

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی طراحی کاربردی

مدل سازی رشد ترک و بررسی عوامل مؤثر بر آن در صفحه کامپوزیتی با استفاده از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند

نگارنده: فاطمه فرهادی

استاد راهنما

دکتر محمد جعفری

مهرماه ۱۴۰۰

۲۰۷-۲۴/۲۲

شماره:

۱۷/۹/۱۴۰۰

تاریخ:

ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد

مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم فاطمه فرهادی با شماره دانشجویی ۹۷۱۲۶۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت : مدل سازی رشد ترک و بررسی عوامل موثر بر آن در صفحه کامپوزیتی با استفاده از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹ ☒

ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐

ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐

نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد جعفری	دانشیار	
۲- استاد مشاور	—	—	—
۳- استاد داور اول	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	
۴- استاد داور دوم	دکتر مسعود مهدی زاده رخی	استادیار	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید مهدی حسینی فراش	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۱۷/۹/۱۴۰۰

تقدیم به

محضر ارزشمند مادر عزیزم به خاطر همه‌ی تلاش‌های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند.

شکر و قدردانی

از مادرم که حضورشان همیشه گرما بخش روح من بوده است.

از استاد بزرگوarm دکتر محمد جعفری برای تمام حمایت‌ها و زحمات بی دریغشان سپاسگزاری می‌کنم.

از کمک‌ها و راهنمایی‌های جناب مهندس رضا رشمه کریم کمال سپاسگذاری را دارم و و برایشان آرزوی موفقیت و سربلندی می‌کنم.

در پایان از کلیه دوستان خوبم که مطالب زیادی را به من آموختند تشکر کرده و برایشان آرزوی موفقیت و سربلندی می‌کنم.

تهدنامه

اینجانب فاطمه فرهادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی رشد ترک و بررسی عوامل مؤثر بر آن در صفحه کامپوزیتی با استفاده از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند تحت راهنمایی دکتر محمد جعفری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در پژوهش حاضر به مدل سازی رشد ترک و بررسی عوامل مؤثر بر آن در صفحه کامپوزیتی با استفاده از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند پرداخته شده است. به منظور گردآوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل و مدل سازی رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند در نرم افزار LAMMPS استفاده گردید. همچنین در این پژوهش نتایج حاصل از تئوری پری داینامیک با نتایج حاصل از روش المان محدود توسعه یافته در نرم افزار ABAQUS مورد مقایسه قرار گرفت. لازم به ذکر است که در این پژوهش عوامل مؤثر بر رشد ترک در صفحه کامپوزیتی موردنظر نظیر اثر میزان شدت تنش اعمالی بر جسم و نحوه بارگذاری بر آن و زاویه قرارگیری الیاف در جسم در چهار حالت مختلف 0° ، 30° ، 45° و 90° و همچنین نوع پیش ترک و سوراخ موجود در جسم و زاویه قرارگیری آن (صفحه کامپوزیتی موردنظر) بر چگونگی انتشار ترک در آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج حاصل نشان دهنده آن است که نوع بارگذاری، جهت الیاف و تعداد لایه ها و نحوه چیدمان و آرایش لایه ها در رفتار صفحات کامپوزیتی بسیار مؤثر می باشد.

واژه های کلیدی: تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند، رشد ترک، صفحه کامپوزیتی، پری داینامیک

فهرست مطالب

د	فهرست جداول
ه	فهرست اشکال
ز	فهرست علائم
۱	فصل ۱: کلیات پژوهش
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۱-۲ بیان مسأله
۴	۱-۳ اهمیت و ضرورت پژوهش
۵	فصل ۲: مفاهیم و مبانی نظری پژوهش
۶	۲-۱ مقدمه
۶	۲-۲ شکست دینامیکی
۷	۲-۳ رشد ترک
۷	۲-۴ ترک و چند شاخه‌ای شدن
۸	۲-۵ توقف ترک
۹	۲-۶ تئوری پری‌دینامیک
۱۰	۲-۷ پیشینه پژوهش
۱۷	فصل ۳: روش‌شناسی پژوهش
۱۸	۳-۱ مقدمه
۱۸	۳-۲ روش تجزیه و تحلیل اطلاعات

۳-۳ تئوری محلی کلاسیک ۱۸

۳-۴ تئوری پری داینامیک ۲۱

۳-۵ فرمول بندی تئوری پری داینامیک مبتنی بر مدل پیوند ۲۱

۳-۶ مدل سازی آسیب در تئوری پری داینامیک ۲۴

۳-۷ مدل سازی کامپوزیتها با استفاده از تئوری پری داینامیک ۲۹

فصل ۴: شبیه سازی ۳۵

۴-۱ مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک افقی ۳۶

۴-۲ رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای سوراخ مستطیلی ۴۰

۴-۲-۱ اثر تعداد و نحوه چیدمان سوراخها در جسم بر چگونگی انتشار ترک در آن ۴۱

۴-۳ مقایسه روش المان محدود توسعه یافته و تئوری پری داینامیک در تحلیل صفحه کامپوزیتی

تک لایه تک جهته ۴۳

۴-۳-۱ صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته تحت کشش خالص ۴۳

۴-۳-۲ صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته تحت خمش خالص ۴۷

۴-۴ مقایسه روش المان محدود توسعه یافته و تئوری پری داینامیک در تحلیل صفحه کامپوزیتی

چند لایه ۵۲

۴-۴-۱ صفحه کامپوزیتی چند لایه تحت کشش یکنواخت ۵۲

۴-۴-۲ صفحه کامپوزیتی چند لایه تحت بارگذاری ترکیبی ۵۴

۴-۵ مدل سازی رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته ۵۷

۴-۶ اثر مدول یانگ صفحه کامپوزیتی تک لایه بر رشد ترک در آن ۶۰

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات ۶۳

۵-۱ نتیجه گیری ۶۴

۵-۲ پیشنهادات ۶۵

فهرست جداول

جدول (۴-۱) : خواص مکانیکی ماده <i>Duran 50 glass</i>	۳۶
جدول (۴-۲): زمان و مکان انشعاب مسیر ترک در صفحه مستطیلی موردنظر تحت تنش یکنواخت	
..... 12MPa	۳۷
جدول (۴-۳) : نتایج حاصل از جابه‌جایی نقطه مادی x به مختصات $(L - 0.5 \cdot \Delta x$ و $w - 0.5 \Delta y)$	۴۴
جدول (۴-۴) : نتایج حاصل برای نیروی واکنش تکیه گاهی $Fx [N]$ برای گوشه سمت راست	۴۵
جدول (۴-۵) : جابه‌جایی نقطه xA در راستای محور z برای صفحه کامپوزیتی با الیاف 0°	۴۸
جدول (۴-۶) : واکنش تکیه گاهی $My [N.m]$ برای صفحه کامپوزیتی با الیاف 0°	۴۸
جدول (۴-۷) : نتایج حاصل از پیش‌بینی جابه‌جایی در جهت محور z برای صفحه کامپوزیتی موردنظر	
تحت خمش خالص	۴۹
جدول (۴-۸) : نتایج حاصل از پیش‌بینی واکنش تکیه گاهی ممان $My [N.m]$ برای صفحه کامپوزیتی	
موردنظر تحت خمش خالص	۵۰
جدول (۴-۹) : نتایج حاصل از پیش‌بینی جابه‌جایی در جهت محور z ها	۵۳
جدول (۴-۱۰) : نتایج حاصل از پیش‌بینی واکنش تکیه گاهی $Fx [N]$	۵۳
جدول (۴-۱۱) : نتایج حاصل از پیش‌بینی جابه‌جایی در جهت محور z ها تحت بارگذاری ترکیبی	۵۷
جدول (۴-۱۲) : نتایج حاصل از پیش‌بینی واکنش تکیه گاهی $Fy [N]$ تحت بارگذاری ترکیبی	۵۷
جدول (۴-۱۳) : خواص مکانیکی صفحه کامپوزیتی تک‌لایه تک‌جهته [۳۵]	۵۸
جدول (۴-۱۴) : حالت‌های مورد بررسی اثر مدول یانگ بر صفحه کامپوزیتی تک‌لایه تک‌جهته	۶۱
جدول (۴-۱۵) : پارامترهای موثر بر رشد ترک در صفحه کاکپوزیتی تک‌لایه با الیاف 0° برای سوراخ	
مستطیلی	۶۱
جدول (۴-۱۶) : پارامترهای موثر بر رشد ترک در صفحه کاکپوزیتی تک‌لایه با الیاف 45° برای سوراخ	
مستطیلی	۶۱
جدول (۴-۱۷) : پارامترهای موثر بر رشد ترک در صفحه کاکپوزیتی تک‌لایه با الیاف 90° برای سوراخ	
مستطیلی	۶۱

فهرست اشکال

شکل (۳-۱): ارتباط بین مدل‌های محلی و غیرمحلی [۲۷].....	۱۹
شکل (۳-۲): نحوه قرارگیری ذرات و همسایگی مربوط به هر ذره در تئوری پری‌داینامیک [۲۷].....	۲۰
شکل (۳-۳): شماتیک همسایگی نقطه مادی xk و نمایش بردار پیوند میان دو نقطه مادی xk و xj [۲۷]	۲۲
شکل (۳-۴): نمایش نیروی موجود در پیوند میان دو نقطه مادی xk و xj	۲۵
شکل (۳-۵): نمایش نیروی موجود در پیوند میان دو نقطه مادی xk و xj	۲۵
شکل (۳-۶): نمایش پیوندهای سالم و شکسته شده برای یک نقطه مادی.....	۲۶
شکل (۳-۷): نحوه محاسبه انرژی لازم برای شکسته شدن تمام پیوندهای متصل به نقطه مادی X [۱۶]	۲۹
شکل (۳-۸): دو نوع بردار پیوند در یک لایه (پیوند در راستای الیاف و پیوند در راستای ماتریس) [۳۳]	۳۰
شکل (۳-۹): رابطه بین نیروی پیوند میان نقاط مادی و کرنش (کشیدگی) پیوند [۳۴].....	۳۱
شکل (۳-۱۰): نمایش پاسخ بین لایه ای ورق کامپوزیتی چندلایه [۳۴].....	۳۳
شکل (۳-۱۱): فلوچارت حل عددی تئوری پری دینامیک.....	۳۴
شکل (۴-۱): نمایش صفحه مستطیلی دارای پیش ترک افقی تحت تنش یکنواخت.....	۳۷
شکل (۴-۲): مسیر رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک افقی تحت تنش $12MPa$	۳۸
شکل (۴-۳): مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک تحت تنش $12MPa$	۳۹
شکل (۴-۴): مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک تحت تنش های مختلف.....	۳۹
شکل (۴-۵): صفحه مستطیلی دارای سوراخ افقی تحت تنش یکنواخت $12MPa$	۴۰
شکل (۴-۶): نتایج حاصل از مدل سازی مسیر رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای سوراخ مستطیلی در مرکز آن.....	۴۱
شکل (۴-۷): صفحه مستطیلی دارای دو سوراخ پادمتقارن تحت تنش یکنواخت $12MPa$	۴۲
شکل (۴-۸): نتایج حاصل از مدل سازی مسیر رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای دو سوراخ مستطیلی پادمتقارن.....	۴۲
شکل (۴-۹): صفحه مستطیلی دارای سه سوراخ متقارن تحت تنش یکنواخت $12MPa$	۴۲
شکل (۴-۱۰): نتایج حاصل از مدل سازی مسیر رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای دو سوراخ مستطیلی پادمتقارن.....	۴۳

- شکل (۴-۱۱): هندسه صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهت تحت کشش محوری در راستای محور x ... ۴۴
- شکل (۴-۱۲): دیاگرام و کانتور جابه جایی برای صفحه کامپوزیتی موردنظر با زاویه الیاف 90° ۴۶
- شکل (۴-۱۳): دیاگرام و کانتور جابه جایی برای صفحه کامپوزیتی موردنظر با زاویه الیاف 15° ۴۷
- شکل (۴-۱۴): صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهت تحت خمش خالص..... ۴۸
- شکل (۴-۱۵): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی با الیاف 0° در حالت $v_{12} = 0.5$ تحت خمش خالص
..... ۴۹
- شکل (۴-۱۶): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی با الیاف 15° در حالت $v_{12} = 0.5$ تحت خمش
خالص..... ۵۲
- شکل (۴-۱۷): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی $0/90$ تحت کشش یکنواخت..... ۵۳
- شکل (۴-۱۸): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی $45/-45$ تحت کشش یکنواخت..... ۵۴
- شکل (۴-۱۹): صفحه کامپوزیتی چندلایه تحت بارگذاری ترکیبی..... ۵۵
- شکل (۴-۲۰): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی $45/-45$ تحت بارگذاری ترکیبی..... ۵۶
- شکل (۴-۲۱): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی $45/-15$ تحت بارگذاری ترکیبی..... ۵۷
- شکل (۴-۲۲): هندسه صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهت : الف): دارای سوراخ دایروی ب): دارای پیش
ترک عمودی..... ۵۸
- شکل (۴-۲۳): نتایج حاصل از رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهت دارای سوراخ دایروی
برای زوایای الیاف مختلف..... ۵۹
- شکل (۴-۲۴): نتایج حاصل از رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهت دارای پیش ترک افقی
برای زوایای الیاف مختلف..... ۶۰

فهرست علائم

a	طول ترک
G	نرخ انرژی آزاد شده
R	مقاومت ثابت ترک
Δx	طول المان
f_s	نیروی رانش کوتاه برد
f	تابع نیروی جفتی
w	تابع میکروپتانسیل
ξ	موقعیت نسبی دو نقطه در پیکربندی مرجع
η	جابه جایی نسبی دو نقطه در پیکربندی فعلی
c	مقدار میکرومدول تئوری پری داینامیک
s_0	تغییر طول نسبی بحرانی بردار پیوند
δ	شعاع همسایگی
C_m	پیوند ماتریس
C_f	پیوند الیاف
φ	معیار آسیب
ρ	چگالی
s	تغییر طول نسبی بردار پیوند
μ	فاکتور آسیب
u	بردار جابجایی
b	بردار نیروی حجمی

فصل ۱: کلیات پژوهش

۱-۱ مقدمه

یکی از عمده‌ترین مسائلی که انسان از زمان ساختن ساده‌ترین ابزارها با آن مواجه بوده است پدیده شکست در اجسام می‌باشد و درواقع بشر برای استفاده از مواد به صورت ابزارهای گوناگون باید مقاومت آنها را نیز می‌دانست؛ بنابراین به جرأت می‌توان گفت که علم مقاومت مصالح عمری برابر عمر تاریخ دارد. البته روند شناخت و برآورد مقاومت اجسام از روش‌های تجربی و ابتدایی شروع شده و به روش‌های کاملاً علمی قرن حاضر رسیده است.

