دانشگاه صنعتی امیر کبیر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا

سازه های هوافضایی

تحلیل خرابی جدایش بین لایه‌ای چندلایه‌های کامپوزیتی با استفاده از INTERFACE ELEMENT

نگارش

میثم جلالوند

استاد راهنما

دکتر حسین حسینی تودشکی

استاد مشاور

دکتر حمید رضا اویسی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ:
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی 7

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: میثم جلالوند | دانشجوی آزاد ● | بورسیه ○ | معادل ○

شماره دانشجوئی:84129041 | دانشکده:مهندسی هوافضا | رشته تحصیلی: مهندسی هوافضا گروه: سازه

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: دکتر حسین حسینی تودشکی | درجه و رتبه: استاد

نام و نام خانوادگی: | درجه و رتبه:

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: دکتر حمید رضا اویسی | درجه و رتبه: دانشیار

نام و نام خانوادگی: | درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی : تحلیل خرابی جدایش بین لایه¬ای چندلایه¬های کامپوزیتی با استفاده از INTERFACE ELEMENT

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی: Delamination Analysis of Laminated Composite Material by Using Interface Element

نوع پروژه: کارشناسی ○ کاربردی ○ | ارشد ● بنیادی ○ | دکترا ○ توسعه‌ای ● | سال تحصیلی: نظری ●

تاریخ شروع :85/7/1 | تاریخ خاتمه :87/3/20 | تعداد واحد :6 | سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه‌های کلیدی به فارسی: خرابی مواد مرکب - جدایش بین لایه ای- المان بین لایه ای-مکانیک خرابی پیوسته

واژه‌های کلیدی به انگلیسی : damage of composite materials- delamination- interface element- continuum damage mechanics

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات 123	تصویر● جدول● نمودار ● نقشه ○ واژه‌نامه ○	تعداد مراجع 38	تعداد صفحات ضمائم
زبان متن	فارسی ● انگلیسی ○	چکیده	فارسی ● انگلیسی ●	
یادداشت				

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

1 : 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
2 : 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)

به نام عالم بی همتا

به نام آنکه هستی نام از او یافت
فلک جنبش زمین آرام ازو یافت

خدایی کا فرینش در سجودش
گواهی مطلق آمد از وجودش

تعالی الله یکی بی مثل و مانند
که خوانندش خداوندان خداوند

فلک بر پای دار و انجم افروز
خرد را بی میانجی حکمت آموز

جواهر بخش فکرت های باریک
به روز آرنده شب های تاریک

غم و شادی نگار و بیم امید
شب و روز آفرین و ماه و خورشید

نگه دارنده بالا و پستی
گوا بر هستی او جمله هستی

وجودش بر همه موجود قاهر
نشانش بر همه بیننده ظاهر

کواکب را به قدرت کار فرمای
طبایع را به صنعت گوهر آرای

سواد دیده باریک بینان
انیس خاطر خلوت نشینان

خداوندی که چون نامش بخوانی
نیابی در جوابش لن ترانی

نیاید پادشاهی زوت بهتر
ورا کن بندگی هم اوت بهتر

ورای هر چه در گیتی اساسی است
برون از هر چه در فکرت قیاسی است

به جستجوی او بر بام افلاک
دریده وهم را نعلین ادراک

خرد در جستنش هشیار برخاست
چو دانستش نمی داند چپ از راست

نظامی گنجوی

بنای روزگار بر نیکی و راستی است نه بر کژی و پلشتی، و رادمردانی که این روزگار را به پیش می برند با همتی بلند اصالت را پی می گیرند. ایشان زندگانی اصیل را در گسستن از تار های پلیدی و پیوستن به زلال نیکی می دانند. این آزادگان جان ها را شیفته خود می کنند و تحسین همگان را بر می انگیزند. ارتباط با ایشان ورود به منطقه امن و سرخوشی است و استمرار آن، استقرار در سرزمین آرامش. این تلاش اندک، اگر قابل تقدیم باشد مایلم آن را به افرادی اینچنین تقدیم نمایم، از عزیزانم که هر روزم را با آنان سپری می کنم تا کشاورزی زحمتکش و پر امید در سرزمینی ناشناس که سهم پرندگان را از محصول امسالش فراموش نکرده است.

سپاسگزاری

بدین وسیله *از جناب آقای دکتر حسین حسینی تودشکی* که راهنمایی این پایان نامه را بر عهده داشتند تشکر و قدر دانی می نمایم. بعلاوه لازم است تا از زحمات دوست عزیزم، *جناب آقای مهندس بیژن محمدی* که در کلیه مراحل انجام این پروژه با حوصله ای فراوان یاریم نمودند سپاسگزاری نمایم.

