دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا

پایان‌نامه دکتری مهندسی هوافضا-سازه های هوایی

تحلیل مکانیزمهای خرابی در صفحات کامپوزیتی چندلایه تحت بار کششی محوری با استفاده از تئوریهای لایروایز و مکانیک خرابی- پلاستیسیته محیط‌های پیوسته

نگارش

بیژن محمدی

اساتید راهنما

دکتر حسین حسینی تودشکی

دکتر محمد همایون صدر

آبان ماه ۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ: ۸۷/۱۲/۱۹
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: دانشجوی آزاد ● بورسیه ○ معادل ○

شماره دانشجوئی: ۸۱۲۲۹۹۴۸ دانشکده: مهندسی هوافضا رشته تحصیلی: مهندسی هوافضا گروه: سازه‌های هوایی

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: حسین حسینی تودشکی درجه و رتبه: هیأت علمی دانشکده مهندسی هوافضا، استاد

نام و نام خانوادگی: محمد همایون صدر درجه و رتبه: هیأت علمی دانشکده مهندسی هوافضا، دانشیار

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: - درجه و رتبه: -

نام و نام خانوادگی: - درجه و رتبه: -

عنوان پایان‌نامه به فارسی : تحلیل مکانیزم‌های خرابی در صفحات کامپوزیتی چندلایه تحت بار کششی محوری با استفاده از تئوریهای لایروایز و مکانیک خرابی- پلاستیسیته محیط‌های پیوسته

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی: Damage Mechanism Analysis of Laminated Composites using Coupled Continuum Damage-Plasticity and Layer-Wise Theories

نوع پروژه: کارشناسی ○ ارشد ○ دکترا ● سال تحصیلی:

کاربردی ● بنیادی ● توسعه‌ای ● نظری ○

تاریخ شروع : ۱۳۸۵/۱/۲۸ تاریخ خاتمه : ۱۳۸۷/۸/۲۶ تعداد واحد : ۲۴ سازمان تأمین کننده اعتبار : ---

واژه‌های کلیدی به فارسی: مکانیک خرابی، پلاستیسیته ، مواد مرکب چندلایه، روش اجزاء محدود، تحلیل غیرخطی، مکانیزم خرابی

واژه‌های کلیدی به انگلیسی : Damage Mechanics، Laminated Composite، FEM، Nonlinear Analysis، Damage Mechanisms

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات					تعداد مراجع	تعداد صفحات ضمائم
	۲۷۳	تصویر●	جدول●	نمودار ●	نقشه ○	واژه‌نامه ○	۲۵۷	-
زبان متن	فارسی ●		انگلیسی ○		چکیده	فارسی ●		انگلیسی ●
یادداشت								

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

توسعه آزمایشگاه‌های تحقیقاتی مدرن، امکان ایجاد برقراری ارتباط با صنایع پیشرفته کشور و مشارکت صنعت در تصویب موضوع رساله

دانشجو:

فراهم نمودن شرایط بین دانشگاهی بین‌المللی جهت اعزام دانشجویان تحصیلات تکمیلی به خصوص دکتری جهت فرصت مطالعاتی توسعه آزمایشگاه‌های عددی با کامپیوترهای مدرن سرعت بالا، امکان استفاده از مجلات معتبر خارجی قدیمی‌تر

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

۱ : ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه

۲ : ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی)

❖ تقدیم به همسرم

که این مجموعه دستاورد همیاری، صبر و شکیبایی اوست.

و

❖ تقدیم به پدر و مادرم

که هر آنچه دارم مخلوق آرامش، عشق و کمال آنان است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات اساتید گرامی جناب آقای دکتر **حسین حسینی تودشکی** به عنوان استاد راهنمای اول و جناب آقای دکتر **محمد همایون صدر** به عنوان استاد راهنمای دوم تشکر و قدردانی می‌نمایم. راهنمایی‌های ارزنده و کمک‌های بی‌دریغ ایشان راهگشای من در انجام این رساله بوده است. موفقیت و شادکامی این عزیزان را در تمام مراحل زندگی از خداوند متعال خواستارم.

از تمامی اساتید گرامی و کارکنان محترم دانشکده مهندسی هوافضا که به نحوی مرا در انجام این رساله یاری رسانیده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم. امید است تحقیقات صورت گرفته در این رساله در راه پیشرفت دانش، تاثیرگذار بوده و بتواند راهگشای سایر محققین قرار گیرد.

چکیده

هدف از انجام این رساله توسعه یک مدل خرابی، در چارچوب مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته کوپل است که در ضمن سادگی مشخصه سازی ماده، فیزیک خرابی را در نظر بگیرد، و قابل بکارگیری در انواع هندسه، لایه‌چینی، و بارگذاری چندلایه‌های کامپوزیتی باشد. در این راستا، در چارچوب مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته کوپل با پلاستیسیته، به بحث و بررسی انواع مکانیزم‌های خرابی در مواد مرکب چندلایه، شامل ترک-های ماتریسی و جدایی بین‌لایه‌ای، پرداخته می‌شود. روش پیشنهادی باربرو و همکارانش جهت مشخصه سازی مواد مبنا قرار داده شده و این روش به خرابی‌ها در جهت ضخامت هر لایه بسط داده خواهد شد. از روش انتگرال‌گیری عددی تمام ضمنی پسرو اویلر برای بهنگام نمودن متغیرهای داخلی میدان و برگشت میدان خرابی و پلاستیسیته برروی سطوح خرابی و پلاستیسیته استفاده می‌شود. جهت تحلیل اجزاء محدود چندلایه‌های کامپوزیتی تئوری لایر-وایز جزئی نوع اول، لایر-وایز کامل و لایر-وایز حاوی جدایی بین‌لایه‌ای بسط داده شده و ماتریس سختی هر یک از المانها تعیین خواهند شد. در ادامه کلیات برنامه غیرخطی تهیه شده به همراه اعتبار سنجی هر یک از المان‌های توسعه داده شده در حوزه الاستیک خطی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به نتایج حاصل از روش مشخصه‌سازی مواد باربرو و سطوح خرابی-پلاستیسیته مورد استفاده ایشان، و با اعمال تغییراتی در نحوه مشخصه‌سازی پیشنهادی باربرو، نتایج مدل باربرو در دو حوزه "الاستیک-خرابی" و "الاستیک-پلاستیک-خرابی" با نتایج تست‌های موجود در مراجع مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. به منظور بررسی قابلیت روش مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته در تعیین مکانیزم‌های خرابی در نواحی حاوی تمرکز تنش، پیش‌بینی شروع و نحوه انتشار انواع مکانیزم‌های خرابی در نواحی لبه‌های آزاد نمونه‌های کامپوزیتی، تحت بار کششی یکنواخت، مورد بررسی قرار می‌گیرد. گام‌هایی جهت بهبود نتایج پاسخ تنش-کرنش چندلایه‌ها برداشته می‌شود. در ادامه با اعمال روشی جدید در معیار پلاستیسیته، سطح پلاستیسیته از یک سطح عمومی برگرفته شده از معیار تسای-وو به حالت چند سطحی با استفاده از معیارهای هشین، و ماکزیمم تنش، تغییر خواهد یافت. همچنین به منظور تحلیل جدایی بین‌لایه‌ای در حین فرآیند خرابی، از خواص المان بین‌لایه‌ای همزمان با تئوری مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته استفاده خواهد شد. بدین منظور نحوه اعمال خواص المان بین‌لایه‌ای به المان لایر-وایز توضیح داده خواهد شد. نتایج حاصل از ترکیب تئوری مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته و المان بین‌لایه‌ای با نتایج موجود در مراجع مقایسه خواهند شد. نتایج بدست آمده و مقایسه آن با نتایج تجربی در دو حوزه پاسخ تنش-کرنش معادل چندلایه و بارشکست نشان دهنده کارایی تغییرات اعمالی و روش های پیشنهادی در سطوح مختلفی همچون مشخصه-سازی مواد، معیار خرابی، و معیار پلاستیسیته دارد.