علم مقاومت مصالح دارای شاخه‌های گوناگونی می‌باشد که رشد قابل‌توجهی داشته‌اند. یکی از شاخه‌های این علم با کاربردی وسیع و تحلیل علمی نسبتاً مشکل، مکانیک شکست می‌باشد. توجه به لزوم به‌کارگیری مواد جدید و گوناگون در گستره وسیع تکنولوژی، معیارهای نوینی در روش‌های طراحی را الزامی نموده است. در این میان علم مکانیک شکست مورد توجه خاصی قرار گرفته است. اصول مکانیک شکست کاربردهای مختلفی در طراحی مهندسی شامل آنالیز شکست سازه‌های ترد و پیش‌بینی گسترش ترک خستگی، دارند. با توجه به اینکه درصدی از شکست‌های ترد ریشه در گسترش ترک خستگی دارند استفاده از مکانیک شکست می‌تواند بسیار مفید باشد.

در پژوهش حاضر به مدل‌سازی رشد ترک و بررسی عوامل مؤثر بر آن در صفحه کامپوزیتی با استفاده از تئوری پری‌داینامیک مبتنی بر پیوند پرداخته شده است.

۱-۲ بیان مسأله

در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت‌های انجام شده در تکنولوژی و صنایع مختلف همچون صنایع فضایی، خودروسازی، مکانیک، حمل و نقل دریایی و سایر حوزه‌ها و نیاز آنها به مواد هوشمند همچون مواد کامپوزیتی استفاده از این مواد افزایش چشمگیری داشته است. ویژگی‌هایی همچون قابلیت جذب انرژی بالا، چقرمگی مناسب، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی، نفوذناپذیری در برابر آب، عایق مناسب حرارتی

بر جذابیت استفاده از این مواد می‌افزاید. ترکیب این دو جزء در سازه‌های کامپوزیتی با توجه به نوع کاربرد آنها می‌تواند خواص بسیار مناسب و بی‌نظیری را ایجاد کند، عواملی مانند درصد وزنی الیاف و جهت و زاویه قرارگیری الیاف نقش اساسی در ایجاد خواص مکانیکی سازه کامپوزیتی موردنظر ایفا می‌کنند. از این رو مطالعه و تحلیل رفتار سازه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های مختلف و بررسی عوامل مؤثر بر رفتار و پاسخ آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

یکی از مسائل حائز اهمیت در صنعت، شکست قطعات بر اثر رشد ترک می‌باشد. پیش‌بینی و کنترل مسیر رشد ترک یکی از مسائل مهم مکانیک شکست است. اهمیت این مسأله به دلیل جلوگیری از وقوع شکست‌های ناگهانی در سازه‌ها و هدایت ترک در راستای یک منحنی خاص می‌باشد تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مدل‌سازی شکست، رشد ترک و آسیب در اجسام و سازه‌ها، توسط پژوهشگران صورت گرفته است. با وجود این پژوهش‌ها هنوز مشکلات زیادی در زمینه مدل‌سازی شکست، رشد ترک و آسیب در اجسام و سازه‌هایی که دارای نقاط منفرد و ناپیوستگی‌هایی از قبیل پیش ترک، ناچ و سوراخ می‌باشند، وجود دارد. در سال‌های اخیر نظریه جدیدی تحت عنوان تئوری پری‌دینامیک برای مدل‌سازی و تحلیل چنین مسائلی ارائه شده است. چارچوب فرمول‌بندی تئوری پری‌دینامیک بر اساس معادلات انتگرالی می‌باشد. همچنین نقاط منفرد، ناپیوستگی‌ها و آسیب در جسم و مدل‌سازی آن‌ها به عنوان نوعی دیگر از تغییر شکل و جزئی از معادلات ساختاری این تئوری می‌باشند. در نتیجه می‌توان از تئوری پری-دینامیک به طور مستقیم و بدون نیاز به روابط تکمیلی جهت مدل‌سازی رشد ترک در مسائلی که شامل نقاط منفرد و ناپیوستگی‌ها هستند، استفاده کرد. تئوری پری‌دینامیک یک نظریه بین مولکولی می‌باشد که معادلات آن با مفهوم پیوستگی در یک فاصله متناهی که خط افق (δ) نام دارد گسترش یافته و بر اساس یک مدل از نیروهای داخلی موجود در جسم بیان می‌شوند که در آن نقاط مادی (ذرات) به طور مستقیم از فاصله نزدیک به هم نیرو وارد می‌کنند. همچنین می‌توان بیان کرد که نظریه کلاسیک مکانیک جامدات می‌تواند جزئی از تئوری پری‌دینامیک باشد. به عبارتی دیگر زمانی که مقدار خط افق به صفر میل کند ($\delta \rightarrow 0$)، تئوری پری‌دینامیک به نظریه کلاسیک مکانیک جامدات همگرا می‌شود.

در این پژوهش به تحلیل و مدل سازی رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته دارای پیش ترک با استفاده از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند پرداخته خواهد شد. همچنین در این پژوهش عوامل مؤثر بر رشد ترک در صفحه کامپوزیتی مورد نظر نظیر اثر شدت تنش اعمالی بر جسم و زاویه قرارگیری الیاف در جسم بر چگونگی انتشار ترک در آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت نتایج حاصل از مدل سازی رشد ترک با استفاده از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند با نتایج حال از روش المان محدود توسعه یافته مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

۳-۱ اهمیت و ضرورت پژوهش

با توجه به اینکه یکی از مسائل حائز اهمیت در صنعت، شکست قطعات بر اثر رشد ترک می باشد. از این رو، تحلیل و مدل سازی رشد ترک در سازه های کامپوزیتی و همچنین بررسی عوامل مؤثر بر نحوه رشد ترک در آن ها امری ضروری می باشد.

لازم به ذکر است که تئوری پری داینامیک در سال های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و هنوز تحقیقات و پژوهش های زیادی در زمینه تحلیل و مدل سازی رشد ترک و آسیب در سازه های کامپوزیتی با استفاده از این روش صورت نگرفته است. در نتیجه مطالعه در زمینه تحلیل و مدل سازی رشد ترک در سازه های کامپوزیتی با استفاده از تئوری پری داینامیک و مقایسه نتایج حاصل از این روش با نتایج حاصل از دیگر روش ها به خصوص روش المان محدود توسعه یافته از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.

فصل ۲ : مفاهیم و مبانی نظری پژوهش

۱-۲ مقدمه

در این فصل مفاهیم و مبانی نظری پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲ شکست دینامیکی

به شاخه‌ای از علم مکانیک که به مطالعه انتشار ترک در مواد می‌پردازد، مکانیک شکست می‌گویند. مکانیک شکست، برای محاسبه تنش‌های اعمالی روی یک ترک از روش‌های تحلیلی مکانیک جامدات و برای تعیین مقاومت ماده در برابر شکست از روش‌های تجربی مکانیک جامدات استفاده می‌کند. به شکست تحت بار دینامیکی، شکست دینامیکی گویند که برای یک قطعه ترک‌دار، ترک زمانی شروع به رشد می‌کند که بار اعمالی به مقدار بحرانی خود برسد.

نرخ آزادسازی انرژی^۱ با گسترش ترک افزایش می‌یابد که این موجب افزایش سرعت در ترک می‌شود. در مواد با چقرمگی کم با افزایش سرعت پیشروی ترک سبب رفتار ترد تری در ماده می‌شود. با گسترش ترک مقاومت ماده کاهش یافته و شکست ترد دینامیکی اتفاق می‌افتد. [۱]

معمولاً رشد ترک در مسافت کم به سرعت بالایی می‌رسد (بیش از 1000 m/s). با توجه به شرایط بارگذاری، هندسه مسئله و خواص ماده، امکان منشعب شدن ترک به دو شاخه وجود دارد که این روند می‌تواند یک یا چند بار رخ دهد یا باعث ناپایداری ترک نسبت به راستای انتشار شود، بدین معنی که در شرایط متقارن امکان انحراف ترک از مسیر مستقیم وجود دارد. مشخصه‌های بارز شکست ترد دینامیکی^۲ به صورت زیر بیان می‌شود:

(۱) انتشار سریع ترک

(۲) انرژی آزاد شده کم

^۱ Energy release rate

^۲ Dynamic brittle fracture

۳) تغییر شکل پلاستیک و یا ویسکوالاستیک ناچیز قبل از وقوع شکست [۲]

مسائل شکست دینامیکی به دو گروه کلی تقسیم می‌شوند:

۱. شروع رشد ترک در اثر بار ناگهانی

۲. گسترش سریع ترک

از دلایل گسترش سریع ترک می‌توان به اثر شبه استاتیکی و بار ناگهانی اشاره کرد که امکان توقف آن پس از انتشار ناپایدار وجود دارد. به تمامی مسائل شکست وابسته زمان که در آن‌ها انتشار یا توقف ترک به طور سریع و ناگهانی رخ می‌دهد، شکست دینامیکی گفته می‌شود.

۲-۳ رشد ترک

از مسائل حائز اهمیت در صنعت، می‌توان به شکست قطعات بر اثر رشد ترک اشاره کرد. این مسئله از این جهت حائز اهمیت است که وقوع شکست‌های ناگهانی در سازه‌ها و هدایت ترک در راستای یک منحنی خاص جلوگیری می‌کند. با توجه به اینکه تحقیقات گسترده‌ای که در زمینه تحلیل و مدل‌سازی رشد ترک و شکست انجام شده است، همچنان چالش‌هایی در بحث تحلیل و مدل‌سازی آسیب و شکست در اجسام دارای ناپیوستگی بر پایه مکانیک کلاسیک جامدات، پیش روی پژوهشگران قرار دارد. برای حل این مشکل، تئوری جدیدی تحت عنوان تئوری پری‌دینامیک ارائه شد که بر اساس معادلات انتگرالی و انتگرالی - دیفرانسیلی می‌باشد. از کاربردهای پیش‌بینی و کنترل مسیر رشد ترک می‌توان به کاربرد آن در فرایند برش کاری اشاره کرد به این صورت که با اعمال یک بار خارجی متغیر به ترک اولیه، می‌توان آن را در امتداد یک منحنی دلخواه برش داد.

۲-۴ ترک و چند شاخه‌ای شدن

یک ترک ساده به طول $2a$ و مقاومت ثابت R داریم، که رشد ترک تحت تنش ثابت انجام می‌شود. با

توجه به رابطه $G = \frac{\pi\sigma^2 a_c}{E}$ ، تغییرات G نسبت به a به صورت خطی می‌باشد. با گسترش ترک به اندازه a_c نرخ انرژی آزاد شده^۱ (G) در همان لحظه برابر با $2R$ می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده، از نظر تئوری انرژی موجود، توانایی ایجاد دو ترک را دارد که احتمال دارد ترک در دوشاخه منشعب شود. در صورتی که رشد ترک به اندازه $\Delta a = 2a_c$ ($a = 3a_c$) باشد و در این صوت $G = 3R$ بوده که شاهد انشعاب سه شاخه در ترک هستیم. این به این معناست که انشعاب زمانی رخ می‌دهد که انرژی آزاد شده G برای گسترش دو یا چند شاخه‌ای شدن ترک به اندازه کافی باشد. باید توجه داشت که تمامی حالت های گفته شده بدون در نظر گرفتن انرژی جنبشی در معادلات بوده است.

۲-۵ توقف ترک

با توجه به اینکه تنش در رابطه ی $G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E}$ ثابت در نظر گرفته شد پس بین a و G رابطه ی مستقیم وجود دارد، اما اگر لبه‌های ورق ثابت در نظر گرفته شود هنگام رشد ترک، تنش کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه G نیز کم می‌شود. هنگامی که در یک نقطه از ترک انرژی جنبشی صفر شود، سرعت ترک نیز صفر شده و در نتیجه ترک متوقف می‌شود که G در زمان توقف ترک از G_{IC} کمتر می‌باشد. که این G را استحکام توقف می‌گویند که وابسته به اندازه و سرعت ترک می‌باشد. پارامترهای بسیاری بر روی توقف و انرژی توقف اثرگذار می‌باشند بنابراین نمی‌توان گفت همیشه انرژی جنبشی صرف گسترش ترک می‌شود بلکه با وجود انرژی جنبشی مورد نیاز، احتمال عدم گسترش ترک وجود دارد.

به طور کلی دو شرط اساسی برای توقف ترک لازم است

$$1. \quad G < R$$

$$2. \quad \sigma < \sigma_c \text{ و یا صفر بودن انرژی جنبشی}$$

¹ Energy release rate

در صورتی که روی نمونه تسمه‌ای با استحکام بالا قرار داده شود رشد ترک متوقف می‌گردد. در زمان گسترش ترک، رسیدن به یک ماده با استحکام بالا، باعث افزایش ناگهانی R می‌شود به طوری که $G < R$ می‌شود. در صورتی که انرژی جنبشی صرف رشد ترک نشود، به طور ناگهانی ترک متوقف می‌شود. ولی با صرف انرژی جنبشی جهت رشد ترک، ترک در تسمه تا جاییکه سرعتش به صفر برسد، پیشروی می‌کند [۱].

۶-۲ تئوری پری‌داینامیک

در سال‌های اخیر نظریه جدیدی تحت عنوان تئوری پری‌داینامیک برای مدل‌سازی و تحلیل مسائل شکست و رشد ترک در اجسام و سازه‌های دارای ناپیوستگی‌های از قبیل پیش ترک، ناچ و سوراخ می‌باشند، ارائه شده است. قالب کلی تئوری پری‌داینامیک بر اساس معادلات انتگرالی می‌باشد. در این تئوری می‌توان به طور مستقیم و بدون نیاز به روابط تکمیلی، رشد ترک را در مسائلی که دارای نقاط منفرد و ناپیوستگی‌ها هستند، مدل‌سازی کرد.

تئوری پری‌داینامیک یک نظریه بین مولکولی بوده که معادلات آن با مفهوم پیوستگی در یک فاصله متناهی بنام خط افق (δ) نام، گسترش می‌یابد که بر اساس یک مدل از نیروهای داخلی موجود در جسم بیان می‌شوند که در آن نقاط مادی به طور مستقیم از فاصله نزدیک به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. در صورتی که خط افق به سمت صفر میل کند $\delta \rightarrow 0$ ، شاهد همگرایی تئوری پری‌داینامیک با نظریه کلاسیک مکانیک هستیم.