چکیده

هدف از این پایان نامه بررسی و مدلسازی ایجاد و رشد ترک بین لایه ای در مواد مرکب چند لایه می باشد. بدین منظور یک ناحیه خرابی میان لایه های مواد مرکب تعریف می شود. با استفاده از تئوری مکانیک خرابی پیوسته، قانون متشکله بین لایه ای مناسبی برای تخصیص به ناحیه خرابی بسط داده می شود و با انجام فرض های متفاوت، سه مدل الاستیک-پلاستیک، الاستیک-خرابی و الاستیک-پلاستیک-خرابی برای بین لایه بدست می آید. در ادامه روش شناسایی هر کدام ازمدل ها بحث شده و تست هایی که امکان استفاده از نتایج آنها وجود دارد توضیح داده می شوند. به منظور توضیح بخش های توسعه کد محاسباتی، ابتدا المان بین لایه ای بکار گرفته ارائه شده و ماتریس سختی آن بدست می آید. از آنجایی که برخی از مسایلی که قرار است با این کد حل شوند دارای ابعاد و درجات آزادی زیادی می باشند و به منظور استفاده بهینه از حافظه و قدرت محاسبه رایانه، روش ستون های فعال و نحوه ذخیره سازی به کمک آن توضیح داده می شود. برای بررسی قوانین متشکله بدست آمده، بارگذاری مستقیمی روی المان بین لایه به صورت یک جهته و نیز چند جهت اعمال می شود. پس از بررسی هر کدام از مدل در بار گذاری و بار برداری، دو نمونه متفاوت تست DCB حل شده و نتایج آن با نتایج روش های عددی دیگر و نتایج تجربی موجود مقایسه می گردد که انطباق مناسبی بین آنها مشاهده می شود. در انتها برای اولین بار از المان بین لایه برای تعیین بار شکست نهایی تعدادی چند لایه متاثر از پدیده لبه های آزاد استفاده می گردد. این بین لایه ها به گونه ای انتخاب شده اند که تنش برشی در آنها غالب باشد. نتایج بدست آمده از این بخش دارای دقت مناسبی می باشند و نشان دهنده قابلیت این روش در پیش بینی بار نهایی شکست قطعاتی با مود خرابی غالب جدایش بین لایه ای است.

1) مقدمه 1

1-1) خرابي در مواد مركب 3
1-2) جدايش لايه اي مواد مركب 6
1-3) روش هاي تنش-پايه يا مكانيک مواد 8
1-4) رويكرد مكانيک شكست 9
1-5) روش مدلسازي بين لايه اي 12
1-5-1) مدلسازی بینابینی 12
1-5-2) مکانیک خرابی پیوسته و حیطه آن 14
1-5-3) رویکرد مکانیک خرابی پیوسته یک بعدی - مفاهیم مکانیکی متغییر های داخلی 16
1-5-4) قانون تغییرات خرابی و اثرات سه بعدی 18
1-6) موضوع پايان نامه 20
1-7) مطالب اين پايان نامه 21

2) روابط حاكم بر بين لايه 22

2-1)پلاستيسته 24
2-2)روابط متشكله براي بين لايه 31
2-3)تغييرات تنش در حضور همزمان كرنش ماندگار و متغير خرابي 36
2-4) مدل هاي متشكله بين لايه اي 40
2-4-1) مدل الاستیک-پلاستیک 41
2-4-2) مدل الاستیک-خرابی 42
2-4-3) مدل الاستیک-خرابی-پلاستیک 44
2-5) توضيحاتي در مورد مدل هاي معرفي شده 46
2-6) روند ايجاد ترک و جدايش بين لايه 47
2-7) شناسايي مدل هاي بيان شده بين لايه براي مدلسازي جدايش لايه اي مواد مركب 51
2-7-1) مدل الاستیک-پلاستیک 53
2-7-2) مدل الاستیک-خرابی 54
2-7-3) مدل الاستیک- پلاستیک-خرابی 55
2-8) محاسبه متغير هاي خرابي به صورت ديفرانسيلي 56
2-8-1) مدل الاستیک-پلاستیک 57
2-8-2) مدل الاستیک-خرابی 61
2-8-3) مدل الاستیک-پلاستیک-خرابی 63
2-9) خلاصه 65

3) كد رايانه اي 66

3-1) المان هاي استفاده شده 66
3-1-1) المان آجری 67
3-1-2) المان بین لا یه 67
3-2) انتگرال گيري عددي 74

3-3) ذخيره سازي ماتريس سختي 75
3-4) مدل سازي نمونه و شماره گذاري گره ها 78
3-5) حل دستگاه معادلات غير خطي 80
3-6) محاسبه بردار تنش به صورت ديفرانسيلي 83
3-7) اعتبار سنجي برنامه 85
3-7-1) تير يک سرگيردار 85
3-7-2) صفحه با جنس مواد مرکب 88
3-8) خلاصه 90
4) حل چند مثال متداول 92
4-1) اعمال بار يک جهته به المان بين لايه 92
4-1-1) رفتار الاستيک-پلاستيک 94
4-1-2) رفتار الاستيک-خرابی 96
4-1-3) رفتار الاستيک-پلاستيک-خرابی 97
4-1-4) مقايسه سه مدل 99
4-2) اعمال بار در سه جهت 100
4-3) مدلسازي تست DCB 101
4-3-1) نمونه شماره يک 102
4-3-2) نمونه شماره دو 105
4-4) خلاصه 106
5) استفاده از المان بين لايه اي در بررسي خرابي لايه ها 107
5-1) چند لايه هاي مورد بررسي 108
5-1) تحليل الاستيک 110
5-2) بار نهايي شکست 112
5-3) خلاصه 116
6) جمع بندي، نتيجه گيري و پيشنهادات 117
7) مراجع 121

فصل 1

1) مقدمه

امروزه اهمیت و قابلیت های فراوان مواد مرکب بر کسی پوشیده نیست و در حوزه های متعددی، این مواد رقیب سرسختی برای مواد سنتی محسوب می شوند. معروفترین خواص مورد توجه این مواد، نسبت مقاومت به وزن (مقاومت ویژه) و نیز سفتی به وزن (سفتی ویژه) آنها است که باعث کاربرد گسترده این مواد در صنایع هوافضایی نیز شده است. با وجود خواص ویژه و مناسب این مواد، هنوز مشکلات جدی در استفاده از این مواد مطرح است. یکی از مهمترین این مشکلات، پیچیدگی ها و ناشناختگی های به مراتب بیشتر این دسته از مواد نسبت به مواد سنتی است که در بسیاری از موارد، با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان[1] بالا، سعی در رفع آن می شود. از طرفی استفاده از ضرایب اطمینان بالا در زمان طراحی، خود باعث افزایش وزن نهایی سازه ها شده و از مزیت نسبی مواد مرکب می کاهد. لذا بررسی و شناخت دقیق تر خواص این مواد، می تواند امکان استفاده مناسب تر از خواص بالقوه آنها را افزایش دهد.