فهرست مطالب

چکیده ..... أ

۱ مقدمه ۱

۲ مروری بر مطالعات گذشته ۹

۲-۱ مروری بر کارهای انجام گرفته با شیوه مایکرومکانیکی ۱۱
۲-۱-۱ خرابی درون لایه ای ۱۱
۲-۱-۲ مدل مک کارتنی ۲۲
۲-۱-۳ خرابی بین لایه ای ۲۶
۲-۱-۴ مطالعات تجربی و عددی چانگ ۳۴

۲-۲ مروری بر مطالعات در حوزه مکانیک خرابی ۳۶

۲-۳ جمع بندی ۴۹

۳ تئوری کوپل خرابی-پلاستیسیته محلی ۵۱

۳-۱ کلیات ۵۲

۳-۲ ترمودینامیک و مکانیک خرابی پیوسته ۵۵
۳-۲-۱ تبدیل تنش ۵۹
۳-۲-۲ تبدیل کرنش الاستیک ۶۲
۳-۲-۳ متغیرهای حالت ۶۴
۳-۲-۴ معادلات حالت ۶۵
۳-۲-۵ نیروهای مزدوج ترمودینامیکی ۶۷
۳-۲-۶ پتانسیل اتلاف و قوانین جریان ۷۰
۳-۲-۷ شرایط تسلیم و خرابی ۷۲
۳-۲-۸ شرایط سازگاری خرابی و پلاستیسیته ۷۴
۳-۲-۹ مدول مماسی خرابی-الاستیک-پلاستیک ۷۷
۳-۲-۱۰ معادلات حاکم بر میله تک محوری ۷۸

۳-۳ مدل پیشنهادی باربرو ۸۳
۳-۳-۱ پارامترهای خرابی ۸۴
۳-۳-۲ سطح خرابی پیشنهادی ۸۵

۳-۳-۳ سطح تغییر شکلهای بازگشت ناپذیر ۸۶
۳-۳-۴ مشخصه سازی مواد ۸۷

۳-۴ جمع بندی ۹۳

۴ الگوریتم انتگرال گیری عددی از معادله متشکله ۹۵

۴-۱ روند عمومی انتگرال گیری ضمنی ۹۶

۴-۲ روش تمام ضمنی پسرو اویلر ۱۰۰

۴-۳ عملگر مماس سازگار ۱۰۴

۴-۴ جمع بندی ۱۰۶

۵ تئوری صفحات لایر-وایز در روش اجزاء محدود ۱۰۷

۵-۱ تئوری لایر-وایز نوع اول ۱۱۱
۵-۱-۱ روابط کرنش-جابجایی ۱۱۳
۵-۱-۲ روابط تنش-کرنش ۱۱۴
۵-۱-۳ محاسبهٔ ماتریس سختی المان ۱۲۰

۵-۲ تئوری لایر-وایز کامل ۱۲۳
۵-۲-۱ روابط کرنش-جابجایی ۱۲۵
۵-۲-۲ روابط متشکله، کرنش-نیروهای منتجه ۱۲۵
۵-۲-۳ محاسبهٔ ماتریس سختی المان ۱۲۹

۵-۳ محاسبه تنش بین لایه ای ۱۳۳

۵-۴ مدلسازی جدایی بین لایه ای در تئوری لایر-وایز نوع اول ۱۳۸
۵-۴-۱ روابط کرنش-جابجایی ۱۳۸
۵-۴-۲ روابط متشکله، کرنش-نیرو و ممانهای منتجه ۱۳۹
۵-۴-۳ محاسبهٔ ماتریس سختی المان ۱۴۲

۵-۵ تحلیل خطی استاتیکی ۱۴۵

۵-۶ حل غیرخطی استاتیکی ۱۴۷
۵-۶-۱ روش سختی اولیه ۱۴۸
۵-۶-۲ روش سختی مماسی ۱۴۹
۵-۶-۳ روش نیوتن-رافسون ۱۴۹

۵-۷ صحه گذاری عددی استاتیک خطی ۱۵۰
۵-۷-۱ صفحه تحت بارگذاری عرضی، فشاری سینوسی ۱۵۰
۵-۷-۲ صفحه یک سر درگیر حاوی جدایی بین لایه ای ۱۵۴