۷-۲ پیشینه پژوهش

گیو^۱ و همکاران شکست دینامیکی لایه کامپوزیت ترد دو بعدی را با مدل شبکه پری دینامیکی مبتنی بر پیوند^۲ شبیه سازی کردند که در آن مواد متعامد ناهمسان گرد را توسط ساختار شبکه توپولوژیکی در حال چرخش به جای جهت های فیبر نشان دادند. استخراج تحلیلی و حل عددی مدل پیشنهادی بر اساس تعادل انرژی ارائه و برای اعتبارسنجی توانایی روش مدل سازی شکست دینامیکی از تست های Benchmark لایه کامپوزیتی استفاده شده است. مدل شبکه پری دینامیک به دلیل مقاومت لایه کامپوزیت ترد دو بعدی در مدل سازی شکست دینامیکی، به ساختار شبکه ای^۳ بعدی در لایه های کامپوزیتی بسط داده شد. [۳]

ژانگ^۳ و همکاران برای تجزیه و تحلیل کمی الاستیک و شکست مواد از مدل پری دینامیکی حالت مبنا^۴ استفاده کردند. در این مدل، چهار پارامتر مستقل مواد ارتوتروپیک^۵ دو بعدی به چهار ثابت پری دینامیکی تبدیل شدند که این کار محدودیتی در خواص ماده ایجاد نمی کند. آنها سه نوع ساختار بحرانی منحصر به فرد برای آنالیز کمی شکست مواد ارتوتروپیک تعریف کردند. شبیه سازی های کمی از یک لایه ارتوتروپیک تحت بار تنش و تست های تنش فشرده (CT) و تنش لبه ای (لبه) (SENT) برای تأیید رفتارهای الاستیک و شکستگی مربوط به مواد ارتوتروپیک انجام شد. در مدل پری دینامیکی مشخصات شکست (به عنوان مثال مسیر ترک، غلظت انرژی، رابطه بار جابه جایی و تعادل انرژی در طول انتشار ترک) برای مواد ارتوتروپیک را در تست های CT و SENT ثبت شد. [۴]

عباسیان^۶ و همکاران، انتشار و انشعاب ترک در نمونه هایی با پیش ترک و شکاف با استفاده از تئوری پری دینامیکی غیرمحملی را مدل سازی کردند. آنها مدل مبتنی بر پیوند را به صورت عددی اجرا کردند

¹ Guo

² Bond-based

³ Zhang

⁴ State-based

⁵ Orthotropic

⁶ Abbasiniyan

که امکان شبیه‌سازی ویژگی‌های مختلف شکست ترد دینامیکی مانند انتشار ترک، مسیرهای ترک نامتقارن و شاخه‌های متوالی را ممکن ساخت. شبیه‌سازی شکست صفحات نازک ساخته شده از مواد ترد با الگوهای ترک و شکاف‌های مختلف در نظر گرفته شد. نرم افزار LAMMPS برای تجزیه و تحلیل عددی دو بعدی در تئوری پری‌دینامیکی به کار گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی شده قابلیت تئوری پری‌دینامیکی را برای پیش‌بینی دقیق مسیرهای انتشار ترک و همچنین ایجاد شکاف در طول فرایند شکست دینامیکی نشان داد. [۵]

از مشکلات روش‌های مرسوم در تحلیل ترک، وجود شرایط خاص بر نوک ترک است که برای بهبود روند تحلیل چنین سازه‌هایی روش پری‌دینامیک مطرح می‌شود، در این تئوری نقاطی از جسم که جابه‌جایی یا مشتقات جابجایی در آنها ناپیوسته باشد، از سایر نقاط مادی متمایز نمی‌شود. اکبری و کاظمی رشد ترک در یک تیر با ترک اولیه، تحت بار ضربه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. [۶]

پری‌دینامیک یک نظریه در مکانیک جامدات است که از معادلات انتگرال‌گیری به جای معادلات دیفرانسیل جزئی به عنوان معادلات حاکم استفاده می‌کند که این برای مسائل شکست در مقایسه با روش مکانیک شکست اعمال می‌شود. شفيعی با استفاده از مسائل پری‌دینامیک، مسیر ترک برای ترک مایل تحت بارگذاری دینامیکی را بررسی کرد. ویژگی اصلی انتشار ترک دینامیکی مانند شاخه‌های ترک پاسخی بهینه برای این مساله است. این مساله برای زوایا، مقادیر تنش مختلف و همچنین تأثیر هندسه بر رشد ترک مایل بررسی شد. با مقایسه نتایج با پاسخ‌های دینامیک مولکولی، پاسخی منطقی را در موقعیت و زمان شاخه‌ها نشان داد. [۷]

شکوری و کاظمی رشد یک ترک مورب در ورق تحت سرعت‌های مختلف کشش لبه‌ها، مورد مطالعه قرار دادند. اثر تغییر زاویه ترک و سرعت اعمال بار کششی در ورق بررسی شد و نتایج حاصل به خوبی مدل‌سازی رشد ترک موربی برای سرعت‌های مختلف کشش لبه‌ها توسط تئوری پری‌دینامیک نشان دادند. سرعت اعمال بار علاوه بر ترک اولیه تأثیر بسزایی در نحوه رشد ترک دارد، به طوری که با افزایش سرعت اعمال بار پدیده چند شاخه شدن ترک اتفاق افتاده و ماده رفتار ترد تری از خود بروز می‌دهد. [۸]

از چالش‌های عمده در مکانیک محیط‌های پیوسته، پیش‌بینی شروع و رشد ترک است. فرض پیوسته بودن جسم پس از تغییر شکل، مشکل اصلی در فرمول بندی ریاضی پیش‌بینی رشد ترک است؛ بنابراین، ساختار ریاضیاتی مسئله با به وجود آمدن یک ناپیوستگی (مانند ترک و شکست) دچار مشکل می‌شود. این اتفاق بدلیل استفاده تئوری کلاسیک از معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی برای تشریح فضای مادی رخ می‌دهد که مشتقات جزئی در محل ناپیوستگی تعریف نشده است. روش پری‌دینامیک برای مدل‌سازی مسائل ناپیوستگی‌هایی مانند ترک و شکست در سازه به عنوان نوعی دیگر از تغییر شکل استفاده می‌کند. شکوری و کاظمی رشد ترک در ورق با دو ترک پادمتقارن تحت کشش را بررسی و پس از صحه گذاری نتایج با مطالعات موجود، اثر سرعت اعمال بارکشی بر نحوه رشد ترک را مورد بررسی قرار دادند. [۹]

ژو^۱ و همکاران به تجزیه و تحلیل فرایند شکست دینامیکی در مواد کامپوزیت تقویت شده با فیبر با یک مدل پری‌دینامیکی پرداختند. آنها یک مدل پری‌دینامیک مبتنی بر پیوند برای مطالعه فرایند شکست دینامیکی درون صفحه‌ای در کامپوزیت‌های اورتوتروپیک ارائه کردند. این اولین مدلی است که به کمک چقرمگی دینامیکی مربوط به سرعت ترک، هم‌زمان فرایند شکست دینامیکی ضربه را شبیه‌سازی کرد. آن‌ها علاوه بر وضعیت شکست نهایی، فرایند شکست و سرعت ترک را هم‌زمان با استفاده از انرژی شکست دینامیکی به درستی پیش‌بینی کردند. [۱۰]

ها^۲ و بوبارو^۳ به بررسی رشد ترک دینامیکی در مواد ترد را با استفاده از تئوری غیرمحملی پری‌دینامیک پرداختند. آنها با آزمایش‌هایی بر روی مواد مختلف اثر سرعت انتشار را در نوک ترک با تغییر اندازه‌ی خط افق و اثر پارامتر میکرو مدول، را بررسی کردند، و از هیچ معیار خاصی برای انتشار ترک، انحنای ترک یا چندشاخگی استفاده نکردند [۱۱ و ۱۲]. پارامترهای مواد کلاسیک، مانند مدول الاستیک و سرعت آزادسازی انرژی شکستگی، برای تعیین پاسخ مواد و شکست در مواد ترد استفاده می‌شود. نتایج نشان

¹ Zhou

² Hu

³ Bobaru

می‌دهد که فرمول پری‌داینامیک پیشنهاد شده، می‌تواند فرایند شکاف دینامیکی سه‌بعدی در مواد ترد، از جمله انتشار و چند شاخگی ترک‌ها را بررسی کند [۱۳]

یولوم^۱ و همکاران به بررسی مسئله انتشار ترک در صفحات تخت ارتوپروپ نازک تحت بارهای خمشی می‌پردازد. با معرفی رفتار مکانیکی لایه ارتوتروپیک، تغییر شکل برشی آن را در نظر نگرفتند (صفحه کیرشلف). معیارهای شکست با محدود کردن بیشترین انحنا، مقادیر شکست را ایجاد می‌کنند که ممکن است در جهات مختلف متفاوت باشند. نتایج به دست آمده از مثال‌های عددی، نشانگر انطباق خوب آن‌ها با نتایج حاصل از روش‌های محاسبات کلاسیک است و همچنین الگوهای به دست آمده از ترک عددی، دنبال کننده خصوصیات ارتوتروپی به روش معقولی هستند. [۱۴]

هوو همکاران مدل پری‌داینامیک برای شکست دینامیک در کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر یک‌طرفه را بررسی و تأثیر امواج الاستیک در ماتریس آسیب و مسیرهای انتشار ترک مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از این مدل، اثرات ناشی از بارگذاری‌های مختلف دینامیکی بر روی شکست و رفتار آسیب کامپوزیت‌های تقویت‌شده با فیبر تک‌جهته را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. برخلاف نتایج حاصل از بارگذاری شبه‌استاتیک، شبیه‌سازی‌ها نشان داد که شرایط دینامیکی می‌تواند منجر به هم‌زیستی و انتقال بین حالت‌های شکست شود. مدل جدید برای جهت‌گیری فیبر دل‌خواه نسبت به شبکه گسسته سازی یکنواخت و همچنین با گسسته سازی تصادفی کار می‌کند. در نمونه‌های دارای بارعرضی ترک جسم منشعب شده و دو ترک ایجاد می‌شود که این شاخه‌های ترک ایجاد شده همانند ماده ایزوتروپیک هستند که بدون ایجاد شکست بر روی پیوندهای فیبر حرکت می‌کنند. [۱۵]

در دهه‌های گذشته تلاش‌های مهمی برای مدل‌سازی آسیب و شکست مواد بر اساس تئوری کلاسیک مکانیک اجسام پیوسته انجام شد. به دلیل تعریف این معادلات بر حسب مشتقات پاره‌ای و عدم تعریف مشتقات پاره‌ای در مکان‌های ناپیوسته مانند ترک، نمی‌توان از آن‌ها به صورت مستقیم در ناپیوستگی‌های

¹ Yolum

جسم استفاده کرد؛ بنابراین برای مدل سازی مسائلی که دارای ناپیوستگی در مکان هستند به معیارها و روابط اضافی از پیش تعریف شده نیاز است که این روابط و معیارهای اضافی عموماً بر پایه مفهوم شدت تنش استوار می باشند. دو دسته اصلی مدل هایی که تاکنون برای مدل سازی انتشار ترک در مواد ترد به کار رفته اند، مدل هایی با مبنای مکانیک پیوسته و مدل های اتمی می باشند. [۱۶]

شلیانیکوف^۱ تأثیر بارگذاری دو محوره و زاویه اولیه ترک را برای میدان تنش الاستیک - پلاستیک ترکهای نیمه بیضوی و با در نظر گرفتن هر سه مود شکست مورد بررسی قرار داد [۱۷]. در این تحقیق از معیار ماکزیمم تنش مماسی در روش اجزای محدود سه بعدی استفاده شده است.

لیپتون^۲ و آلالی^۳ [۱۸]، زو^۴ و دو^۵ [۱۹، ۲۰] و ویچنر^۶ و امریچ^۷ [۲۱] فرضیات مختلف و یکتایی نتایج را برای تعادل مومنتوم در پری دینامیک خطی پایه گذاری کردند. این مقالات هم ارز بودن نتایج را با حل ضعیف معادلات کلاسیک در الاستیسیته خطی به تصویر کشیده و به طور مختصر نشان دادند که رفتار منظم معادلات پری دینامیک در یک محدوده از بین نمی رود.

سیلینگ^۸ [۲۲] مدل پری دینامیک حالت - مبنا که مدل جدیدی از پری دینامیک است را ارائه داد و به بررسی تفاوت بین این مدل و مدل پیوند - مبنا پرداخت. در این مطالعه بیان شده است که هر جفت از ذرات در مدل پری دینامیک پیوند-مبنا، مستقل از شرایط محلی دیگر ذرات بوده و تنها از طریق نیرویی که در راستای خط مرکزی دو ذره است برهم کنش دارند. برای یک ماده ایزوتروپیک خطی، این فرض موجب شد که نسبت پواسون ماده مقدار $1/4$ (و در مسائل دو بعدی مقدار $1/3$) در نظر گرفته شود. نتایج این مدل در یک مسئله شکست دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفت [۲۳].

¹ Shlyannikov

² Lipton

³ Alali

⁴ Zhou

⁵ Du

⁶ Weckner

⁷ Emmrich

⁸ Silling

لئوچک^۱ به مطالعه تئوری پری داینامیک برای استخراج قوانین پایداری انرژی و مومنتم با استفاده از اصول مکانیک محاسبات کلاسیک پرداخته است [۲۴].