از سوی دیگر، تمایل به استفاده حداکثری از قابلیت تحمل بار مواد، همواره محرک خوبی برای تحقیق در زمینه ایجاد و رشد خرابی در سازه ها بوده است. هدف نهایی این تلاش ها، ایجاد امکان اعمال بار بیشتر برای مدت طولانی تر به صورت مطمئن و ایمن بر سازه ها می باشد. پیشرفت های فلسفه طراحی هواپیما به سمت در نظر گرفتن مواد واقعی به جای مواد ایده آل، به خوبی موید همین نکته است. دربررسی تاریخ تغییرات مقررات طراحی سازه هواپیما چهار دوره با چهار رویکرد متفاوت قابل تفکیک است]1[:(1)مقاومت ایستایی[2] یا طول عمر بی نهایت(1900 تا 1950) که در آن تنش های مجاز به کسر

[1] Safety Factor
[2] Static Strength

ایمن و مطمئنی از از مقاومت ایستایی سازه محدود می شود. به عبارت دیگر در این دوره هدف اصلی این بوده است که در سازه هیچ خرابی و نقصانی بوجود نیاید. (2)عمر ایمن[1] (1950تا 1960) که بر پایه تشخیص عمر محدود تحت اثر عوامل خرابی نظیر خستگی بود و طی آن یک قطعه بدون نقص، به شرایط طول ترک بحرانی می رسید. در این رویکرد برای اولین بار معلوم شد که شروع ترک، در کسری کمتر از یک چهارم عمر خستگی سازه تشکیل می شود. (3)خرابی ایمن[2] (1960-1975) اذعان دارد به اینکه به وجود آمدن و حضور ترک های خستگی در سازه هواپیما گریز ناپذیر است. لذا تاکید می شود که به کمک ایجاد افزونگی[3] و ایجاد مسیر های متعدد عبور بار جهت گسترش و کاهش تنش از اطراف نوک ترک استفاده شود تا از شکست ترد جلوگیری شود. (4)تحمل خرابی (1975- تا حال) این رویکرد نیز وجود ترک های خستگی را گریز ناپذیر می داند و در آن از مکانیک شکست استفاده می شود تا تعداد چرخه های بار گذاری که به شکست و فرو ریزش خستگی منجر می شود محاسبه شوند تا بازه های زمانی جهت بازبینی سازه تعیین گردد. این کار با استفاده از تحت نظر قرار دادن سه متغییر تعریف شده در این روش یعنی مقاومت باقیمانده سازه دارای خرابی، نرخ رشد خرابی و مکانیزم شروع و رشد خرابی صورت می پذیرد.

تلاش های فوق برای استفاده حداکثری از مواد را می توان به کمک مفاهیم تعریف شده در مکانیک شکست نیز تایید نمود. در روش های سنتی طراحی سازه ها، متغییر های کلیدی طراحی، تنش های اعمالی و مقاومت کششی و یا جاری شدن ماده است اما در روش هایی که از مکانیک شکست برای طراحی استفاده می کنند، سه متغییر تنش های اعمالی، طول ترک و مقاومت در مقابل شکست (چقرمگی[4]) تعیین کننده خط مشی طراحی است]3[. این بدین معنی است که دیگر یک سازه دارای ترک، سازه ای خراب و از رده خارج محسوب نمی شود و شاید بتوان از آن برای مدت طولانی استفاده نمود. این موارد به خوبی اهمیت و ضرورت پرداختن به خرابی مواد مرکب را نشان می دهد. در بخش های آتی این فصل، انواع خرابی های ممکن در مواد مرکب بیشتر توضیح داده می شود.