۵-۸ جمع بندی ۱۵۵

۶ نتایج تحلیل خرابی چندلایه های کامپوزیتی تحت بار محوری ۱۵۶

۶-۱ مشخصه سازی مواد ۱۵۶

۶-۲ تک لایه تحت بارگذاری های خالص کششی و برشی ۱۶۰
۶-۲-۱ تک لایه تحت کشش طولی در جهت الیاف ۱۶۱
۶-۲-۲ تک لایه تحت بار کششی عرضی در جهت ماتریس ۱۶۲
۶-۲-۳ تک لایه تحت بار برشی درون صفحه ای 2-1 ..... ۱۶۴
۶-۲-۴ تک لایه تحت بار برش خارج صفحه 3-1 ..... ۱۶۵
۶-۲-۵ تک لایه تحت بار برش خارج صفحه 3-2 ..... ۱۶۷
۶-۲-۶ تک لایه تحت کشش خارج صفحه ۱۶۸

۶-۳ تحلیل مکانیزمهای خرابی در چندلایه ها ۱۷۰
۶-۳-۱ پاسخ تنش-کرنش چندلایه های کامپوزیتی تحت بار کشش طولی ۱۷۲
۶-۳-۲ مطالعه تاثیر لبه های آزاد با استفاده از مکانیک خرابی ۱۷۷
۶-۳-۳ تأثیر دسته ای شدن لایه ها در یک لایه چینی بر روی خرابی چندلایه ۱۸۳
۶-۳-۴ اثرات ترتیب لایه ها در یک نوع لایه چینی بر مکانیزم های خرابی چندلایه ۱۸۶
۶-۳-۵ خرابی تحت اثر لبه های آزاد با استفاده از تحلیل الاستیک-پلاستیک-خرابی ۱۸۸

۶-۴ جمع بندی فصل ۱۹۱

۷ پیشنهاد سطوح پلاستیسیته و خرابی چندگانه با مشخصه سازی جدید مواد ۱۹۳

۷-۱ بکارگیری معیارهای هشین بعنوان سطوح پلاستیسیته چندگانه ۱۹۵

۷-۲ سطح و پتانسیل خرابی نوع B ۱۹۷

۷-۳ سطح و پتانسیل خرابی نوع C ۲۰۱

۷-۴ سطح و پتانسیل خرابی نوع D ۲۰۱

۷-۵ تاثیرحذف تنشهای فشاری از سطح و پتانسیل خرابی ۲۰۵

۷-۶ سطوح پلاستیسیته تنش بیشینه ۲۰۹

۷-۷ نتایج بار شکست ۲۱۳

۷-۸ جمع بندی ۲۱۴

۸ اعمال المان بین لایه ای در تئوری لایر-وایز حاوی خرابی-پلاستیسیته ۲۱۶

۸-۱ المانهای بین لایه ای ۲۱۸

۸-۲ معرفی المان بین لایه ای دوخطی ۲۱۹

۸-۲-۱ معادلات متشکله المان بین لایه ای دوخطی ۲۲۰

۸-۲-۲ قانون متشکله نرم شونده خطی ۲۲۲

۸-۲-۳ پیش بینی رشد جداشدگی با استفاده از مدل خطی ۲۲۴

۸-۳ پیشنهاد قانون متشکله ای در چارچوب مکانیک خرابی ۲۲۷

۸-۳-۱ سطح خرابی بین لایه ای ۲۲۸

۸-۳-۲ قوانین متشکله و گسترش خرابی ۲۲۹

۸-۴ اعمال المان بین لایه ای در المان لایر-وایز کامل ۲۳۰

۸-۵ نتایج مدلسازی اجزاء محدود ۲۳۲

۸-۵-۱ استفاده از المان لایر-وایز بین لایه ای در تحلیل الاستیک اثرات لبه های آزاد ۲۳۲

۸-۵-۲ تأثیر تعداد تقسیمات بعنوان لایه های عددی در راستای ضخامت چندلایه ۲۳۳

۸-۵-۳ اعمال بار تک جهته به لایه بین لایه ای المان لایر-وایز ۲۳۶

۸-۶ تحلیل جدایی بین لایه ای در چندلایه ها با حضور المان بین لایه ای ۲۴۰

۸-۷ جمع بندی فصل ۲۴۶

۹ نتیجه گیری و پیشنهادات ۲۴۷

۹-۱ نتیجه گیری ۲۴۷

۹-۲ دستاوردها ۲۵۲

۹-۳ پیشنهادات ۲۵۴

۱۰ مراجع و منابع ۲۵۶

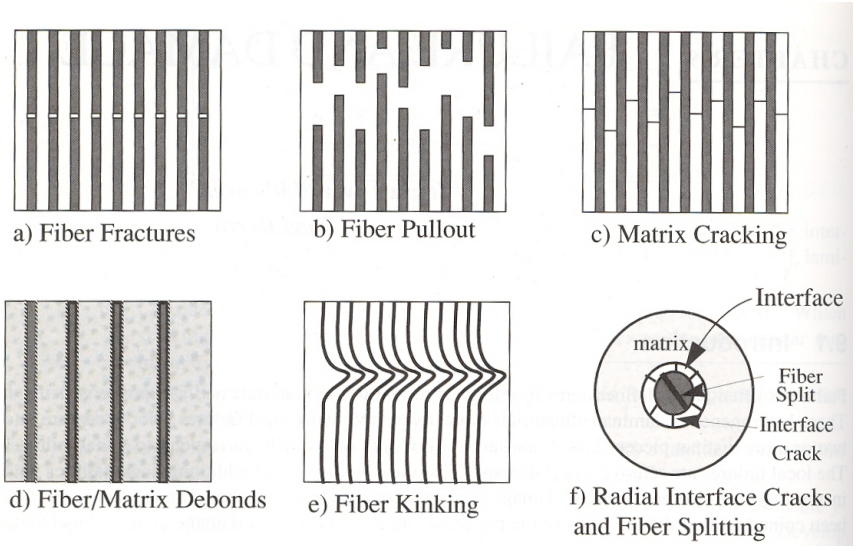
۱ مقدمه

امروزه اهمیت و قابلیت‌های فراوان مواد مرکب بر کسی پوشیده نیست. در حوزه‌های متعددی، این مواد رقیب سرسختی برای مواد سنتی مانند فلزات محسوب می‌شوند. از مهمترین خواص مورد توجه این مواد، نسبت مقاومت و سختی به وزن بالای آنهاست که باعث کاربرد گسترده این مواد در صنایع مختلف هوافضا شده است.