تاکنون عوامل مؤثر بر رشد ترک در صفحه کامپوزیتی به صورت کامل مورد بررسی قرار نگرفته است و فقط دو مورد زاویه‌ی قرارگیری الیاف برای 0° و 90° و اثر شدت تنش اعمالی مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو در این پژوهش به تحلیل تأثیر زاویه قرارگیری الیاف در جسم، شدت تنش اعمالی بر جسم و همچنین نحوه اعمال آن بر صفحه کامپوزیتی موردنظر (بصورت کششی، برشی و خمشی) و همچنین نوع پیش ترک اولیه در صفحه کامپوزیتی موردنظر و زاویه قرارگیری پیش ترک در جسم بر چگونگی انتشار ترک در آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

¹ Lehoucq

فصل ۳ : روش شناسی پژوهش

۱-۳ مقدمه

در این فصل روش و چگونگی انجام کار و ابزارهای گردآوری اطلاعات مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۳ روش تجزیه و تحلیل اطلاعات

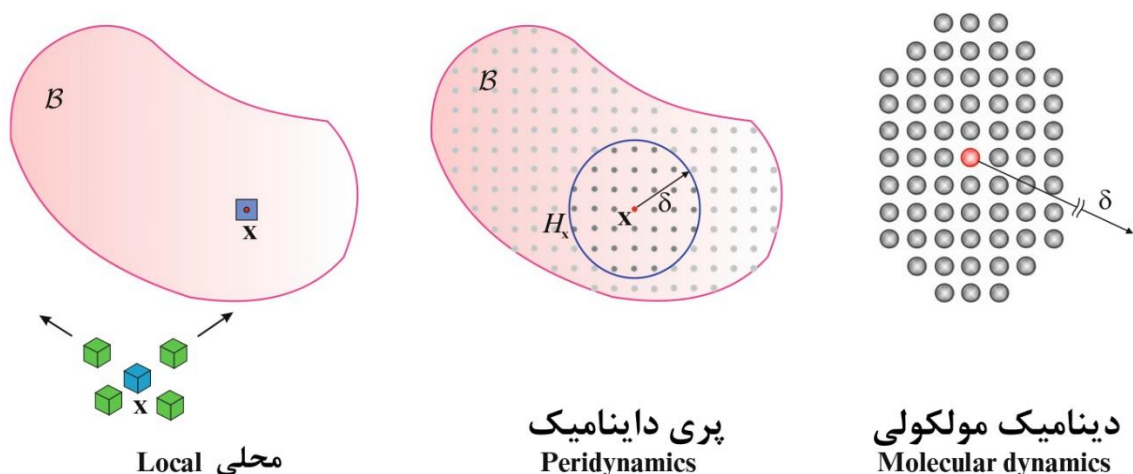
در این پژوهش با استفاده از تئوری پری‌دینامیک مبتنی بر پیوند به تحلیل و مدل‌سازی رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک‌لایه تک‌جهته در نرم افزار LAMMPS پرداخته شد. همچنین در این پژوهش نتایج حاصل از تئوری پری‌دینامیک با نتایج حاصل از روش المان محدود توسعه‌یافته در نرم افزار ABAQUS مورد مقایسه قرار گرفت. لازم به ذکر است که در این پژوهش عوامل مؤثر بر رشد ترک در صفحه کامپوزیتی موردنظر نظیر اثر میزان شدت تنش اعمالی بر جسم و نحوه بارگذاری بر آن و زاویه قرارگیری الیاف در جسم در چهار حالت مختلف 0° ، 30° ، 45° و 90° و همچنین نوع پیش ترک و سوراخ موجود در جسم و زاویه قرارگیری آن (صفحه کامپوزیتی موردنظر) بر چگونگی انتشار ترک در آن مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۳ تئوری محلی کلاسیک

به طور کلی برای تحلیل و مدل‌سازی آسیب و رشد ترک در اجسام می‌توان از تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته و تئوری دینامیک مولکولی استفاده کرد. از فرض‌های اساسی در تئوری کلاسیک می‌توان به موقعیت ذرات اشاره کرد به این‌گونه که یک نقطه مادی تنها با نقاط کناری خود برهم‌کنش دارد، بنابراین می‌توان گفت این تئوری یک تئوری محلی می‌باشد. در مکانیک کلاسیک، تنش در هر نقطه وابسته به تغییر شکل در همان نقطه است. با پیشرفت‌های علمی صورت‌گرفته، پیش‌بینی شروع رشد ترک و پیشروی آن در ماده، از چالش‌های مهم در مکانیک پیوسته کلاسیک به شمار می‌آید.

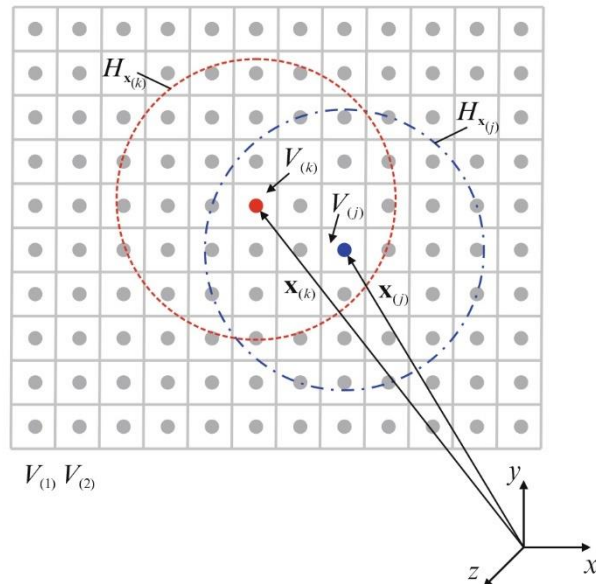
مهم‌ترین مشکل در فرمول‌بندی ریاضی تئوری کلاسیک، این است که جسم بعد از تغییر شکل، همچنان پیوسته در نظر گرفته می‌شود. درحالی که فرمول‌بندی ریاضی در صورت وجود ناپیوستگی در جسم، تجزیه شده و قسمت ناپیوسته را از فرمول بندی جدا می‌کند. تئوری کلاسیک، به کمک معادلات دیفرانسیل جزئی فرمول بندی می‌شود که در ناپیوستگی‌ها مشتقات مکانی تعریف نمی‌شود. این مشکل باعث می‌شود تئوری کلاسیک در ناپیوستگی‌هایی همچون ترک کارایی و پاسخ مناسبی از خود نشان ندهد. در این روش برای استفاده از روش اجزای محدود باید محل ترک و مسیر رشد آن مشخص باشد که این کار باعث وابستگی شدید به نوع مش و هندسه آن می‌شود. با توجه به مشکلات تئوری محلی در مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها، روش دینامیک مولکولی در سال‌های اخیر بسیار بکاربرده شده است.

تئوری غیرمحلی در محیط پیوسته، پیونددهنده بین مکانیک پیوسته کلاسیک و دینامیک مولکولی می‌باشد. در تئوری مکانیک کلاسیک، یک نقطه از ماده تنها از نقاط مجاور خود تأثیر می‌پذیرد این درحالیست که در مدل پیوسته غیرمحلی، متأثر از ناحیه‌ای با شعاع مشخص از نقاط است. با افزایش نامحدود این شعاع، تئوری غیرمحلی به تئوری پیوسته دینامیک مولکولی تبدیل می‌شود. در شکل زیر تفاوت تئوری‌های محلی و غیرمحلی و مدل دینامیک مولکولی را شاهد هستیم.



شکل (۱-۳): ارتباط بین مدل‌های محلی و غیرمحلی [۲۷]

با توجه به شکل، هر نقطه x با تمام نقاط در شعاع همسایگی δ برهم کنش دارد. نقاط مادی که در فاصله δ از مجموعه x قرار دارند را H_x می نامیم. در مکانیک پیوسته کلاسیک برای تحلیل های یک، دو و سه بعدی، تعداد نقاط مادی در همسایگی نقطه x با احتساب خود نقطه به ترتیب ۳، ۵، ۷ می باشد.



شکل (۲-۳): نحوه قرارگیری ذرات و همسایگی مربوط به هر ذره در تئوری پری داینامیک [۲۷]

ذره مادی با نقاط داخل همسایگی اش اندرکنش داشته و متأثر از تغییر شکل جمعی این مواد است. اگر نیروی اندرکنش ذره از نظر اندازه با هم برابر و در یک راستا باشند به آن پری داینامیک باندی گفته می شود. اگر این دو نیرو در یک راستا باشند ولی از نظر اندازه یکسان نباشند آن را پری داینامیک معمول حالت پایه می نامیم و در نهایت اگر دو نیرو از نظر اندازه با هم یکسان نباشند و در یک راستا قرار نگیرند به آن پری داینامیک غیر معمول حالت پایه می گوئیم [۲۷]. در این پژوهش از تئوری پری داینامیک باندی استفاده شده است که برای مطالعه دو حالت دیگر این تئوری می توان به مطالعات انجام شده در این زمینه مراجعه کرد [۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰].

۴-۳ تئوری پری داینامیک

وجود ضعف‌های مختلف در تئوری‌های محلی و غیرمحلی در بررسی ناپیوستگی‌ها باعث شد که سیلینگ [۲۵، ۲۲] تئوری غیرمحلی جدیدی به نام تئوری پری داینامیک را مطرح کند که قادر به حل این مشکل (بررسی ناپیوستگی‌ها) باشد. فرمول بندی این تئوری جدید، شباهت زیادی به تئوری غیرمحلی ارایه شده توسط کونین دارد.

در فرمول بندی این تئوری، جابه‌جایی‌ها جایگزین مشتقات جابه‌جایی می‌شوند. تئوری پری داینامیک یک بازنویسی از معادلات حرکت برای مدل‌سازی اجسام ناپیوسته، از قبیل ترک‌ها در مکانیک جامدات می‌باشد که بر پایه‌ی معادلات انتگرالی استوار است. اما در تئوری کلاسیک از معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده می‌شود. اساس تئوری پری داینامیک معادلات انتگرالی بوده درحالی که در مکانیک پیوسته کلاسیک برحسب مشتقات جابه‌جایی است، این موضوع مهم‌ترین اختلاف دو تئوری می‌باشد. این ویژگی پری داینامیک باعث می‌شود که شروع آسیب در چند نقطه و با مسیرهای دلخواه درون ماده را مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

۵-۳ فرمول بندی تئوری پری داینامیک مبتنی بر مدل پیوند

در تئوری پری داینامیک، اجسام از نقاط مادی زیادی تشکیل شده‌اند که هر یک از این نقاط مادی موقعیت و مکان خاصی را در هر لحظه نشان می‌دهند. در این تئوری مدل‌سازی و تحلیل بر اساس حرکت و تغییر شکل اجسام، با توجه به اثر متقابل بین نقطه مادی x_k با دیگر نقاط مادی احتمالی از جسم مانند x_j که $j = 1, 2, 3, \dots, \infty$ است، انجام می‌شود. در نتیجه بین نقاط x_k و دیگر نقاط مادی، اثرات متقابل بسیار زیادی می‌تواند به وجود آید [۲۷].

در این تئوری فرض می‌شود که محدوده تعامل در نقطه مادی x_k با دیگر نقاط مادی توسط خط افق δ تعیین گردد. در این صورت نقاط مادی که در فاصله‌ای کمتر از خط افق δ از نقطه x_k باشند را

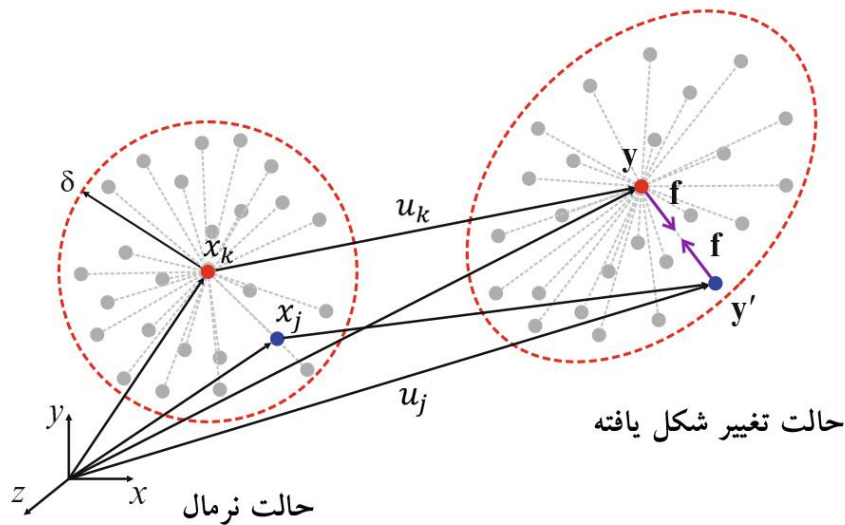
خانواده یا فامیلی نقطه x_k گفته می‌شود که با $\mathcal{H}_{x_k}$ نشان داده می‌شود. بدیهی ست که در خارج از ناحیه $\mathcal{H}_{x_k}$ نقاط مادی در تعامل با نقطه مادی x_k تأثیری برهم ندارند [۲۷].

همچنین برهم‌کنش بین دو نقطه مادی x_k و x_j ، پیوند (باند) گفته می‌شود که موقعیت نسبی این دو نقطه از طریق بردار پیوند ξ_{kj} ، نشان داده می‌شود. با توجه به مطالب بالا فامیلی نقطه مادی x به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathcal{H}_{x_k} = \{x_j \in B \mid 0 < |x_j - x_k| \leq \delta\} \quad (3-1)$$

$$\xi_{kj} = x_j - x_k \quad (3-2)$$

با توجه به رابطه (۳-۱)، خانواده نقطه مادی x در حالت دو بعدی به صورت دایره‌ای و در حالت سه بعدی به صورت کره‌ای به مرکز x و به شعاع خط افق δ می‌باشند و در حالت یک خط به طول خط افق δ می‌باشد [۲۷].



شکل (۳-۳): شماتیک همسایگی نقطه مادی x_k و نمایش بردار پیوند میان دو نقطه مادی x_k و x_j [۲۷]

مفهوم همسایگی نقطه مادی x و بردار پیوند میان دو نقطه در شکل ۳-۱ نمایش داده شده است. تئوری پری‌دینامیک جابه‌جایی نسبی دو ذره را در پیکربندی فعلی به صورت زیر بیان می‌کند [۲۷]:

$$\eta_{kj} = u(x_j, t) - u(x_k, t) \quad (3-3)$$

در رابطه (۳-۳)، $u(x_k, t)$ و $u(x_j, t)$ به ترتیب بیانگر بردار جابه‌جایی نقاط x_k و x_j نسب به

دستگاه مختصات مرجع می‌باشند. بردار موقعیت نسبی دو نقطه مادی x_k و x_j در پیکربندی حاضر با بردار $\xi_{kj} + \eta_{kj}$ نشان داده می‌شود [۳۱]. از مفاهیم اصلی این نظریه این است که بعد از تغییر شکل پیکربندی مرجع، مطابق شکل (۳-۳)، خانواده و پیوندهای نقطه مادی x_k نیز دچار تغییر می‌شود. معادله کلاسیک تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته به کمک اصل مومنتوم خطی و با برابری نرخ تغییرات مومنتوم خطی با نیروی اعمال شده به جسم به دست می‌آید [۳۲]:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} \quad (۳-۴)$$

در رابطه (۳-۴)، ρ چگالی ماده، $\ddot{\mathbf{u}}$ بردار شتاب، $\boldsymbol{\sigma}$ تانسور تنش و $\mathbf{b}$ بردار نیروی حجمی^۱ می‌باشد. در معادله فوق در نقاط مختلف جسم، مشتقات مکانی مورد نیاز است در صورتی که این مشتقات در نقاط منفرد و ناپیوستگی‌های جسم تعریف نشده است.