[1] Safe-Life Design
[2] Fail-Safe Design
[3] Redundancy
[4] Toughness

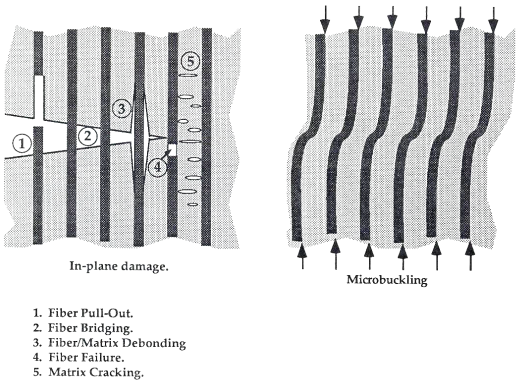
1-1) خرابی در مواد مرکب

مواد مرکب انواع بسیار متفاوتی دارند و از دیدگاه های مختلف قابل دسته بندی می باشند. مواد مرکب دو فازی از لحاظ نوع، هندسه و جهت فاز تقویت کننده به سه دسته تقسیم می شوند: آ) مواد مرکب ذره ای[1] که در آن، ذرّات با اندازه و اشکال مختلف به صورت اتفاقی در زمینه (ماتریس) با یکدیگر ترکیب می شوند، ب)مواد مرکب الیاف-کوتاه یا ناپیوسته[2] که حاوی الیاف کوتاهی به عنوان فاز تقویت کننده است، و ج)مواد مرکب الیاف بلند[3] که به وسیله الیاف بلند پیوسته تقویت می شوند]4[. لایه[4] در مواد مرکب از کنار هم قرار دادن الیاف های یک جهته یا بافته شده در ماده زمینه بدست می آید. هر لایه در یک ماده ارتوتروپیک با سه جهت اصلی طولی در راستای الیاف، عرضی در راستای عمود بر الیاف و عمود بر صفحه لایه تعریف می شود. یک چند لایه[5] از دو یا چند لایه به هم چسبیده شده در راستا های متفاوت می باشد که لایه های تشکیل دهنده آن می توانند دارای ضخامت و جنس های مختلفی باشند.

خرابی مواد مرکب لایه ای را می توان به دو دسته خرابی های درون لایه ای[6] و جدایش بین لایه ای[7] تقسیم نمود. خرابی های درون لایه ای انواع و اشکال بسیار مختلفی دارند به عنوان مثال بیرون کشیده شدن الیاف[8]، بیرون ماندن الیاف[9]، جدایی الیاف و ماده متن[10]، شکستگی الیاف[11]، ترک های ماتریسی[12] و در حالت اعمال بار فشاری، کمانش جزیی یا محلی[13] از این جمله اند که درشکل 1-1 نشان داده شده اند.

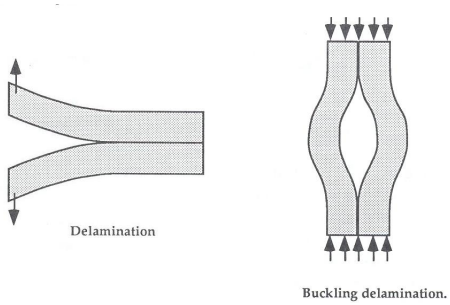
---

[1] Particulate composite
[2] Discontinuous or short-fiber composite
[3] Continuous fiber composite
[4] Ply or lamina
[5] Laminate
[6] In-plane damage
[7] Delamination
[8] Fiber pull-out
[9] Fiber bridging
[10] Matrix/fiber debonding
[11] Fiber failure
[12] Matrix cracking
[13] Microbuckling



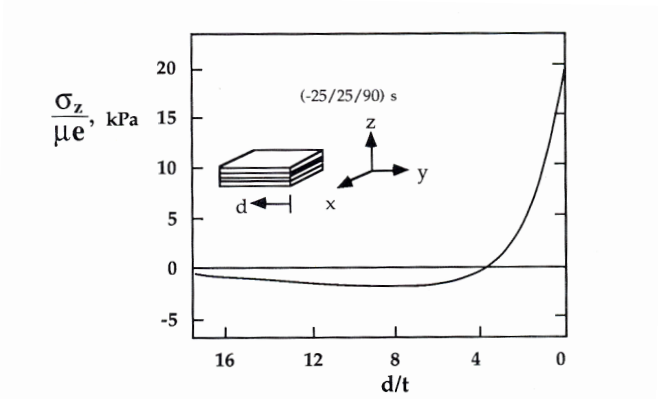
شکل 1-1 برخی از خرابی های درون صفحه ای[3]

خرابی بین لایه ای یا همان جدایش بین لایه ای به صورت از بین رفتن اثر ماده متصل کننده دو لایه (چسب یا ماده متن) و جدا شدن دو لایه بهم چسبیده تعریف می شود و نتیجه آن، عدم انتقال تنش های بین لایه ای در ناحیه جدا شده است که در صورت ادامه روند جدایش لایه ها، منجر به تضعیف کلی سازه و سپس فرو ریزش آن می گردد. در شکل 1-2 این نوع خرابی نشان داده شده است. در محل هایی که دو لایه از یکدیگر فاصله دارند، خرابی جدایش لایه ای اتفاق افتاده و ترک بین لایه ای بوجود آمده است. خرابی های بین لایه ای اکثراً به علت وجود نا پیوستگی مثل ترک ها ماتریسی[1] و یا حضور در لبه های آزاد مواد مرکب ورقه ای اتفاق می افتد[5] که تنش های بین لایه عامل ایجاد آن هستند. در شکل 1-3 تنش های عمودی خارج صفحه ای در اطراف لبه آزاد نشان داده شده است. همانطور که واضح است در لبه آزاد، تنش های عمودی بین لایه ای بسیار زیاد تر از مقدار متوسط این تنش ها است.



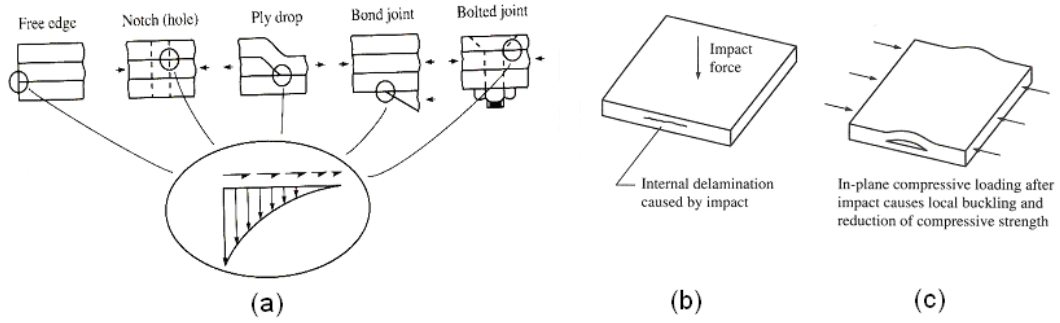
شکل 1-2 جدایش لایه ای یا خرابی بین لایه ای[3]

