on stress distributions in lap joints, in *ASME 7<sup>th</sup> Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2004, pp. 397-403.
- [4] M. You, Z.-M. Yan, X.-L. Zheng, H.-Z. Yu, Z. Li, A numerical and experimental study of gap length on adhesively bonded aluminum double-lap joint, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 27, pp. 696-702, 2007.
- [5] X. Zhao, R. Adams, L. F. da Silva, A new method for the determination of bending moments in single lap joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 30, pp. 63-71, 2010.

- [6] M. J. Lee, T. M. Cho, W. S. Kim, B. C. Lee, J. J. Lee, Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 30, pp. 322-328, 2010.
- [7] G. Alfano, M. Crisfield, Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues, *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 50, pp. 1701-1736, 2001.
- [8] D. Xie, S. B. Biggers, Progressive crack growth analysis using interface element based on the virtual crack closure technique, *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 42, pp. 977-984, 2006.
- [9] K. Katnam, A. Crocombe, H. Khoramishad, I. Ashcroft, Load ratio effect on the fatigue behaviour of adhesively bonded joints: an enhanced damage model, *The Journal of Adhesion*, vol. 86, pp. 257-272, 2010.
- [10] M. M. Gift, P. Selvakumar, S. J. Alexis, A review on the Cohesive Zone Models for crack propagation analysis, 2013.
- [11] H. Khoramishad, A. Crocombe, K. Katnam, I. Ashcroft, A generalised damage model for constant amplitude fatigue loading of adhesively bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 30, pp. 513-521, 2010.
- [12] J. Rots, Strain-softening analysis of concrete fracture specimens, *Fracture toughness and fracture energy of concrete*, pp. 137-148, 1986.
- [13] N. Chandra, H. Li, C. Shet, H. Ghonem, Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, pp. 2827-2855, 2002.
- [14] N. Nguyen, A. M. Waas, A novel mixed-mode cohesive formulation for crack growth analysis, *Composite Structures*, 2015.
- [15] K. Y. Volokh, Comparison between cohesive zone models, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 20, pp. 845-856, 2004.
- [16] G. Alfano, on the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 723-730, 2006.
- [17] A. M. G. Pinto, A. Magalhães, R. D. S. G. Campilho, M. de Moura, A. Baptista, Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive, *The Journal of Adhesion*, Vol. 85, pp. 351-376, 2009.
- [18] M. Ridha, V. Tan, T. Tay, Traction-separation laws for progressive failure of bonded scarf repair of composite panel, *Composite structures*, Vol. 93, pp. 1239-1245, 2011.
- [19] S. D. Barros, G. Alfano, L. Champaney, N. Valoroso, Use of cohesive zone models to design automotive bonded joints, *International Journal of Automotive Composites*, Vol. 1, pp. 158-169, 2015.
- [20] M. De Moura, J. Morais, N. Dourado, A new data reduction scheme for mode I wood fracture characterization using the double cantilever beam test, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, pp. 3852-3865, 2008.
- [21] T. Andersson, U. Stigh, The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 413-434, 2004.
- [22] H. Khoramishad, M. Hamzenejad, R. Ashofteh, Characterizing cohesive zone model using a mixed-mode direct method, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 153, pp. 175-189, 2016.
- [23] R. Fernandes, R. Campilho, Numerical evaluation of dissimilar cohesive models to predict the behavior of Double-Cantilever Beam specimens, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 1, pp. 42-49, 2016.



- [24] L. F. da Silva, T. Rodrigues, M. Figueiredo, M. De Moura, J. Chousal, Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength, *The journal of adhesion*, Vol. 82, pp. 1091-1115, 2006.
- [25] K. Katnam, A. Crocombe, H. Khoramishad, I. Ashcroft, The static failure of adhesively bonded metal laminate structures: a cohesive zone approach, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 25, pp. 1131-1157, 2011.
- [26] P. Jousset, M. Rachik, Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 132, pp. 48-69, 2014.
- [27] H. Khoramishad, S. Nasiri, Investigation of the effect of material and geometrical parameters affecting the strength of hybrid adhesive- riveted joints, *Science and Technology of Composites*, Vol. 2, pp. 71-78, 2015.
- [28] K. Park, G. H. Paulino, Cohesive zone models: a critical review of traction-separation relationships across fracture surfaces, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 64, p. 060802, 2011.
- [29] R. Borg, L. Nilsson, K. Simonsson, Simulation of delamination in fiber composites with a discrete cohesive failure model, *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 667-677, 2001.
- [30] H. Khoramishad, A. Crocombe, K. Katnam, I. Ashcroft, Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model, *International Journal of fatigue*, Vol. 32, pp. 1146-1158, 2010.

## پی نوشت

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <hr/> 1. Bonded<br>2. virtual crack closure technique<br>3. nodes<br>4. linear elastic fracture mechanics (LEFM)<br>5. large deformation<br>6. cohesive zone model (CZM)<br>7. phenomenological<br>8. intrinsic<br>9. extrinsic<br>10. intrinsic<br>11. extrinsic<br>12. cubic polynomial<br>13. trapezoidal<br>14. exponential<br>15. smoothed trapezoidal<br>16. bilinear<br>17. adhesive fracture toughness<br>18. initial stiffness<br>19. tripping traction<br>20. Chandra<br>21. double lap joint (DLJ), pull-out test<br>22. Volokh<br>23. cohesive law<br>24. peeling test<br>25. Alfano<br>26. double cantilever beam<br>27. Nossek | <hr/> 28. Marzi<br>29. Tri-linear<br>30. Pinto<br>31. Ridha<br>32. Barros<br>33. triaxiality<br>34. inverse method, calibration method<br>35. property determination technique<br>36. direct method<br>37. Bulk specimen<br>38. localization problems (material instability)<br>39. numerical instability<br>40. non-flat |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|