در تئوری پری‌داینامیک، معادله حرکت نقاط مادی (ذرات) با استفاده از انتگرال گیری روی ناحیه کوچک در خانواده هر یک از نقاط مادی برای محاسبه نیروی اعمالی به آن نقطه به دست می‌آید. بنابراین داریم [۱۶]:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}(x_k, t) = \int \mathbf{f}(u(x_j, t) - u(x_k, t)), x_j - x_k dV_{x_k} + \mathbf{b}(x_k, t) \quad (۳-۵)$$

در رابطه بالا $\mathbf{f}$ نشان دهنده تابع برداری نیروی ست که ذره x_j به ذره x_k وارد می‌کند که به آن تابع نیروی جفتی^۲ گفته می‌شود. این نیرو تابعی از جابه‌جایی نسبی^۳ و موقعیت نسبی^۴ نقاط مادی x_k و x_j بوده که همه خواص ساختاری ماده را شامل می‌شود. انتگرال فوق در ناحیه $\mathcal{H}_{x_k}$ گرفته می‌شود. از آنجایی که نقاط خارج از خط افق پیوندی با نقطه مادی x_k ندارند، تابع نیروی جفتی $\mathbf{f}$ برای این نقاط صفر می‌باشد.

$$|\xi_{kj}| > \delta \rightarrow \mathbf{f}(\eta_{kj}, \xi_{kj}) = 0 \quad \forall \xi_{kj}, \eta_{kj} \quad (۳-۶)$$

^۱ Body force

^۲ pairwise force function

^۳ relative displacement

^۴ relative position

باتوجه به قانون سوم نیوتن شکل کلی تابع $\mathbf{f}$ تعیین می‌شود. طبق این قانون نیرویی که ذره x_k به ذره x_j وارد می‌کند، برابر است با منفی نیرویی که ذره x_k به ذره x_j وارد می‌کند بنابراین داریم :

$$\mathbf{f}(-\eta_{kj}, -\xi_{kj}) = -\mathbf{f}(\eta_{kj}, \xi_{kj}) \quad \forall \xi_{kj}, \eta_{kj} \quad (3-7)$$

شرط بقای مومنتوم خطی روی نیروی جفتی $\mathbf{f}$ طبق رابطه (3-7) ارضا می‌شود. طبق قانون بقای مومنتم زاویه‌ای داریم:

$$(\xi_{kj} + \eta_{kj}) \times f(\eta_{kj}, \xi_{kj}) = 0 \quad \forall \xi_{kj}, \eta_{kj} \quad (3-8)$$

طبق رابطه بالا و شکل (3-3)، در این تئوری نیروی بین دو نقطه مادی، موازی بردار نسبی آنها $(\xi_{kj} + \eta_{kj})$ در پیکربندی فعلی (بعد از تغییر شکل) خواهد بود.

۳-۶ مدل سازی آسیب در تئوری پری داینامیک

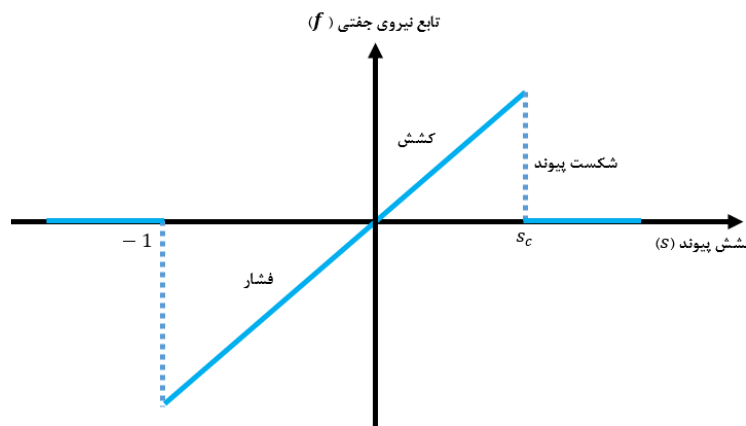
مدل سازی آسیب در تئوری پری داینامیک بدین صورت است که هرگاه تغییر طول نسبی بردار پیوند میان نقاط مادی موجود در جسم از یک مقدار بحرانی از پیش تعیین شده بیشتر شود، پیوند بین آن دو گره (نقطه مادی) می‌شکند و در گره‌های آن پیوند آسیب و ترک رخ می‌دهد. یک پیوند شکسته شده نیرویی تحمل نمی‌کند و این پیوند دیگر قابل ترمیم شدن نخواهد بود، یعنی هرگاه یک بردار پیوند میان دو نقطه مادی موجود در جسم بشکند، شکسته خواهد ماند. البته در مرجع پتانسیل‌هایی تعریف شده است که پیوند ناشی از این پتانسیل ها می‌تواند بعد از شکسته شدن، دوباره ترمیم شود. این نوع پتانسیل‌ها برای مدل سازی مسائل چسبیدگی به کار می‌روند. با وارد شدن آسیب به مدل پری داینامیک، تغییر شکل ماده میکروالاستیک وابسته به تاریخچه می‌شود. پس می‌توان رابطه نیروی جفتی را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$f(\eta, \xi) = \frac{\xi + \eta}{|\xi + \eta|} c(|\xi|) s\mu(t, |\xi|) \quad (3-9)$$

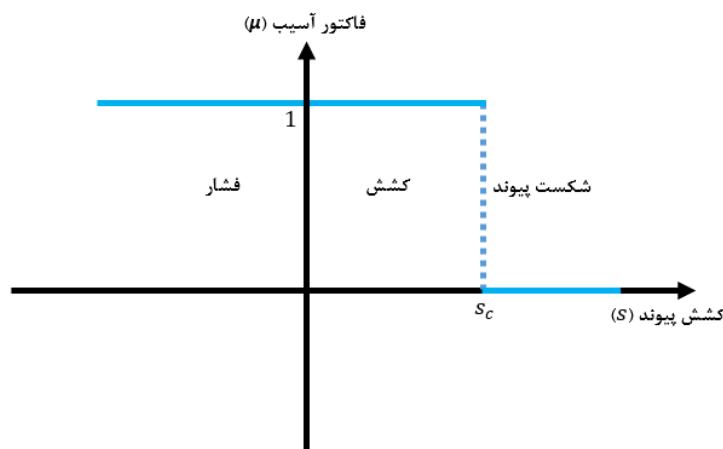
که در رابطه فوق، $\mu(t, |\xi|)$ ، یک تابع اسکالر و وابسته به زمان که مقدار آن صفر یا یک بوده که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu(x, t, |\xi|) = \begin{cases} 1 & , \quad s(t', \xi) < s_0 \quad 0 \leq t' \leq t \\ 0 & , \quad otherwise \end{cases} \quad (3-10)$$

در رابطه بالا، تغییر طول نسبی بحرانی بردار پیوند میان دو نقطه مادی با s_0 نشان داده شده است. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده و رابطه (۳-۱۰) زمانی که s از s_0 بیشتر شود، پیوند بین دو نقطه از هم گسیخته شده و آسیب شکل می‌گیرد. در شکل (۳-۴) ارتباط میان نیروی جفتی میان نقاط مادی و تغییر طول بردار پیوند میان آن‌ها نشان داده شده است. همچنین در شکل (۳-۵) ارتباط بین فاکتور آسیب $(\mu(x, t, \xi))$ با تغییر طول بردار پیوند میان نقاط مادی موجود در جسم نشان داده شده است.



شکل (۳-۴): نمایش نیروی موجود در پیوند میان دو نقطه مادی x_j و x_k

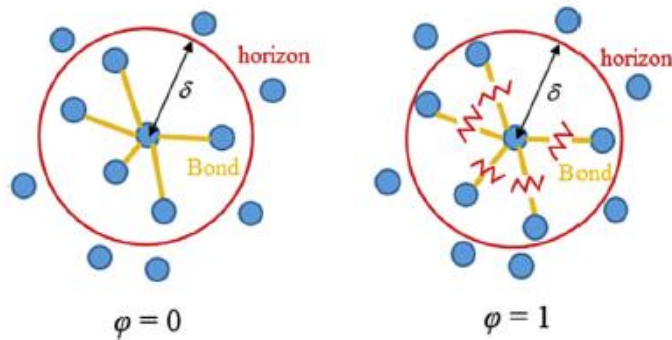


شکل (۳-۵): نمایش نیروی موجود در پیوند میان دو نقطه مادی x_j و x_k

با توجه به مطالب بالا، می‌توان معیار آسیب و شکست محلی را برای نقطه مادی x در جسم در تئوری پری‌داینامیک به صورت زیر تعریف کرد:

$$\varphi(x, t) = 1 - \frac{\int_{Hx} \mu(x, t, \xi) dv \xi}{\int_{Hx} dv \xi} \quad (3-11)$$

از آنجا که مقدار $\mu(x, t)$ بین صفر تا یک متغیر است، و با توجه به رابطه (۳-۱۱) مقدار $\varphi(x, t)$ نیز بین صفر تا یک متغیر خواهد بود. با توجه به رابطه بالا، در صورتی که $\varphi = 0$ باشد، همه پیوندهای متصل به نقطه مادی سالم بوده و اگر $\varphi = 1$ باشد، آسیب در تمامی پیوندهای متصل به نقطه مادی رخ می‌دهد.



شکل (۳-۶): نمایش پیوندهای سالم و شکسته شده برای یک نقطه مادی

در تئوری پری‌داینامیک مبتنی بر پیوند، تنها راه انتقال نیرو در ذرات ماده، نیروی پیوند بین آنها است. با توجه به این موضوع ذراتی که هیچ پیوندی ندارند را می‌توان یک ذره آزاد معرفی کرد. هدف از معرفی نیروهای رانشی کوتاه برد، دربرگرفتن نیروهای تماسی و جلوگیری از برهم‌نهی آنها است. مجموع این نیروها با نیروهای جفتی، نیروی کلی وارد شده بر یک ذره از جسم را نشان می‌دهد. نیروی رانشی از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$f_s(\eta, \xi) = \frac{\xi + \eta}{|\eta + \xi|} \min \left\{ 0, \frac{c_s}{\delta} (|\eta + \xi| - d_s) \right\} \quad (3-12)$$

$$d_s = \min \{ 0, 9(|\xi|, 1.35) (r_s + r'_s) \} \quad (3-13)$$

در رابطه بالا نیروی رانش کوتاه برد با $f_s(\eta, \xi)$ و شعاع گره را با r_s نشان و مقدار آن برابر با نصف ضلع مکعب گره یعنی مقدار $\Delta x/2$ ، در نظر گرفته می شود. معمولاً مقدار c_s برابر $c_s = 15c$ ، می باشد. به کمک روابط ذکر شده و مقایسه تئوری پری داینامیک با تئوری مکانیک جامدات، تابع نیروی جفتی در پیوند میان دو نقطه مادی به صورت زیر نوشته می شود:

$$f = cs, \eta = s\xi \Rightarrow f = c\eta / \xi \quad (3-14)$$

همچنین، تابع میکرو پتانسیل به صورت زیر به دست می آید:

$$w = \int_0^{\xi} \frac{c\eta}{\xi} d\eta = \frac{c\eta^2}{2\xi} = \frac{cs^2\xi}{2} \quad (3-15)$$

در تئوری پری داینامیک برای حالت دوبعدی و سه بعدی، انرژی لازم برای شکسته شدن پیوند میان دو نقطه مادی با استفاده از روابط (3-16) تا (3-17) محاسبه می شود.

$$w = \frac{1}{2}t \int_0^{\delta} \left(\frac{cs^2\xi}{2} \right) 2\pi\xi d\xi = \frac{\pi cs^2\delta^3 t}{6} \quad (3-16)$$

$$w = \frac{1}{2}t \int_0^{\delta} \left(\frac{cs^2\xi}{2} \right) 4\pi\xi^2 d\xi = \frac{\pi cs^2\delta}{4} \quad (3-17)$$

در تئوری کلاسیک مکانیک جامدات، چگالی انرژی کششی از رابطه زیر به دست می آید:

$$w_e = \frac{1}{2} \{\sigma\}^T \{y\} \quad (3-18)$$

در شرایط یکسان چگالی انرژی کرنشی به دست آمده در تئوری کلاسیک مکانیک جامدات را برابر تئوری پری داینامیک قرار داده و مقدار میکرو مدول تئوری پری داینامیک به دست آورده شد:

$$c = 18k / \pi\delta^4 \quad (3-19)$$

با توجه به تعاریف بالا، انرژی لازم برای شکسته شدن پیوند میان دو نقطه مادی x_j و x_k به صورت زیر بدست می آید:

$$w_0(\xi) = \int_0^{s_0} g(s)(\xi ds), \xi = |\xi| = \frac{cs_0^2 \xi}{2} \quad (3-20)$$

در تئوری پری داینامیک، انرژی لازم برای شکسته شدن تمامی پیوندهای متصل به نقطه مادی X برای حالت دوبعدی و سه بعدی به ترتیب به صورت زیر محاسبه می شود:

$$G_{0_{2D}} = 2t \int_0^\delta \int_0^\delta \int_0^{\cos^{-1} z/\delta} \left(\frac{\cos^2 \xi}{2} \right) \sin \phi d\phi d\xi dz \quad (3-21)$$

$$G_{0_{3D}} = \int_0^\delta \int_0^{2\pi} \int_0^{\cos^{-1} z/\delta} \int_0^{\cos^2 \xi} \left(\frac{\cos^2 \xi}{2} \right) \sin \phi d\phi d\xi dz \quad (3-22)$$

انرژی شکست برای حالت دوبعدی و سه بعدی به ترتیب در روابط (3-29) و (3-30) نشان داده شده است.

$$G_0 = \frac{\pi cs_0^4 t \delta^4}{4} \quad (3-23)$$

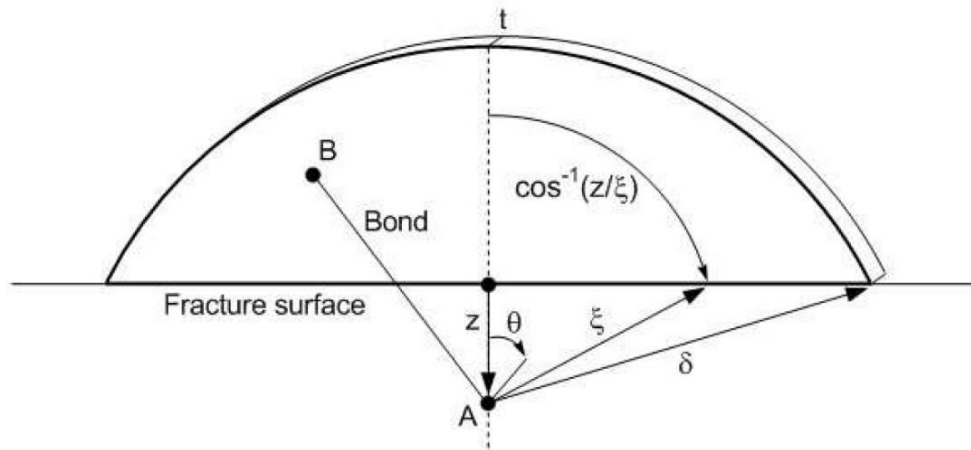
$$G_0 = \pi cs_0 / 2 \delta^5 \quad (3-24)$$

در روابط بالا G_0 مقدار انرژی شکست می باشد که به کمک آزمایشات تجربی محاسبه می شود.