[1] Matrix cracks



شکل 1-3 نمودار تنش عمودی خارج صفحه ای نسبت به فاصله از لبه آزاد[3]

عموماً ایجاد جدایش لایه ای در سه حالت اتفاق می افتد، وجود ناپیوستگی در لایه چینی ها، بار فشاری که باعث ایجاد کمانش های موضعی می شود و برخورد جانبی اجسام خارجی همانند ابزار کارگاهی و یا پرندگان به صورت ضربه با سازه کامپوزیتی(اعمال بار عرضی ضربه ای). شکل 1-4 نشان دهنده برخی از حالات متداولی است که طی آن، جدایش لایه ای اتفاق می افتد.



شکل 1-4 ایجاد جدایش لایه ای در اثر (a) نا پیوستگی لایه ها،(b) بار های درون صفحه ای فشاری و(c) ضربات عرضی[6]

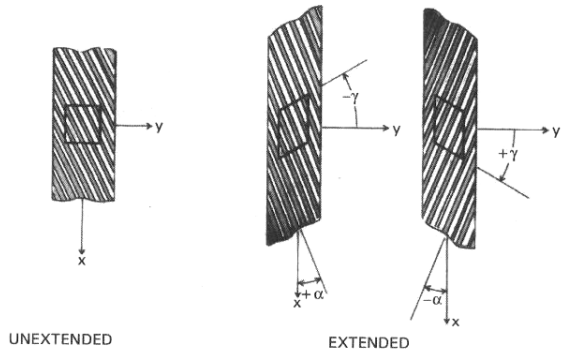
برای بررسی خرابی درون لایه ای، معیار های شکست متعددی تدوین شده است که عموماً نتایج بدست آمده کاربرد صنعتی دارند[7]. معیار هایی همانند حداکثر تنش، حداکثر کرنش، تسای-هیل و تسای-ووازجمله این معیار ها می باشند. این گونه معیار ها عمدتاً یک میان یابی[1] بین داده های تجربی برای تعیین حالات تست نشده می باشند. لازم به یادآوری است که این معیار ها، تنها برای ایجاد و شروع خرابی کاربرد دارند و برای بررسی نحوه رشد خرابی های درون لایه ای قابل استفاده نمی باشند.

[1] Curve fitting

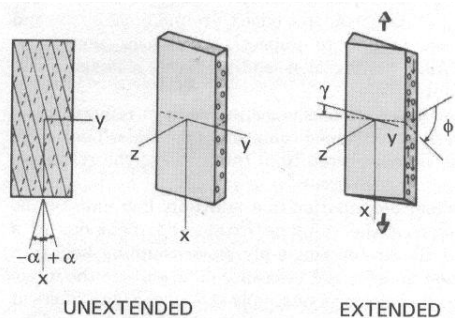
1-2) جدایش لایه ای مواد مرکب

شاید متداول ترین مود خرابی مشاهده شده در مواد مرکب، جدایش لایه ای باشد که طی آن اتصال لایه های مواد مرکب از بین می رود. بررسی جدایش لایه ای سازه های بهم چسبیده و مواد مرکب لایه ای موضوعی برای تحقیقات گسترده برای سال های متمادی شده است[8]. این مود خرابی ممکن است در نزدیکی لبه های آزاد، اطراف سوراخ ها ویا در اثر ضربه بوجود بیاید. همچنین بار های فشاری می توانند باعث بوجود آمدن ترکیب کمانش و جدایش لایه ها گردند. ناحیه لبه آزاد مواد مرکب همواره به عنوان "پاشنه آشیل" مواد مرکب تقویت شده توسط الیاف شناخته می شود. این منطقه، جایی است که در آن بار از الیاف به ماتریس نسبتاً ضعیف منتقل می شود که می تواند باعث بروز خرابی گردد.

تفاوت این مواد با مواد فلزی سنتی را با در نظر گرفتن یک نمونه ساده می توان دریافت. تغییر شکل های برشی در یک چند لایه را می توان با در نظر گرفتن رفتار تک تک لایه ها در مقابل بار اعمالی درک نمود. شکل 1-5 رفتار متفاوت دو تک لایه در هنگام اعمال بار گذاری کششی نشان می دهد. به کمک این تصویر می توان وابستگی کرنش برشی به زاویه الیاف را در هر لایه مشاهده نمود. چسباندن این دو لایه به یکدیگر برای بدست آودن یک لایه چینی دو لایه $\pm\alpha$ باعث برهمکنش آنها می گردد و اعمال کشش بر چنین دو لایه ای باعث ایجاد یک تغییر شکل برشی در جهات مخالف یکدیگر در هر یک از این لایه ها می گردد که در شکل 1-6 نشان داده شده است و نتیجه نهایی آن ایجاد یک تنش بین لایه ای است و این تنش در صورت افزایش می تواند باعث ایجاد خرابی بین لایه ای گردد.