«مواد مرکب» از دو یا چند ماده با مقیاس ماکروسکوپی تشکیل شده‌اند. خواص این مواد چند جزئی می‌تواند بطور ترکیبی از هرکدام از اجزاء مناسب‌تر بوده و اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود بخشند. فاز ماتریس و تقویت کننده دو جزء تشکیل دهنده هر لایه ماده مرکب می‌باشند. فاز ماتریس، فاز تقویت‌کننده را احاطه نموده و می‌تواند پلیمری با خواص گرماسخت یا گرمانرم باشد. فاز تقویت کننده درون ماتریس پخش شده است. یک صفحه ماده مرکب لایه‌ای شامل لایه‌هایی از تک‌لایه‌های مرکب است که در هر لایه، راستای الیاف می‌تواند متفاوت از سایر لایه‌ها چیده شود. مواد مرکب چندلایه می‌تواند بگونه‌ای طراحی شوند که دارای نسبت مقاومت به وزن و یا سختی به وزن بالا و تحت کنترل باشد. همچنین سختی و مقاومت صفحات مرکب چندلایه را می‌توان در جهات دلخواه، تقویت نمود. این ویژگی یکی از دلایل مهم جایگزینی تدریجی مواد مرکب به جای مواد سنتی مرسوم، نظیر فلزات، در صنایع مختلفی همچون صنعت هوافضا، می‌باشد.

با وجود خواص ویژه و منحصر به فرد مواد مرکب، استفاده از این مواد می‌تواند همراه با مشکلات جدی و نسبتاً پیچیده‌ای نیز باشد. در بسیاری از موارد، ناشناخته‌های خواص مکانیکی و مکانیزم‌های خرابی این مواد که نسبت به مواد سنتی ایزوتروپیک قابل توجه است، با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان[1] بالا، جبران می‌شود. استفاده از ضرایب اطمینان بالا در طراحی، خود باعث افزایش وزن نهایی سازه خواهد شد و از مزیت نسبی مواد مرکب خواهد کاست. لذا بررسی و شناخت دقیق خواص مکانیکی و مقاومت در برابر انواع بارگذاری‌ها، می‌تواند امکان استفاده بهینه‌تر از خواص بالقوه مواد مرکب را افزایش دهد. تمایل به استفاده حداکثری از قابلیت تحمل بار مواد، همواره محرک خوبی برای مطالعات در زمینه ایجاد و رشد خرابی در سازه‌های کامپوزیتی بوده است. هدف نهایی این تلاش‌ها، ایجاد امکان اعمال بار بیشتر برای مدت طولانی‌تر به صورت مطمئن و ایمن بر سازه‌ها می‌باشد.

شکست چندلایه‌های کامپوزیتی تحت اثر بارگذاری استاتیکی و یا خستگی مکانیکی یا حرارتی، فرآیندی پیچیده است. تحلیل خرابی مواد مرکب، یکی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی اخیر محققان می‌باشد که بصورت تئوری و تجربی در جریان است. یک اصل مهم در طراحی مواد مرکب، شناخت مکانیزم‌های خرابی، در حین بارگذاری‌های متنوع تا شکست نهایی است. فرآیند خرابی مواد مرکب چندلایه، تحت بارگذاری شبه استاتیکی و یا خستگی همراه با انباشت پیوسته و مداوم ترک‌های درون لایه‌ای و بین‌لایه‌ای می‌باشد. این فرآیند شامل تجمع پیوسته انواع مختلفی از خرابی‌های درون و بین لایه‌ای است که بطور تدریجی سبب کاهش سختی و مقاومت سازه می‌شوند.

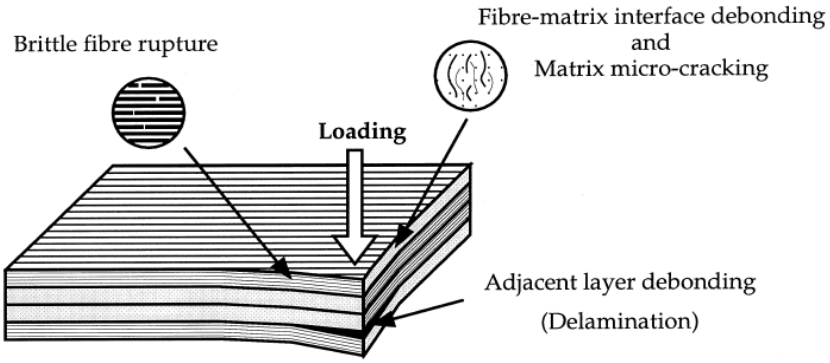


شکل ۱–۱ مکانیزمهای خرابی در مقیاس میکرو [1]

[1] Safety Factor

در مقیاس میکرو، خرابی مواد مرکب را می‌توان به شکست الیاف، جدایی بین الیاف و ماتریس، کمانش الیاف، دو نیم شدن الیاف، پیچ‌خوردگی الیاف، ترک‌خوردگی ماتریسی و ترکهای شعاعی تقسیم نمود. این خرابی‌ها بصورت شماتیک در شکل ۱–۱ آمده است. در چندلایه‌های کامپوزیتی مکانیزم‌های اصلی خرابی عبارتند از:

۱. افت خواص درون‌لایه‌ای: این مکانیزم مربوط به کاهش استحکام در مقیاس خیلی کوچک (مقیاس الیاف)، جدا شدن اتصال ماتریس و الیاف، و یا شکست ماتریس بین الیاف می‌باشد. این کاهش خواص به طور محلی (در مقیاس لایه اولیه) هموژن فرض می‌شوند.
۲. افت خواص عرضی درون‌لایه‌ای: این مکانیزم مربوط به خرابی‌های پخش‌شده بصورت ترکهای عرضی موازی الیافی است که به طور کامل در راستای لایه اولیه گسترده شده‌اند. مطالعات گسترده‌ای در این زمینه با روش‌های مایکرومکانیک که در قسمت‌های بعد تشریح خواهند شد، در دسترس می‌باشد.
۳. افت خواص محل اتصال‌لایه‌ها: این مکانیزم ترک‌های ریز موجود در لایه ماتریس بین‌لایه را در نظر می‌گیرد.
۴. جدایی بین‌لایه‌ای پراکنده: ترک‌های ریز عرضی در راستای ضخامت لایه اولیه رشد کرده و در سطح بین لایه‌ها رشد آنها متوقف می‌شود. بنابراین در نوک این ترک‌های ریز، نواحی تنش بالا ایجاد گشته که منجر به افت محلی سطح بین دو لایه می‌شود.
۵. شکست الیاف: می‌توان این خرابی را در بارگذاری فشاری و یا کششی مشاهده نمود.