شکل 3-5 نشان دهنده نحوه محاسبه انرژی شکست نقطه مادی X برای حالت دوبعدی تئوری پری داینامیک می باشد. تغییر طول نسبی بحرانی بردار پیوند میان دو نقطه مادی با s_0 نشان داده می شود که برای حالت دو بعدی و سه بعدی به ترتیب داریم:

$$s_0 = \sqrt{\frac{4\pi G_0}{9E\delta}} \quad (3-25)$$

$$s_0 = \sqrt{\frac{10G_0}{\pi c \delta^5}} = \sqrt{\frac{5\pi G_0}{9k\delta}} \quad (3-26)$$



شکل (۳-۷): نحوه محاسبه انرژی لازم برای شکسته شدن تمام پیوندهای متصل به نقطه مادی X [۱۶]

۳-۷ مدل سازی کامپوزیت ها با استفاده از تئوری پری داینامیک

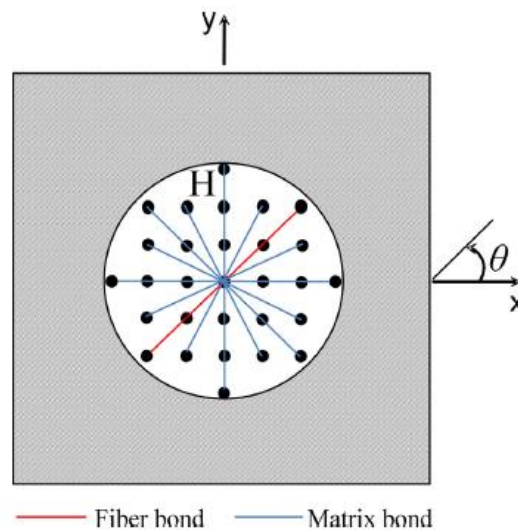
در مدل سازی اجسام ایزوتروپیک، برهم کنش های موجود در میان نقاط مادی در جسم مستقل از جهت می باشند. حال اگر بخواهیم یک ورق یا صفحه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف را با استفاده از نظریه پری داینامیک مدل سازی کنیم، وابستگی به جهت نیز باید در برهم کنش های موجود میان نقاط مادی در جسم در نظر گرفته شود. در نتیجه برای مدل سازی ورق یا صفحه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف که جهت الیاف در آن θ است در تئوری پری داینامیک همانطور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده است برای مدل سازی کامپوزیت ها می بایست، دو نوع پیوند که عبارتند از پیوند در جهت ماتریس یا زمینه و پیوند در جهت الیاف برای نقاط مادی تعریف کرد. پیوند در راستای الیاف نشان دهنده برهم کنش بین دو نقطه مادی در امتداد جهت الیاف در صفحه کامپوزیتی موردنظر می باشد، در حالیکه پیوند در راستای ماتریس یا زمینه نشان دهنده برهم کنش بین نقاط مادی در جهت عمود بر جهت الیاف و نشان دهنده برهم کنش میان نقاط مادی در جهت ماتریس می باشد. در تئوری پری داینامیک میکرومدول پیوندهای میان نقاط مادی در جهت الیاف (پیوند الیاف) را با C_f و میکرومدول پیوندهای میان نقاط مادی در جهت ماتریس (پیوند ماتریس) را با C_m نشان

می‌دهند میکرومدول‌های مربوط به پیوند میان نقاط مادی در جهت الیاف (C_f) و ماتریس (C_m) به صورت زیر تعیین می‌شوند [۶۵]:

$$C_f = \frac{2kE_1(E_1 - E_2)}{(E_1 - \frac{1}{9}E_2)(\sum_{q=1}^Q \xi_{kj} V_q)} \quad , \quad C_m = \frac{8(1-k)E_1E_2}{(E_1 - \frac{1}{9}E_2)\pi L\delta^3} \quad (3-27)$$

در رابطه فوق، E_1 ، E_2 ، G_{12} و ν_{12} ، ثابت الاستیک صفحه کامپوزیتی موردنظر و k ، کسر حجمی الیاف، و L ، ضخامت لایه است. همچنین ξ_{kj} ، نشان دهنده بردار پیوند اولیه بین نقطه مادی x و نقطه مادی x_k می‌باشد. V_{x_k} ، نماد حجم نقطه مادی x_k و Q نماد تعداد کل نقاط مادی موجود در امتداد جهت الیاف می‌باشد. با استفاده از میکرومدول‌های مربوط به پیوند میان نقاط مادی در جهت الیاف (C_f) و ماتریس (C_m)، میکرومدول در هر جهت دلخواه (C) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C = C_f \cos^2 \varphi + C_m \sin^2 \varphi \quad \leftarrow \quad \varphi = \text{جهت الیاف و بردار پیوند} \quad (3-28)$$



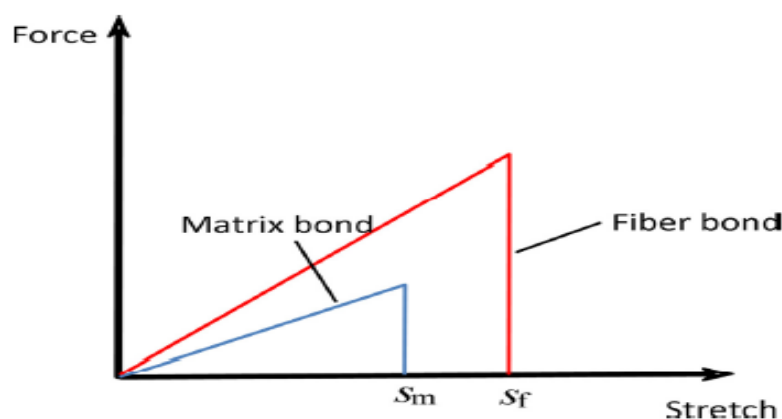
شکل (۳-۸): دو نوع بردار پیوند در یک لایه (پیوند در راستای الیاف و پیوند در راستای ماتریس) [۳۳]

مقاومت صفحه کامپوزیتی در جهت‌های متفاوت، مختلف می‌باشد. مقاومت ورق کامپوزیتی در جهت‌های مختلف را می‌توان بر اساس پیوند الیاف و پیوند ماتریس می‌توان تعیین کرد. کشش‌های

بحرانی (تغییر طول نسبی بحرانی بردار پیوند) بردار پیوند الیاف (S_f) و پیوند ماتریس (S_m) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$S_f = \sqrt{\frac{10G_f}{\pi c_f \delta^5}} \quad , \quad S_m = \sqrt{\frac{10G_f}{\pi c_f \delta^5}} \quad (3-29)$$

در رابطه فوق، G_m و G_f به ترتیب انرژی شکست کل برای پیوندهای در جهت ماتریس و الیاف می‌باشند. با توجه به مطالب گفته شده، در شکل (۳-۷)، رابطه بین نیروی پیوند میان نقاط مادی و کشش (کرنش) بردار پیوند در الیاف و ماتریس نشان داده شده است. برای مدل سازی کامپوزیت‌های چندلایه با استفاده از نظریه پری داینامیک که متشکل از چندین ورق کامپوزیتی با جهت‌گیری‌های مختلفی به روی هم قرار دارند، پیوندی به نام پیوند بین لایه‌ای تعریف شده است و فرض بر این است که نقاط مادی هر لایه فقط با نقاط مادی لایه‌های مجاور خود حق برهم کنش و تعامل دارند. در شکل (۳-۸) مفهوم پیوند بین لایه‌ای نشان داده شده است. با توجه به این مفهوم می‌توان گفت شکست پیوند بین لایه‌ای، به معنای ورقه شدن یک ورقه کامپوزیتی چند لایه است.



شکل (۳-۹): رابطه بین نیروی پیوند میان نقاط مادی و کرنش (کشیدگی) پیوند [۳۴]

میکرومدول پیوند بین لایه‌ای، c_{in} ، را می‌توان بر اساس تغییر شکل یکنواخت بین لایه‌های مجاور تعیین کرد. دو لایه مجاور $Ply(K-1)$ و $Ply(K)$ از یک کامپوزیت چندلایه را که در شکل (۳-۹) نشان داده شده را در نظر بگیرید، یک کرنش همگن ϵ بر ورق کامپوزیت در امتداد جهت ضخامت

اعمال می شود. نقاط مادی $\dot{I}$ و $\dot{J}$ به ترتیب به لایه های مجاور $Ply(K-1)$ و $Ply(K)$ تعلق دارند.

نقطه مادی $\dot{J}$ در همسایگی نقطه مادی $\dot{I}$ است. بنابراین کشش پیوند بین لایه ای بین نقاط مادی $\dot{I}$

و $\dot{J}$ را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\lambda_{ij} = \frac{\frac{L + L\varepsilon}{\cos(\alpha_{ij} - \beta)} - L/\cos\alpha_{ij}}{L/\cos\alpha_{ij}} = \frac{(1 + \varepsilon)\cos\alpha_{ij}}{\cos(\alpha_{ij} - \beta)} - 1 \quad (3-30)$$

در رابطه اخیر، L ضخامت لایه و α_{ij} زاویه جهت پیوند بین لایه ای قبل از تغییر شکل و β ، زاویه

جهت پیوند بین لایه ای پس از تغییر شکل است. بر اساس قضیه سینوس ها، داریم:

$$\beta = \arctan\left(\frac{\varepsilon \sin\alpha_{ij} \cos\alpha_{ij}}{1 + \varepsilon \cos^2\alpha_{ij}}\right) \quad (3-31)$$

پس از ساده سازی داریم:

$$\lambda_{ij} = \varepsilon \cos^2\alpha_{ij} \quad (3-32)$$

بنابراین، نیروی پیوند میان نقاط مادی موجود در امتداد جهت ضخامت ورق را می توان در قالب

مجموع نیروهای جفتی پیوندهای بین لایه ای بین $Ply(K)$ و $Ply(K-1)$ بیان کرد. در عین حال،

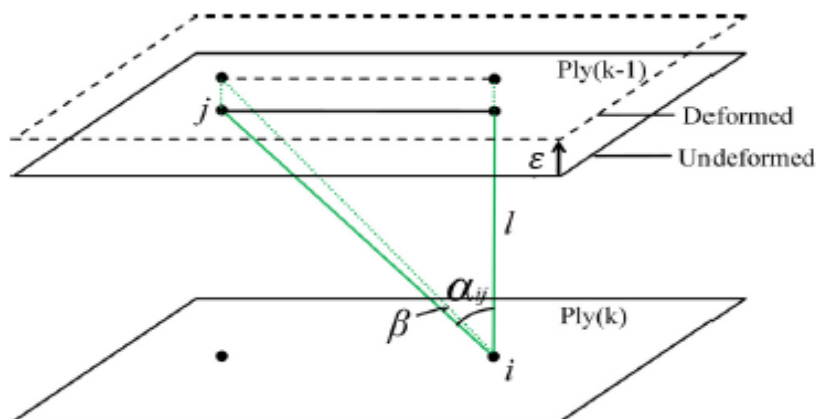
این نیروی پیوند میان نقاط مادی مساوی با نیروی الاستیک عرضی در ورق کامپوزیتی است. بدین

ترتیب خواهیم داشت:

$$\sum_i \sum_j c_{in} \lambda_{ij} \cos\alpha_{ij} V_j V_i = E_m \varepsilon A \quad (3-33)$$

در رابطه (3-33)، E_m ، مدول الاستیک نقاط مادی درون ماتریس می باشد بنابراین:

$$c_{in} = \frac{E_m A}{\sum_i \sum_j \cos^3\alpha_{ij} V_j V_i} \quad , \quad S_{in} = \sqrt{\frac{10G_m}{\pi c_{in} \delta^5}} \quad (3-34)$$

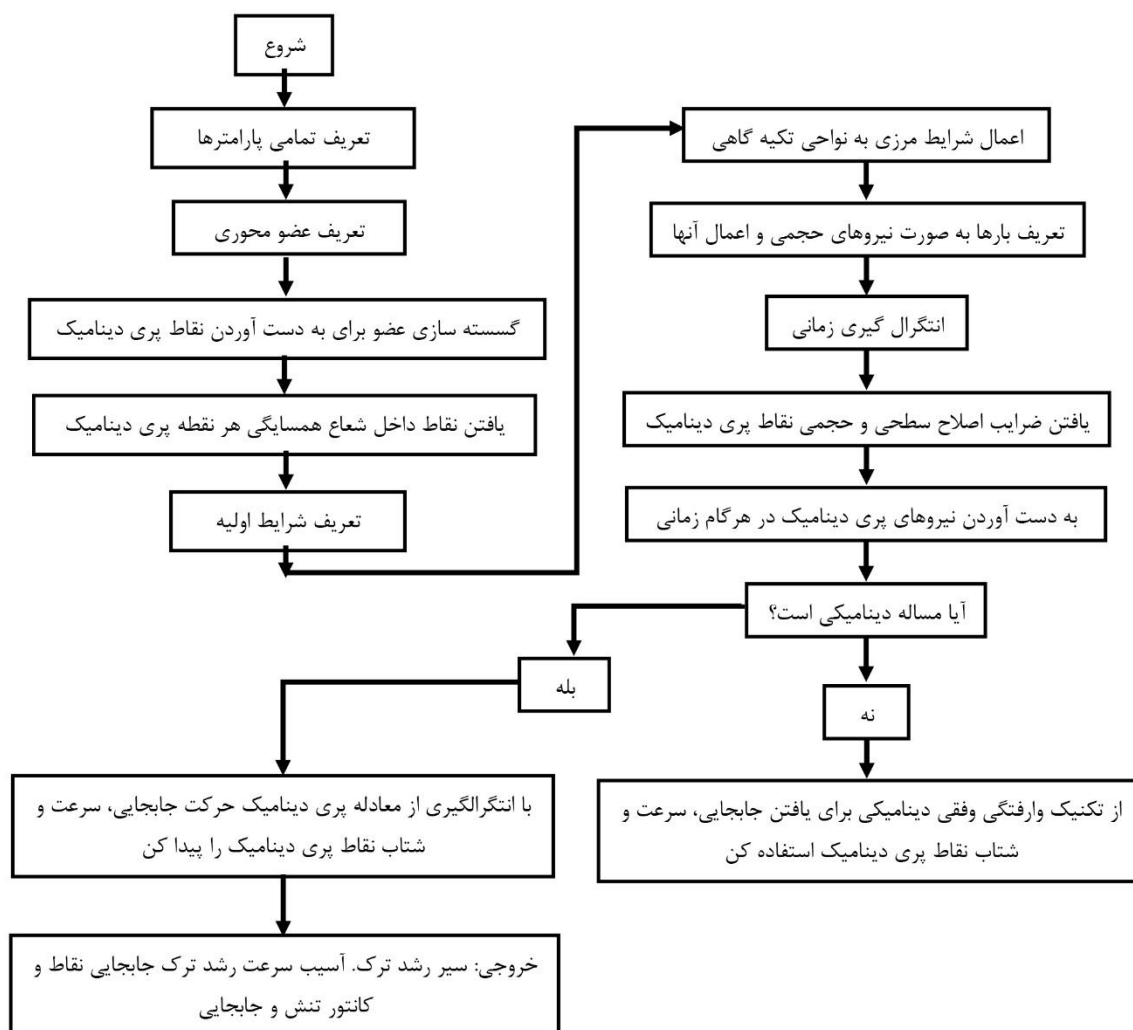


شکل (۳-۱۰): نمایش پاسخ بین لایه ای ورق کامپوزیتی چندلایه [۳۴]