شکل 1-5 رفتار متفاوت دو تک لایه در مقابل بار کششی [8]



شکل 1-6 رفتار یک دولایه angle ply تحت کشش [8]

از آنجایی که مواد مرکب عموماً برای پوسته ها و سازه های حمایت کننده مثل تیرها و یا اسپار بال ها استفاده می شود، در بسیاری از مواقع جهت اتصالات پرچکاری و یا پیچ و مهره ای آنها را سوراخ می نمایند. در لبه های آزاد و یا انتهای سوراخ ها مقادیر بسیار زیادی از تنش علاوه بر مقادیری که بر اثر پدیده تمرکز تنش بوجود می آید را می توان مشاهده نمود. این پدیده به دلیل عدم مطابقت[1] تغییر شکل لایه ها است که بر اثر زاویه متفاوت الیاف لایه ها و احتمالاً مواد مختلف در دو طرف بین لایه ایجاد می گردد.

روش ها ودیدگاه های متفاوتی به بررسی جدایش لایه ای پرداخته اند اما در یک نگاه کلی، روش های بررسی پدیده جدایش بین لایه ای را بر اساس ابزار و مفاهیمی که از آن استفاده می کنند عموماً می توان به سه دسته تقسیم بندی نمود: الف) روش های تنش-پایه[2] یا روش هایی که بر پایه مکانیک مواد بنا شده اند. این روش ها عموماً برای تعیین شروع ویا ایجاد ترک بین لایه ای استفاده می شوند، ب) روش های مکانیک شکست که با در نظر گرفتن یک ترک اولیه به صورت پیش فرض، نحوه رشد ترک را بررسی می نمایند، و ج) استفاده از مدلسازی بینابینی[3] و المان های دارای خواص نرم شونده بین لایه که قابلیت مدلسازی هر دو مرحله ایجاد و گسترش ترک بین لایه ای را دارا می باشد[13]. مرجع [6] با ارائه دو روش که به مبحث جدایی لایه ای می پردازند از سه روش بیان شده، با عناوین استفاده از مکانیک مواد و مکانیک شکست، برای هر یک از آنها مثالهایی از فعالیت های تحقیقاتی پیشین را ارائه کرده است.

[1] Mismatch
[2] Stress-based methods
[3] Meso-modeling

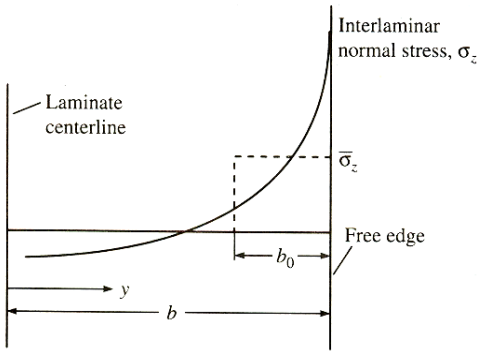
1-3) روش های تنش-پایه یا مکانیک مواد

مرجع [11] که به بررسی زاویه ایجاد ترک در شرایط مود مختلط[1] می پردازد، معیار های بررسی ایجاد ترک را به سه دسته کلی تنش پایه، کرنش پایه و انرژی پایه تقسیم بندی می نماید که روش های تنش پایه و انرژی پایه از مقبولیت بیشتری برخوردار می باشند. کلیه این روش ها بر مفاهیم مکانیک مواد استوار شده اند و روش استخراج آنها انجام آزمایش های تجربی می باشد.

در مرجع [6] معیار تنش متوسط عمودی خارج صفحه ای به عنوان یکی از اولین روش های این دسته ارائه شده است. این معیار بر این فرض بنا شده است که جدایش لایه ای زمانی رخ می دهد که تنش عمودی کششی متوسط در نزدیکی لبه آزاد ($\overline{\sigma}_z$) به مقاومت کششی (S_z) برسد :

$$\overline{\sigma}_z = \frac{1}{b_0}\int_{b-b_0}^{b} \sigma_z(y,0)dy = S_z \qquad \textbf{(1-1)}$$

به عنوان نمونه اگر توزیع تنش عمودی بین لایه ای در اطراف یک لبه آزاد توسط شکل 1-7 نمایش داده شود، این معیار بیان می دارد که هنگامی که سطح زیر این منحنی در حد فاصل لبه آزاد تا b_0 برابر با مقدار بحرانی S_z گردد ترک بین لایه ای ایجاد می شود. در این رابطه، b نصف عرض ورقه و b_0 طول بحرانی و حدوداً برابر ضخامت یک لایه می باشد.



شکل 1-7 تغییرات تنش بین لایه ای عمودی در اطراف لبه آزاد و راستای عرض قطعه[6]

[1] Mixed mode

نظریه دیگری که در این عرصه مطرح شد، توسط برور و لگیس[1] بود که با عنوان معیار درجه دوم[2] جدایش بین لایه ای طرح شد:

$$\left(\frac{\overline{\sigma}_{xz}}{s_{xz}}\right)^2+\left(\frac{\overline{\sigma}_{yz}}{s_{yz}}\right)^2+\left(\frac{\overline{\sigma}_{z}^{\,t}}{s_{z}^{+}}\right)^2+\left(\frac{\overline{\sigma}_{z}^{\,c}}{s_{z}^{-}}\right)^2=1 \qquad \textbf{(2-1)}$$

$$\overline{\sigma}_{ij}=\frac{1}{\lambda_{avg}}\int_0^{\lambda_{avg}}\sigma_{ij}d\lambda$$

البته درهمین مرجع نشان داده شده است که جملات دوم و چهارم چندان تاثیری ندارند.
بر طبق روشی دیگر بر مبنای روش های تنش پایه و مکانیک مواد که در [6] بیان شده است، علاوه بر پیش بینی ایجاد ترک بین لایه ای، می توان به کمک افت سفتی قطعه اندازه ترک و میزان رشد آن را نیز تعیین نمود. البته این قابلیت محدود به مسایلی خاص می گردد و عمومیت ندارد.
همانطور که واضح است در این رویکرد، از مفاهیم و متغییر هایی ابتدایی استفاده شده و مباحث نظری پیشرفته ای مثل روند و یا مکانیزم شکست چه در بعد میکروسکوپی و چه ماکروسکوپی به چشم نمی خورد بلکه تنها سعی شده است معیار هایی ساده که بر نتایج تجربی منطبق باشند ارائه شود.