شکل ۱–۲ مکانیزمهای خرابی و شکست [2]

در مقیاس چندلایه‌ای، خرابی‌های پیشرونده را می‌توان در چهار سناریوی خرابی ذیل خلاصه نمود[3]:

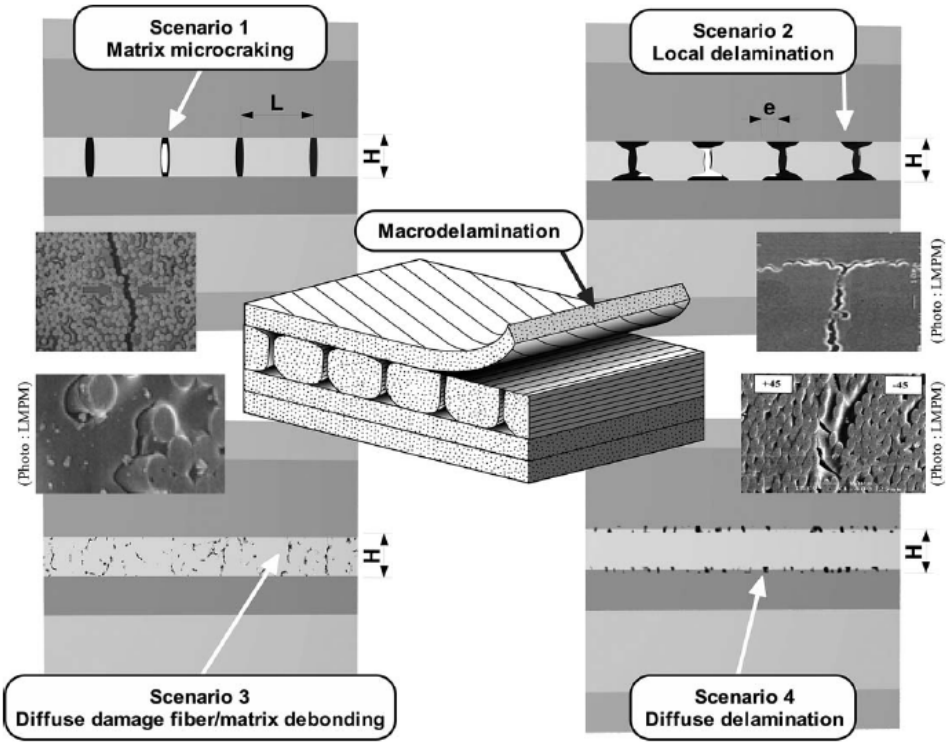
- سناریوی ۱، ایجاد ترکهای ماتریسی: فرض می‌شوند که این ترک‌ها در تمام طول ضخامت یک لایه قرار می‌گیرند. می‌توان این ترک‌ها را بطور تکرار شونده در سطح در نظر گرفت.

- سناریوی ۲، جداشدگی‌بین‌لایه‌ای محلی: این حالت مربوط به خراب‌شدگی بین‌لایه‌ای در نوک ترک‌های عرضی می‌باشد. این شکل خرابی نیز بصورت تکرارشونده درنظر گرفته می‌شوند.
- سناریوی ۳، جداشدن اتصال بین الیاف و ماتریس: این حالت یک مکانیزم اساسی به منظور شرح رفتار لایه مخصوصاً تحت بار برشی است.
- سناریوی ۴: ابعاد کوچکتری از سناریوی ۲ که در این حالت حفره‌های ریز ایجاد می‌شوند.

در شکل ۱–۳ این چهار سناریو بطور شماتیک ترسیم شده است. لازم به ذکر است که خرابی اساساً با سناریوی ۳ و ۴ شروع شده و پس از مدتی سناریوی ۱ آغاز می‌شود. هنگامی که تعدادی جدایی بین الیاف و رزین در داخل یک لایه، بوقوع پیوست این جدایش‌ها به هم رسیده و تشکیل یک ترک عرضی را می‌دهند. این فرآیند در شکل ۱–۴ نیز بوضوح قابل مشاهده است. یکی از مهمترین مشخصه‌های خرابی یک چندلایه، "کرنشِ اولین ترک خوردگی" در چندلایه است که بیانگر حد تحمل چندلایه، بدون وجود هیچگونه آسیبی که باعث افت سختی و یا مقاومت شود، می‌باشد. بعد از این که کرنش به کرنش حدی رسید خرابی بصورت تدریجی و پایدار در حین افزایش بار، شروع به رشد خواهد نمود. میزان خرابی در یک تک لایه عموماً با چگالی ترک در آن لایه سنجیده می‌شود.

مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که مرحله و زمان شروع هر مود خرابی تحت تأثیر پارامترهای مختلفی همچون هندسه چندلایه، ضخامت لایه‌های مختلف، طبیعت الیاف و ماتریس، نوع بارگذاری و تاریخچه آن است.