بنابراین در مدل سازی پانل های ساندویچی و کامپوزیت های چندلایه، با استفاده از نظریه پری داینامیک همواره باید نکات زیر را رعایت کنیم:

- در کامپوزیت های چندلایه یا پانل های ساندویچی، همواره فرض بر این است که نقاط مادی هر لایه فقط می تواند با نقاط مادی لایه های مجاور خود بطور مستقیم پیوند و برهم کنش داشته باشد.
- در کامپوزیت های چندلایه یا پانل های ساندویچی همواره سه نوع پیوند داریم که عبارتند از:
 - پیوند در جهت ماتریس
 - پیوند در جهت الیاف
 - پیوند بین لایه ها

فلوچارت حل عددی تئوری پری دینامیک در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱-۳) : فلوچارت حل عددی تئوری پری دینامیک

فصل ۴ : شبیه سازی

۴-۱ مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک

افقی

در این بخش، در ابتدا جهت اعتبارسنجی کد نوشته شده در نرم افزار لمپس جهت مدل سازی رشد ترک در اجسام با استفاده از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند به مدل سازی رشد ترک دینامیکی در یک صفحه مستطیلی شکل که دارای یک پیش ترک افقی می باشد، پرداخته شده است. مقادیر طول و عرض صفحه مستطیلی مورد نظر به ترتیب برابر با $0.1m$ و $0.04m$ می باشند. هندسه صفحه مستطیلی مورد نظر به صورت شماتیک در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۴-۱)، طول پیش ترک افقی صفحه مستطیلی مورد نظر برابر با $a = 0.05m$ می باشد و مرزهای بالا و پایین جسم تحت تنش کششی یکنواخت $12MPa$ قرار دارند. ماده مورد بررسی در این بخش از جنس *Duran glass50* که خواص آن در جدول (۴-۱) بیان شده است.

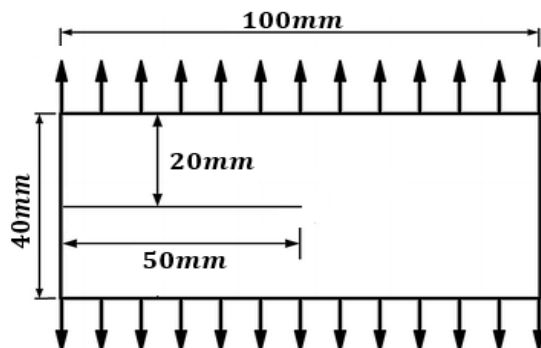
جدول (۴-۱) : خواص مکانیکی ماده *Duran 50 glass*

چگالی (ρ)	مدول یانگ (E)	نسبت پواسون (ν)	انرژی شکست (G_0)
2235 kg/m^3	$65GPa$	0.2	204 J/m^2

به منظور گسسته سازی صفحه مستطیلی مورد نظر برای تحلیل و مدل سازی رشد ترک در آن با استفاده از تئوری پری داینامیک، صفحه مورد نظر به شبکه هایی مربعی شکل با طول ضلع $\Delta x = 0.0005 \text{ m}$ تقسیم می شود. در این پژوهش مقادیر خط افق و گام زمانی جهت مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی مورد نظر با استفاده از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند در نرم افزار لمپس با توجه به منابع و مراجع در دسترس به ترتیب برابر با مقادیر $\delta = 4\Delta x$ و $\Delta t = 50 \text{ ns}$ در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای میکرومدول و کشش بحرانی با توجه به مرجع [۳۵] برای ماده *Duran glass50* به صورت زیر می باشند:

$$c = 2.328 \cdot 10^{19} \text{ N/m}^5, \quad s_0 = 0.001473$$

نتایج حاصل از مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی موردنظر در این بخش در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



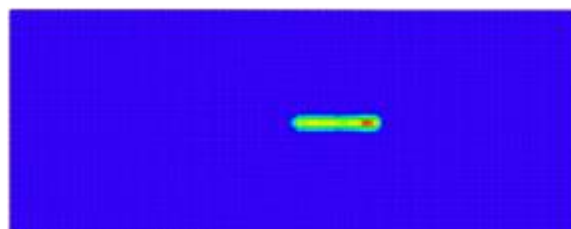
شکل (۴-۱): نمایش صفحه مستطیلی دارای پیش ترک افقی تحت تنش یکنواخت

همچنین در جدول (۴-۲) مکان و زمان پدیده انشعاب و چندشاخه شدن ترک در این پژوهش با منابع و مراجع در دسترس مقایسه شده است.

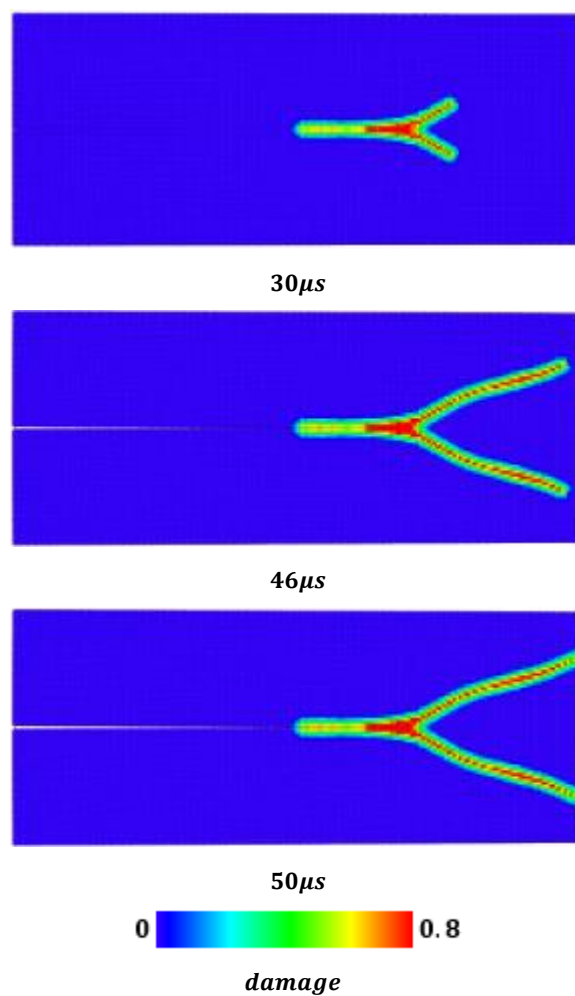
جدول (۴-۲): زمان و مکان انشعاب مسیر ترک در صفحه مستطیلی موردنظر تحت تنش یکنواخت

12MPa

پدیده انشعاب ترک		
مکان انشعاب ترک	زمان انشعاب ترک	
0.020m	26 μ s	روش المان محدود توسعه یافته (XFEM)
0.019m	25 μ s	نرم افزار لمپس
0.019m	25 μ s	مرجع [11]
0.021m	28 μ s	مرجع [7]

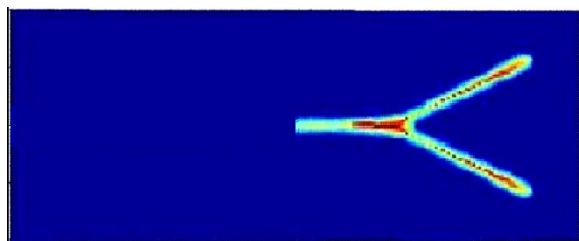


20 μ s

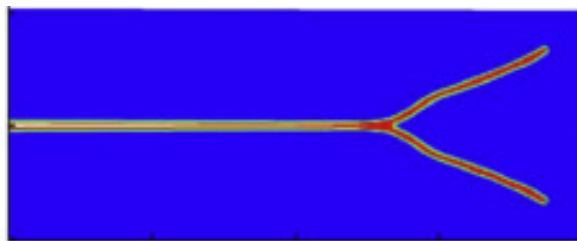


شکل (۲-۴): مسیر رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک افقی تحت تنش $12MPa$

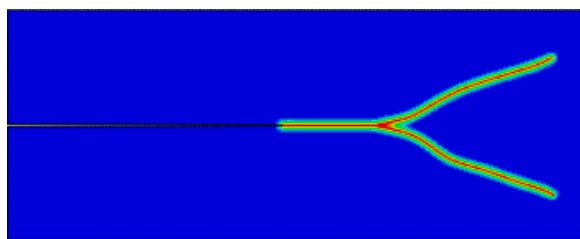
در شکل (۳-۴) به مقایسه نتایج حاصل جهت مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک با استفاده از نرم افزار لمپس و نتایج حاصل از روش المان محدود توسعه یافته و دیگر منابع در دسترس پرداخته شده است.



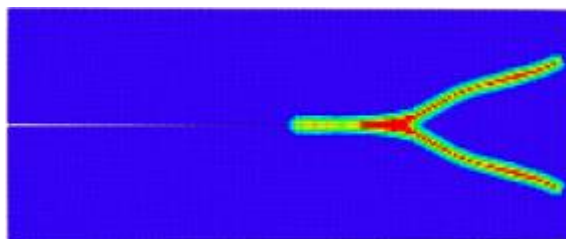
[7]



[11]



روش المان محدود توسعه یافته



نرم افزار لمپس

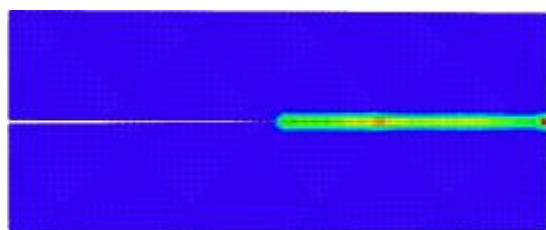


damage

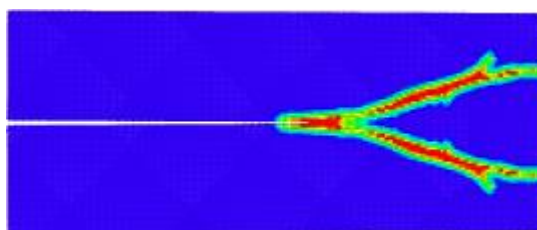
شکل (۳-۴): مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک تحت تنش $12MPa$

در ادامه در این قسمت به مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک افقی تحت تنش

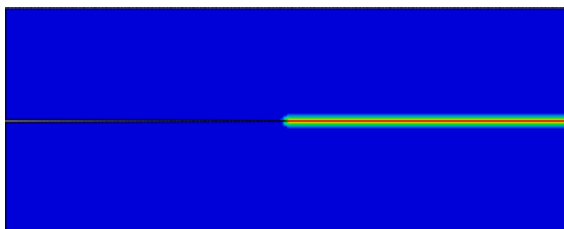
های مختلف پرداخته خواهد شد. نتایج حاصل از این قسمت در شکل (۴-۴) نشان داده شده است.



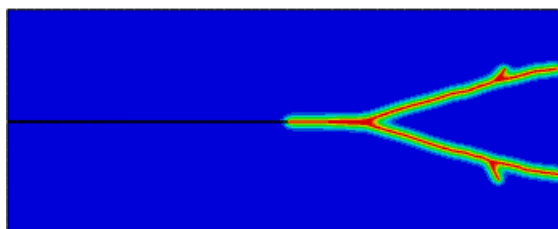
نرم افزار لمپس تحت تنش $6MPa$



نرم افزار لمپس تحت تنش $24MPa$



روش المان محدود توسعه یافته تحت تنش $6MPa$



روش المان محدود توسعه یافته تحت تنش $24MPa$



damage

شکل (۴-۴): مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای پیش ترک تحت تنش های مختلف

با مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی رشد ترک در شکل های (۲-۴) و (۴-۴) می توان بیان کرد که نحوه

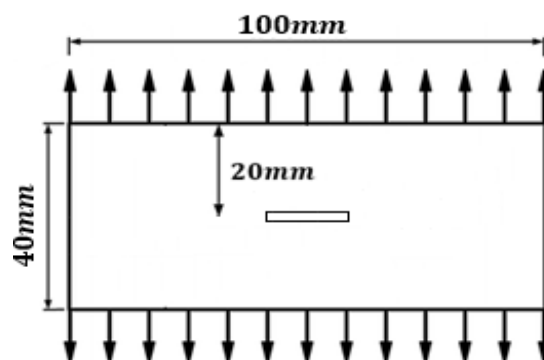
رشد ترک در جسم وابستگی بسیار زیادی به شدت تنش اعمالی بر آن دارد و با افزایش شدت تنش

اعمالی بر جسم (صفحه مستطیلی موردنظر) ماده رفتار تردتری از خود نشان می دهد و ترک در جسم

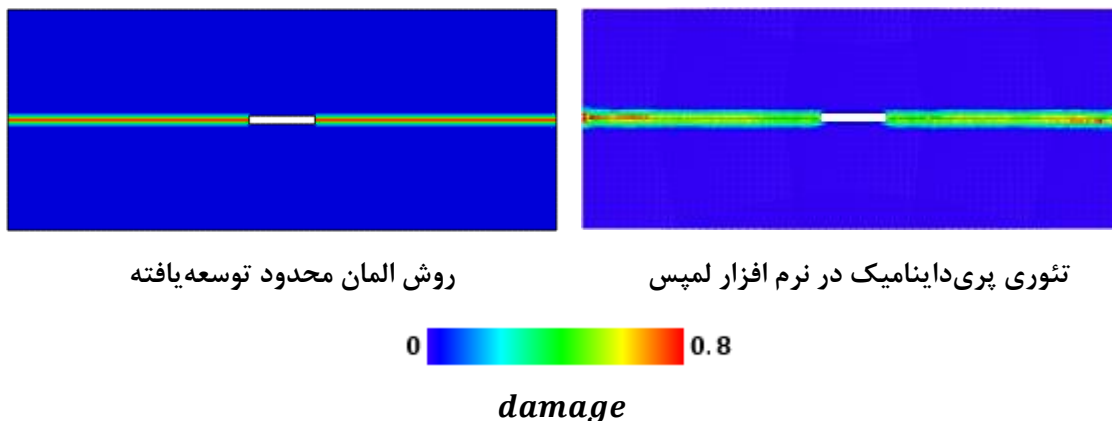
به صورت چندشاخه رشد می‌کند. همچنین با افزایش شدت تنش اعمالی بر جسم، سرعت رشد ترک در آن افزایش و در نتیجه زمان کل شبیه‌سازی کاهش می‌یابد. در واقع اگر شدت تنش اعمالی بر صفحه مستطیلی از یک حد مشخصی کمتر باشد، مود غالب شکست در صفحه مستطیلی موردنظر، مود اول خواهد بود و ترک در جسم بدون انشعاب و به صورت تک مسیر (خط مستقیم) رشد می‌کند و اگر شدت تنش اعمالی بر جسم از یک حد مشخصی بیشتر باشد، به دلیل افزایش اثر مود دوم شکست، ترک در صفحه مستطیلی موردنظر دچار پدیده انشعاب و بصورت چندشاخه رشد می‌کند. با توجه به قسمت (ب) شکل (۴-۴) می‌توان بیان کرد که اگر تنش اعمالی در صفحه مستطیلی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد، شاخه‌های اصلی مسیر رشد ترک در جسم نیز دچار پدیده انشعاب و چندشاخه می‌شوند.