1-4) رویکرد مکانیک شکست

مکانیک شکست علمی است که به چگونگی رشد ترک و مقاومت سازه های دارای ترک می پردازد و روش های مبتنی بر آن طی دو دهه اخیر کاربرد فراوانی داشته است[2]. در این روش ها معمولاً از مفهوم شدت تنش[3](K) و نرخ رهایی انرژی کرنشی[4](G)، که از متغییر های تعریف شده در مکانیک شکست الاستیک می باشند، استفاده می شود. در این روش ها در هر مرحله از رشد ترک، مقدار شدت تنش و یا نرخ رهایی انرژی کرنشی محاسبه شده و سپس مقدار بدست آمده با مقدار بحرانی K_c یا G_c که از ویژگی های ماده و مساله محسوب می شوند، مقایسه می گردد. شکست و یا رشد ترک زمانی اتفاق می افتند که مقدار متغییر تحت بررسی برابر و یا بزرگ تر از مقدار بحرانی همان متغییرشود.

1 Brewer & Legace

2 Quadratic Delamination Criterion

3 Stress Intensity Factor

4 Strain Energy Release Rate

از این روش هم در بررسی خرابی های درون لایه ای و هم بین لایه ای استفاده کرده اند. مرجع]6[عنوان می کند که چقرمگی شکست الیاف تک جهته شیشه/اپوکسی یک ثابت ماده است که به طول ترک وابستگی ندارد اما به جهت الیاف وابسته است.

یکی از مهمترین مشکلات استفاده از پارامتر شدت تنش به عنوان معیار تعیین رشد ترک این است که برای محاسبه آن نیاز به تحلیل تنش در اطراف نوک ترک می باشد و اگر چه چنین تحلیلی برای بارگذاری های متفاوت و هندسه های مختلف در مواد ایزوتروپ انجام شده است، اما چنین عملیاتی برای مواد غیر ایزوتروپ به علت پیچیدگی های ریاضی آن تنها در موارد محدودی انجام شده است. لذا استفاده از این متغییر به عنوان معیار شکست مواد مرکب چندان اقبال پیدا نکرد و روش نرخ رهایی انرژی کرنشی جایگزین آن شد که تعبیر فیزیکی آن قابل فهم تر حتی در مواد غیر ایزوتروپ است. از طرف دیگر تنش های بین لایه ای بخشی از حالت تنش سه بعدی پیچیده ای هستند که منجر به جدایش بین لایه ای می گردد و در حالی که چنین حالت پیچیده تنشی در اطراف نوک ترک، استفاده از عامل شدت تنش را بسیار دشوار می سازد، با این حال استفاده از نرخ رهایی انرژی کرنشی کارساز به نظر می رسد. لذا تعداد قابل توجهی از محققین سعی در استفاده از این رویکرد روش اخیر در پیشبینی جدایش لایه ای نمودند. به عنوان مثال ریبیکی[1] از نرخ رهایی انرژی کرنشی در مطالعه جدایش لایه ای لبه آزاد لایه های برن / اپکسی به صورت تحلیلی و تجربی استفاده کرد. وی برای محاسبه G از تکنیکی به نام انتگرال بستن ترک[2] بهره برد.

این تکنیک یکی از مهمترین روش های بررسی جدایش بین لایه ای است که به علت سهولت کاربرد و قابلیت استفاده از روش های عددی نظیر اجزاء محدود، مقبولیت زیادی پیدا کرده است. در روش گسترش محدود ترک[3]، به دو تحلیل کامل نیاز می باشد. دو حالت ترک اولیه و ترک ثانویه به ازای رشد کوچکی از ترک در یک تحلیل اجزاء محدود مدل سازی شده و با مقایسه انرژی الاستیک هر کدام از آنها، یک نرخ رهایی انرژی کل برای توسعه ترک محاسبه می گردد. اصلاح این روش با انجام فرض کوچک بودن رشد ترک، امکان محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی را تنها بوسیله یک بار حل به کمک تحلیل اجزای محدود بوجود می آورد.

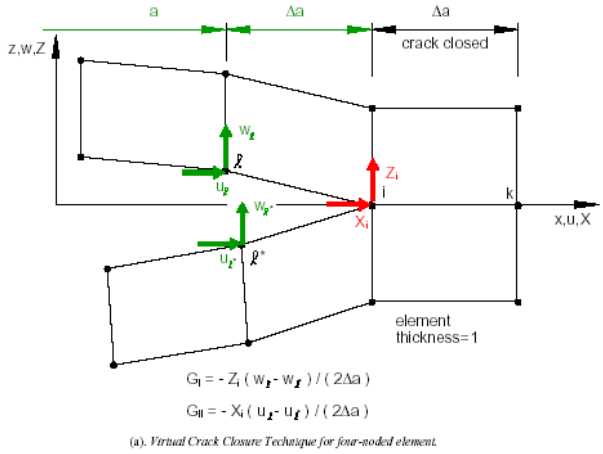
در مرجع]10[که به صورت مفصل نحوه محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی توسط این روش مورد بحث قرار گرفته است دو روش بستن ترک و بستن ترک اصلاح شده (مجازی) توضیح داده شده است. در روش بستن ترک اصلاح شده برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی تنها نیاز به انجام یک بار حل مساله