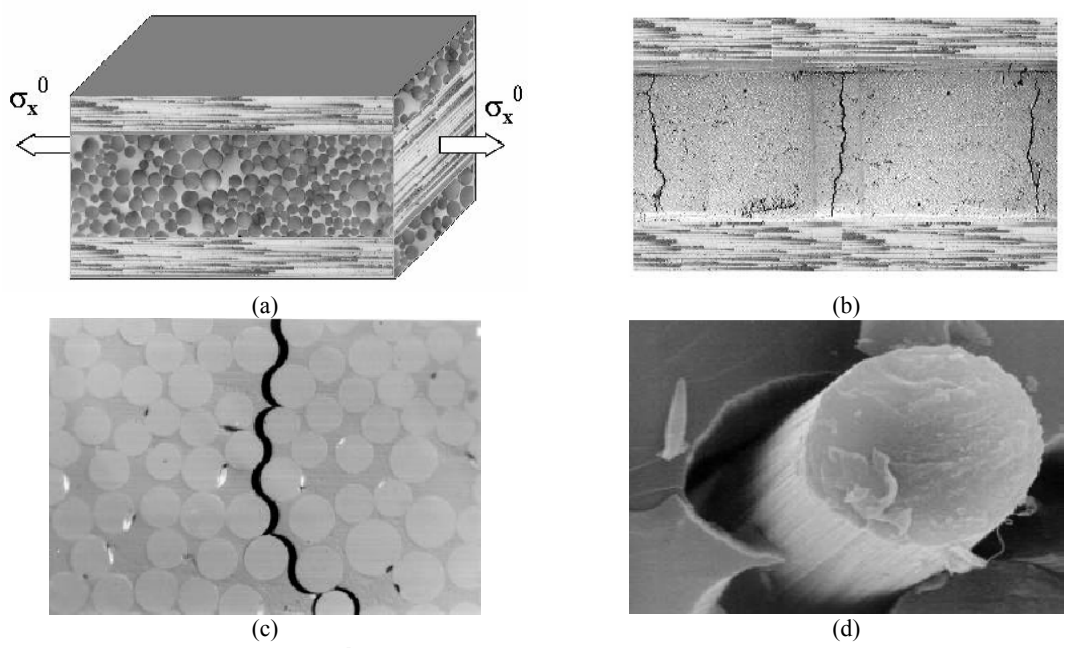
بنابر آنچه که ذکر شد، یکی از اولین خرابی‌های رایج در چندلایه‌ای‌های مواد مرکب، ترک‌های ماتریسی عرضی در لایه های ۹۰ درجه یا لایه‌های غیر هم محور با بارگذاری می‌باشد. این ترک‌ها می‌توانند در حین بار کششی، بارگذاری خستگی، و یا بارگذاری حرارتی پدید آیند. این ترک‌ها یک عامل مهم رفتار غیرخطی در مواد مرکب می‌باشد. ترکهای عرضی یک شکل خرابی پیشرونده هستند که با افزایش کرنش اعمال شده بر چندلایه‌ای افزایش می‌یابند. معیار اندازه‌گیری این شکل خرابی، چگالی ترک در سطح لایه می‌باشد. افزایش چگالی ترک‌های عرضی، منجر به تغییرات در خواص الاستیک چندلایه از قبیل مدول یانگ در جهت طولی و نسبت پواسون می‌گردد. نکته بسیار مهم در بررسی خرابی مواد مرکب چندلایه، اثرات برهم‌کنش و تقابل خرابی‌های مختلف بر روی هم می‌باشد. یکی از رایج‌ترین این موارد، اثر متقابل ترک‌های عرضی بر جدایی بین‌لایه‌ای و برعکس می‌باشد.



شکل ۱–۳ سناریوی خرابی مهم در مقیاس میکرو [3]

ترک‌های ماتریسی پس از گسترش، یا در مرز بین دو لایه متوقف می‌شوند و یا به سبب تمرکز تنش بالا نوک ترک در مرز بین دو لایه باعث بوجود آمدن خرابی بین‌لایه‌ای (جدایی بین‌لایه‌ها[1]) خواهند شد. پس از رسیدن چگالی ترک عرضی به یک حد معین، مابین سناریوی ۱ و ۲ اندرکنشی بوقوع می‌پیوندد و پس از آن عموماً خرابی با سناریوی ۲ یعنی گسترش جدایی بین‌لایه‌ای تا مرز شکست چندلایه پیش خواهد رفت. طبیعت شکل‌گیری سناریوی دوم و نحوه رشد جداشدگی بین‌لایه‌ای نه تنها وابسته به سناریوی اول است، بلکه به سه پارامتری که برای ترک‌های عرضی ارائه شد (طبیعت الیاف و ماتریس، هندسه، نوع و تاریخچه بارگذاری) نیز، بستگی دارد. به عنوان مثال در چندلایه‌های ضخیم مشاهده می‌شود که با افزایش تنش نرمال σ_{zz} و تنش بین‌لایه‌ای σ_{xz}، پیدایش و رشد جداشدگی بین‌لایه‌ای تسریع می‌یابد [5-6] . همچنین، در چندلایه‌های نازک مود خرابی می‌تواند متفاوت باشد، در برخی تحقیقات [5، 7-8] مشاهده شده است که در چندلایه‌های نازک، پس از شکل‌گیری ترک‌های عرضی با افزایش بارگذاری، ترک‌های طولی نیز شروع به رشد خواهند نمود. در این حالت جدایش بین لایه‌های 0^o و 90^o و نزدیک ترک‌های طولی و عرضی، اتفاق افتاده و در نهایت شکست الیاف پس از اعمال بار بیشتر بوقوع می‌پیوندد.

[1] Delamination



شکل ۱–۴ چگونگی گسترش ترک‌های ماتریسی [4]

(a) لایه‌چینی متعامد همراه بارگذاری؛ (b) تشکیل ترک‌های ماتریسی در لایه 90^0 درجه

(c) و (d) پیدایش ترک‌های عرضی از محل تماس الیاف و رزین

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان انتظار داشت که یکی از مهمترین مسایل مورد تحقیق در حوزه مواد مرکب بررسی مکانیزم‌های خرابی و چگونگی شروع، رشد و گسترش آن می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های خاص مکانیزم‌های خرابی، توسعه روشی جامع که بتواند همه انواع خرابی و اثرات انها را در خواص مکانیکی، در برگیرد از اهمیت خاصی بر خوردار می‌باشد. یکی از روش‌هایی که در دو دهه اخیر در بررسی خرابی مواد مرکب مورد توجه قرار گرفته، مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته می‌باشد. این روش در چارچوب قوانین ترمودینامیک، بستری را فراهم آورده است تا بتوان با استفاده از آن اثرات انواع خرابی‌ها را در کاهش سختی و مقاومت ماده مورد بررسی قرار داد. با وجود برخورداری این شیوه از مزایای منحصربه فردی مانند عدم وابستگی به هندسه، بارگذاری و یا جنس الیاف، بکارگیری آن می‌تواند همراه با مشکلاتی نیز باشد. از مهمترین مشکلات روش مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته می‌توان به فرآیند مشخصه سازی مواد و آزمایش‌های غیراستاندارد مورد نیاز و پر هزینه آن اشاره نمود. تمرکز تحقیقات اخیر محققان بر روی بسط و توسعه مدل‌های خرابی، به گونه‌ایست که روند مشخصه سازی مواد آن عمومی‌تر، کم هزینه‌تر، و دارای وابستگی کمتر به آزمایش بوده، و آزمایش‌های مورد نیاز نیز استاندارد باشند.