1 Ribicki et al.

2 Crack Closure Integral

3 Finite crack extension method

به روش اجزا محدود است که از مزایای آن به شمار می رود و فرض اصلی آن تغییر نکردن میدان متغییر های سازه به ازای یک رشد کوچک ترک است. در این روش همانطور که در شکل 1-8 هم نشان داده شده است، مقادیر نیرو در نوک ترک محاسبه شده و برای بدست آودن نرخ رهایی انرژی کرنشی با در نظر گرفتن فرض رشد ترک در ابعاد کوچک و به صورت خود متشابه این مقادیر در مقادیر اختلاف جابجایی گره های بخش باز ترک ضرب شده تا میزان انرژی لازم برای باز کردن ترک بدست آید.



(a). *Virtual Crack Closure Technique for four-noded element.*

شکل 1-8 نیرو ها و جابجایی های گره های لبه ترک برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی به روش بستن مجازی ترک]10[

مرجع]10[روش جدیدی را جهت کاهش خطای روش بستن ترک مجازی برای طول ترک های کوچکتر از ضخامت ورق که روش های عادی در آن مشکلات زیادی دارند ارائه نموده و نهایتا نتایج بدست آمده را با نتایج تجربی مقایسه نموده است. با وجود اینکه این روش، پر کاربرد ترین روش در بررسی جدایی لایه ای با رویکرد مکانیک شکست می باشد، مشکلاتی نیز در استفاده از آن مشاهده شده است. به عنوان مثال همان طور که گفته شد استفاده از این روش در شرایطی که خرابی های درون لایه ای تاثیر مهمی بر ایجاد جدایی بین لایه ای دارند چندان مناسب نمی باشد زیرا در خصوص این گونه خرابی ها، فرض خود متشابه برای آنها صدق نمی کند و از آنجایی که در واقعیت مواد مرکب، مکانیزم های خرابی اغلب به صورت همزمان اتفاق می افتند، لذا استفاده از این رویکرد امکان مدلسازی تاثیر خرابی های درون لایه ای را در جدایش لایه ای ضعیف می نماید. از طرف دیگر اگرچه جدایش لایه ای را می توان منطبق با فرض خود متشابه در نظر گرفت، اما مقادیر محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی (G_c) از مهمترین مشکلات آن است. به عنوان مثال در اکثر موارد این مقدار برای دو لایه هم راستای 0/0

محاسبه شده است. اگر چه استاندارد هایی برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول (G_{Ic}) وجود دارد اما برای مود دوم و سوم هنوز بحث های بسیار زیادی در خصوص نحوه اندازه گیری و مفاهیم بدست آمده از آن وجود دارد. در ضمن تفاوت های بسیار آشکاری نیز بین داده های تجربی مراجع مختلف وجود دارد]12[که گویای پیچیدگی های حاکم بر مساله با استفاده از این رویکرد می باشد.

1-5) روش مدلسازی بین لایه ای

در بررسی رشد خرابی و ترک، رویکرد دیگری در حال رایج شدن است که بر پایه در نظر گرفتن یک ناحیه چسبنده[1]–خرابی است. ایده اولیه این روش ها، توسط داگدیل[2](1960) و برنبلات[3] (1962) برای اولین بار مطرح شد. در مدل های ارائه شده توسط ایشان، نیرو برواحد سطح[4] در بین لایه یعنی جایی که احتمال رشد ترک وجود دارد به جابجایی نسبی[5] مرتبط می شد[13]. برای مدلسازی دو فاز ایجاد و سپس رشد ترک، رابطه غیر خطی بین جابجایی نسبی و تنش به گونه ای تعریف می شود که ابتدا به صورت خطی (الاستیک) با افزایش جابجایی، تنش افزایش یابد و پس از رسیدن به یک مقدار مشخص، با افزایش جابجایی، تنشی که بین لایه در یک نقطه تحمل می شود کاهش می یابد. به این ترتیب رابطه جابجایی–تنش دارای یک نقطه بیشینه می گردد که در اغلب اوقات این نقطه بیشینه منطبق بر زمانی است که خرابی بین لایه شروع به رشد می کند. به عبارت دیگر شروع و ایجاد خرابی بین لایه ای، به مقاومت بین لایه ای مرتبط می گردد و بیشینه تنش آن را تعیین می نماید. هنگامی که سطح زیر این نمودار برابر با انرژی شکست بین لایه گردد، تنش به صفر می رسد و سطح جدید ترک بطور کامل بوجود می آید. به این ترتیب یک استفاده غیر مستقیم از مکانیک شکست نیز صورت پذیرفته است.

1-5-1) مدلسازی بینابینی

مواد مرکب را به صورت های مختلف و در مقیاس های متفاوت می توان تحلیل نمود. مقیاس مشاهدات ابعاد در سطح اجزاء تشکیل دهنده در حدود قطر الیاف، اندازه ذرات و یا فاصله بین تقویت کننده های ماده زمینه می باشد. این سطح را میکرومکانیک می نامند که به مطالعه برهمکنش اجزاء تشکیل دهنده در یک سطح میکروسکوپی می پردازد. این مقیاس به حالت تنش و تغییر شکل در مواد تشکیل دهنده ماده مرکب

[1] Cohesive zone *or* De-cohesive zone
[2] Dugdale
[3] Branblatt
[4] Traction
[5] Relative displacement