هدف از انجام این رساله توسعه مدل خرابی است که بطور مناسب تعادلی بین زمان و پیچیدگی محاسبات، و سادگی مشخصه سازی تجربی ماده، برقرار نماید، فیزیک خرابی را در نظر بگیرد، و قابل

استفاده در انواع هندسه، لایه‌چینی، و بارگذاری چندلایه‌های کامپوزیتی باشد. در این راستا، در چارچوب مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته کوپل با پلاستیسیته، به بحث و بررسی انواع مکانیزم‌های خرابی در مواد مرکب چندلایه، شامل ترک‌های ماتریسی و جدایی بین‌لایه‌ای، پرداخته می‌شود. روش پیشنهادی باربرو[1] و همکارانش جهت مشخصه سازی مواد مبنا قرار داده شده و به خرابی‌ها در جهت ضخامت هر لایه بسط داده خواهد شد. با اعمال تغییراتی در نحوه مشخصه‌سازی پیشنهادی باربرو، قدم‌هایی جهت بهبود نتایج پاسخ تنش-کرنش چندلایه‌ها برداشته می‌شود. در ادامه با اعمال روشی جدید در معیار پلاستیسیته، سطح پلاستیسیته از یک سطح عمومی برگرفته شده از معیار تسای-وو[2] به حالت چند سطحی با استفاده از معیارهای هشین[3]، و ماکزیمم تنش، تغییر خواهد یافت. همچنین به منظور تحلیل جدایی بین‌لایه‌ای در حین فرآیند خرابی، از خواص المان بین‌لایه‌ای همزمان با تئوری مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته استفاده خواهد شد.

در فصل دوم رساله به تحقیقات صورت گرفته در زمینه شناخت و تحلیل مکانیزم‌های خرابی چندلایه‌های کامپوزیتی بر اساس روشهای مایکرومکانیکی و مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته پرداخته خواهد شد. در فصل سوم مبانی اصلی مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته به همراه جزئیات مدل پیشنهادی باربرو و همکارانش آورده می‌شود. در فصل چهارم رساله روش انتگرال‌گیری عددی پیشنهادی برای بهنگام نمودن متغیرهای داخلی میدان و برگشت میدان خرابی و پلاستیسیته برروی سطوح خرابی و پلاستیسیته با جزئیات کامل آورده شده است. در فصل پنجم تئوری لایر-وایز جزئی نوع اول، لایر-وایز کامل و لایر-وایز حاوی جدایی بین‌لایه‌ای بسط داده شده و ماتریس سختی هر یک از المانها تعیین خواهند شد. سپس در ادامه کلیات برنامه غیرخطی تهیه شده به همراه اعتبار سنجی هر یک از المان‌های توسعه داده شده در حوزه الاستیک خطی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل ششم نتایج مدل باربرو در وضعیت سه بعدی تشریح شده در فصل سوم، در دو حوزه "الاستیک-خرابی" و "الاستیک-پلاستیک-خرابی" با نتایج تست‌های موجود در مراجع مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. به منظور بررسی قابلیت روش مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته در تعیین مکانیزم‌های خرابی در نواحی حاوی تمرکز تنش، پیش‌بینی شروع و نحوه انتشار انواع مکانیزم‌های خرابی در نواحی لبه-های آزاد نمونه‌های کامپوزیتی، تحت بار کششی یکنواخت، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل هفتم

[1] Barbero
[2] Twai-Wu
[3] Hashin

مشخصه‌سازی پیشنهادی جهت اصلاح مدل "باربرو" تشریح خواهد شد. پس از این اصلاحات، پلاستیسیته چند سطحی بر اساس سطوح مطرح شده هشین به مدل محیط‌های پیوسته اضافه خواهد شد. سپس نتایج بدست آمده از مدل پیشنهادی، با نتایج بدست آمده در فصل ششم، و نتایج تست-های موجود مقایسه می‌شوند. به منظور مدلسازی پیدایش و گسترش جدایی بین‌لایه‌ای در چندلایه-های کامپوزیتی، در فصل هشتم نحوه اعمال خواص المان بین‌لایه‌ای به المان لایر-وایز توضیح داده خواهد شد. در فصول ششم الی هشتم انواع متنوعی از چندلایه‌های کامپوزیتی که نتایج تجربی پیشروی خرابی آنها در مراجع موجود می‌باشد، با استفاده از برنامه توسعه داده شده، تحلیل خواهند شد و نتایج پیشروی خرابی‌های مختلف در این چندلایه‌ها مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

۲ مروری بر مطالعات گذشته

طراحی سازه‌های کامپوزیتی بطور سنتی بر اساس معیارهایی تجربی از قبیل معیار تنش ماکزیمم، معیار کرنش ماکزیمم، معیار تسای هیل[۱]، معیار تسای- وو[۲]، معیار چانگ[۳]، معیار هشین[۴] و از این دست، صورت پذیرفته است. در دیدگاه ماکرو، چندلایه بصورت یک ماده اُرتوتروپیک با خواص معادل در نظر گرفته می‌شود و شکست آن براساس معیارهای فوق‌الذکر بررسی می‌گردد. با استفاده از معیارهای ذکر شده، تنها می‌توان شکست تک لایه و پس از آن به تدریج با حذف لایه‌های[۵] شکسته شده از فرآیند تحلیل، شکست کلی چندلایه را محاسبه نمود. این معیارها بر اساس دیدگاه مکانیک جامدات هموژن بوده و برای مکانیزم‌های خرابی پیچیده‌ای که در مواد مرکب مشاهده می‌گردد، بخصوص فرآیندهای افت درونی که بخش مهمی از رفتار شکست می‌باشد، دارای دقت و عمومیت کافی نبوده، و نمی‌تواند روشی مناسب برای مدلسازی رشد خرابی پیشرونده باشد.

در مواد مرکب چندلایه، عموماً مکانیزم‌های خرابی، به دو شیوه مایکرومکانیکی بر مبنای حجم نمونه واحد و مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته[۶] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در هر یک از این دو شیوه از

[1] Tsai-Hill
[2] Tsai-Wu
[3] Chung
[4] Hashin
[5] Ply Discount
[6] Continuum Damage Mechanics

مکانیک شکست و یا مکانیک خرابی جهت پیش‌بینی و گسترش خرابی استفاده می‌شود. در شیوه مایکرومکانیکی، تحلیل تنش ماده مرکب تخریب شده در حضور خرابی صورت می‌پذیرد. انواع مختلفی از خرابی ها بطور مستقیم و با هدف پیش‌بینی شروع و رشد خرابی و تأثیراتشان در خواص مکانیکی و فیزیکی چندلایه مورد تحلیل قرار می‌گیرند. از آنجایی که حتی در موادِ ایزوتروپِ هموژن نیز، اغلب امکان بدست آوردن حل دقیق در حوزه تئوری الاستیسیته خطی وجود ندارد، تحلیل تنش چندلایه-های مواد مرکب حاوی خرابی عموماً بطور تخمینی بدست می‌آید. اگر اندرکنش بین انواع مختلفی از خرابی نیز در میان باشد، میدان تنش را می‌توان تنها از روشهای عددی مانند روش اجزاء محدود بدست آورد که بسیار پر هزینه و زمان‌بر خواهند بود [9-10]. در بیشتر مطالعات صورت گرفته، در مراحل اولیه، اثر ترک‌های ماتریسی بر خواص مکانیکی چندلایه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، جداشدگی بین‌لایه‌ای بررسی شده و در انتها مودهای شکست بگونه‌ای پیشنهاد می‌گردند که با نتایج تجربی همخوانی داشته باشند.

رفتار غیرخطی مواد میتواند وابسته به دو عامل اساسی "خرابی" و "پلاستیسیته" باشد [11]. "پلاستیسیته" که ناشی از نابجایی در راستای صفحات لغزنده کریستالی می‌باشد و "خرابی" شامل ترکهای ریز، حفره‌های ریز، رشد و بهم پیوستن آنها، جداشدگی در ماده[1] و ترک‌های قرار گرفته در مرز دانه‌ها و شکاف‌ها در نواحی با تمرکز تنش می‌باشد. این دو پدیده باعث کاهش خواص چندلایه شده و میتوان آنها را به کمک تئوری پلاستیسیته و مکانیک خرابی تحلیل نمود. با توجه به محدودیت‌های روش مایکرومکانیکی در مدلسازی خرابی و یا پلاستیسیته در لایه‌چینی و بارگذاری-های مختلف، اخیراً شیوه‌ی مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته به منظور پیش‌بینی رفتار ماده در حضور مودهای خرابی مختلف و رشد این خرابی‌ها تا شکل‌گیری ترک ماکروسکوپی و در نهایت شکست سازه در حال بسط و توسعه می‌باشد. استفاده از شیوه مکانیک خرابی محیطهای پیوسته بدین گونه است که تأثیرات انواع مختلفی از خرابی در یک تانسور خرابی در نظر گرفته می‌شوند [12-16]. ماده مرکب نیز یک محیط پیوسته فرض شده و در آن مشخصات مکانیکی، به تانسور خرابی وابستگی دارند. توضیحات بیشتر در این باره در ادامه این فصل ارائه خواهد شد.

[1] decohesion

۲-۱ مروری بر کارهای انجام گرفته با شیوه مایکرومکانیکی

اکثر مطالعات صورت پذیرفته بر روی خرابی چندلایه‌های کامپوزیتی به روش مایکرومکانیکی، و با در نظر گرفتن فرضیاتی ساده کننده بوده است. در این بخش مروری اجمالی بر روی مطالعات صورت گرفته در دو حوزه خرابی درون لایه‌ای و بین‌لایه‌ای و مطالعات تجربی و عددی موجود، صورت خواهد پذیرفت.

۲-۱-۱ خرابی درون لایه‌ای

اولین نوع خرابی که در طول مراحل اولیه فرآیند شکست یک چند لایه مشاهده می‌شود، خرابی درون لایه‌ای است که به فرم ترکهای ماتریسی به موازات و عمود بر الیاف در لایه‌های غیر هم محور بوجود می‌آید. ترکهای ماتریسی قبل از اینکه چندلایه قابلیت تحمل بار خود را به میزان قابل توجهی از دست دهد، ظاهر می‌شود. آنها بطور تدریجی باعث کاهش سختی و مقاومت [17] چندلایه خواهند شد. همچنین ترک‌های ماتریسی می‌توانند سبب تغییر ضریب انبساط حرارتی [18]، جذب رطوبت [19]، و فرکانس طبیعی [20] چندلایه شوند. ترک‌های ماتریسی باعث نشتی در مخازن تحت فشار از جنس مواد مرکب شده و از این جهت نیز حائر اهمیت فراوان هستند. همچنین ترکهای ماتریسی می-توانند سرآغاز خرابی‌های مهم دیگری که دارای خطرات بیشتری نیز هستند، باشند. تمرکز تنش موجود در نوک ترک‌های ماتریسی بهنگام رسیدن به صفحه بین دو لایه می‌تواند با تمرکز تنش بالای بین دو لایه مجاور، همسو شده و باعث بوجود آمدن جدایی بین لایه ها و یا ترکهای ماتریسی در لایه مجاور و یا هر دو مکانیزم بطور همزمان شود[24-21]. جدایی بین لایه ها ممکن است موجب شکست الیاف لایه‌هایی که باربری اصلی چندلایه مربوط به آنها می‌باشد، گردد [23] که موجب کاهش ظرفیت تحمل بار کل چند لایه خواهد شد. مطالعه ترک‌های عرضی را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود:

- شروع ترک ناشی از شکست ماتریس
- شروع ترک بواسطه خرابی سطح میانی الیاف/ماتریس

آقای جوفه[1] [4] پس از مشاهدات و مطالعات بسیار به این نتیجه رسیده است که در اکثر موارد ترک از سطح میانی الیاف/رزین اتفاق می‌افتد. هنگامی که تعدادی جدایی بین الیاف و رزین بوقوع پیوست این

[1] Joffe