۴-۲ رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای سوراخ مستطیلی

در این قسمت به مدل‌سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی با یک سوراخ افقی اولیه تحت تنش یکنواخت پرداخته شده است. هندسه صفحه مستطیلی موردنظر در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. طول و عرض ترک افقی اولیه به ترتیب برابر با $0.012m$ و $0.0015m$ می‌باشد. نتایج حاصل از مدل‌سازی رشد ترک در این قسمت با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته و تئوری پری‌داینامیک در نرم افزار لمپس در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل (۴-۵): صفحه مستطیلی دارای سوراخ افقی تحت تنش یکنواخت 12MPa



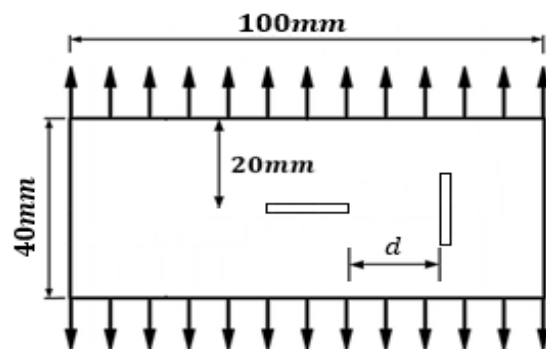
شکل (۴-۶): نتایج حاصل از مدل‌سازی مسیر رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای سوراخ مستطیلی در مرکز آن

۴-۲-۱ اثر تعداد و نحوه چیدمان سوراخ‌ها در جسم بر چگونگی انتشار

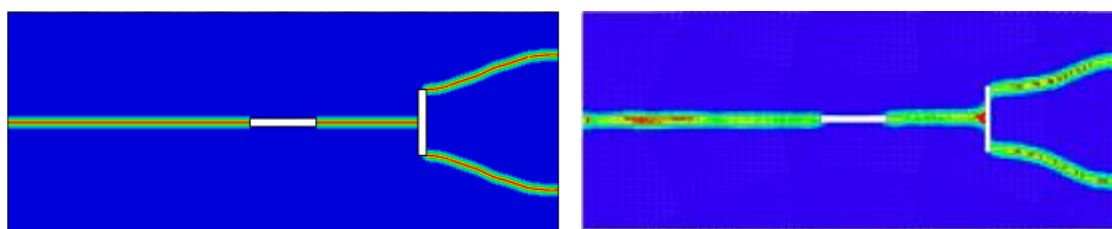
ترک در آن

در ادامه در این قسمت جهت بررسی اثر تعداد و نحوه چیدمان سوراخ‌ها در جسم بر چگونگی انتشار ترک در آن ابتدا به مدل‌سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی با یک سوراخ افقی و یک سوراخ عمودی اولیه پادمتقارن تحت تنش یکنواخت پرداخته شده است. هندسه صفحه مستطیلی موردنظر در شکل (۴-۷) نشان داده شده است. طول و عرض ترک افقی و عمودی اولیه به ترتیب برابر با $0.012m$ ، $0.0015m$ ، $0.012m$ و $0.0015m$ می‌باشند و فاصله سوراخ‌ها برابر با $d = 0.0185m$ می‌باشد. نتایج حاصل از مدل‌سازی رشد ترک در این قسمت در شکل (۴-۸) نشان داده شده است.

در ادامه به مدل‌سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای یک سوراخ یک افقی و دو سوراخ عمودی اولیه پرداخته شده است. هندسه صفحه مستطیلی موردنظر در شکل (۴-۹) نشان داده شده است. طول و عرض ترک افقی و عمودی اولیه به ترتیب برابر با $0.012m$ ، $0.0015m$ ، $0.012m$ و $0.0015m$ می‌باشند و فاصله سوراخ‌ها برابر با $d = 0.0185m$ می‌باشد. نتایج حاصل از مدل‌سازی رشد ترک در این قسمت در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۴-۷): صفحه مستطیلی دارای دو سوراخ پادمتقارن تحت تنش یکنواخت 12MPa



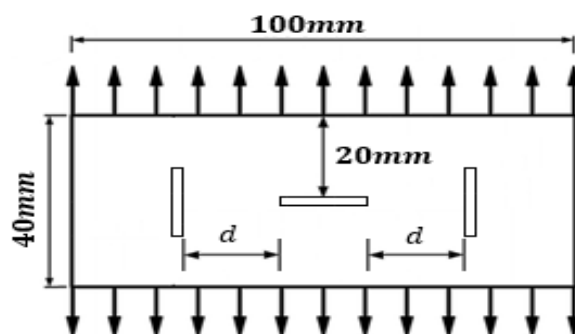
روش المان محدود توسعه یافته

تئوری پری داینامیک در نرم افزار لمپس

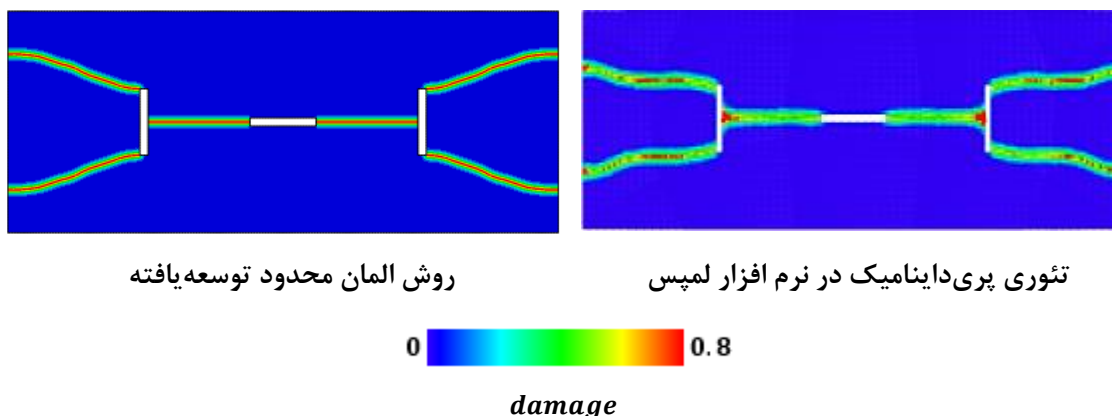
0 0.8

damage

شکل (۴-۸): نتایج حاصل از مدل سازی مسیر رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای دو سوراخ مستطیلی پادمتقارن



شکل (۴-۹): صفحه مستطیلی دارای سه سوراخ متقارن تحت تنش یکنواخت 12MPa



شکل (۴-۱۰): نتایج حاصل از مدل سازی مسیر رشد ترک در صفحه مستطیلی دارای دو سوراخ مستطیلی پادمتقارن

با مقایسه نتایج بدست آمده در شکل های (۴-۶)، (۴-۸) و (۴-۱۰) می توان بیان کرد که تعداد سوراخ ها در جسم و نحوه چیدمان آن ها در جسم بر چگونگی انتشار ترک در آن مؤثر خواهد بود. همچنین می توان بیان کرد که تئوری پری داینامیک و روش المان محدود توسعه یافته نزدیک بهم بوده است و همچنین تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند نسبت به روش المان محدود توسعه یافته بدون تغییر در معیار و بدون نیاز به روابط تکمیلی می تواند آسیب و رشد ترک در جسم را تحلیل و مدل سازی کند.

۴-۳ مقایسه روش المان محدود توسعه یافته و تئوری

پری داینامیک در تحلیل صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته

۴-۳-۱ صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته تحت کشش خالص

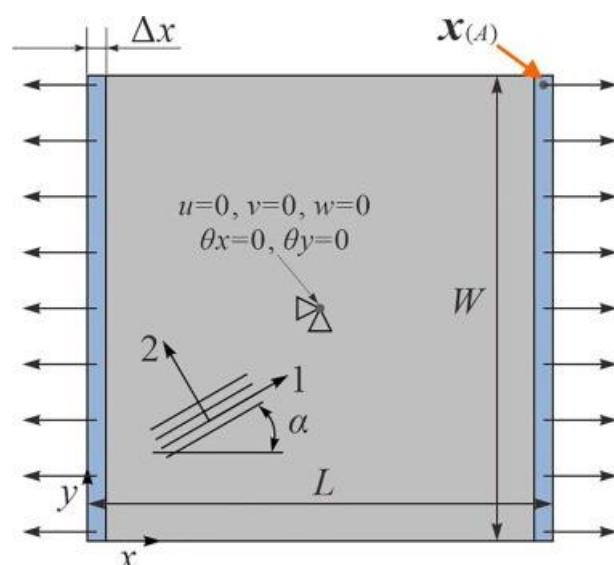
ابتدا در این قسمت به مقایسه نتایج حاصل از روش المان محدود توسعه یافته و تئوری پری داینامیک در تحلیل صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته تحت کشش محوری پرداخته خواهد شد. هندسه صفحه موردنظر در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. مطابق شکل (۴-۱۱) داریم که $L = W = 100mm$ و $h = 1mm$ همچنین خواص مکانیکی ماده به ترتیب عبارتند از [۳۵]:

$$E_1 = 164.3 \text{ GPa} \quad E_2 = 8.977 \text{ GPa} \quad G_{12} = 5.02 \text{ GPa} \quad \nu_{12} = 0.2$$

نتایج حاصل از جابه‌جایی نقطه مادی (ذره) x_A به مختصات $(L - 0.5 \cdot \Delta x$ و $w - 0.5 \Delta y$) در

جهت محور y ها با استفاده از روش تئوری، روش المان محدود توسعه‌یافته و روش تئوری پری‌داینامیک

در نرم افزار لمپس برای جهت‌های مختلف و متفاوت الیاف در جدول (۳-۴) نمایش داده شده است.



شکل (۴-۱۱): هندسه صفحه کامپوزیتی تک‌لایه تک‌جهت تحت کشش محوری در راستای محور x

جدول (۴-۳): نتایج حاصل از جابه‌جایی نقطه مادی x به مختصات $(L - 0.5 \cdot \Delta x$ و $w - 0.5 \Delta y$)

جهت الیاف (α)	حل تحلیلی	تئوری پری‌داینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه‌یافته	درصد خطا
0°	-0.099010	-0.099010	0%	-0.099020	1.0100E - 02%
15°	-1.358690	-1.358690	0%	-1.358695	3.6800E - 04%
30°	-0.825604	-0.825604	0%	-0.825614	1.2112E - 03%
45°	-0.464367	-0.464367	0%	-0.464377	2.1535E - 03%
60°	-0.220529	-0.220529	0%	-0.220539	4.5346E - 03%
75°	-0.069454	-0.069454	0%	-0.069464	1.4398E - 02%
90°	-0.005410	-0.005410	0%	-0.005435	4.6211E - 01%

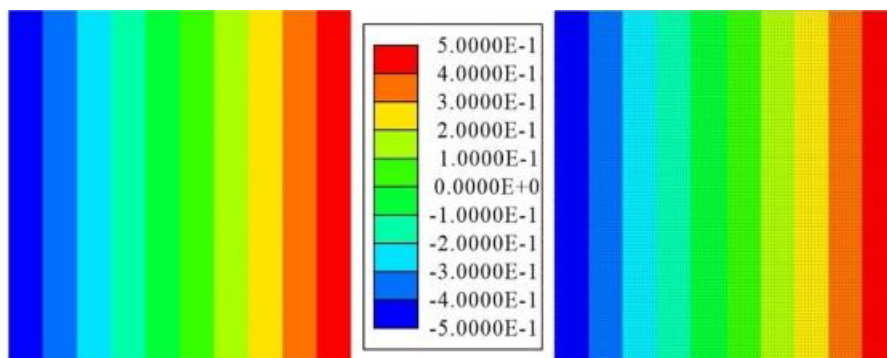
نیروی واکنش تکیه گاهی F_x برای گوشه سمت راست در جدول (۴-۴) آورده شده است.

با توجه به جدول (۳-۴) و (۴-۴) می‌توان بیان کرد که نتایج حاصل از روش تئوری پری‌دینامیک با نتایج حاصل از روش تئوری تطابق کامل دارد اما نتایج حاصل از روش المان محدود توسعه‌یافته دارای خطا نسبتاً کمی می‌باشد. در نتیجه می‌توان بیان کرد که تئوری پری‌دینامیک در تحلیل رفتار صفحه کامپوزیتی موردنظر نسبت به روش المان محدود توسعه‌یافته دارای برتری می‌باشد و نتایج آن کاملاً با نتایج حاصل از تئوری یکسان و بدون هیچگونه خطایی می‌باشد. همچنین با توجه به جدول (۳-۴) و (۴-۴) می‌توان بیان کرد که جهت الیاف در صفحه کامپوزیتی نیز در رفتار و تحلیل صفحه موردنظر تأثیر بسزایی دارد.

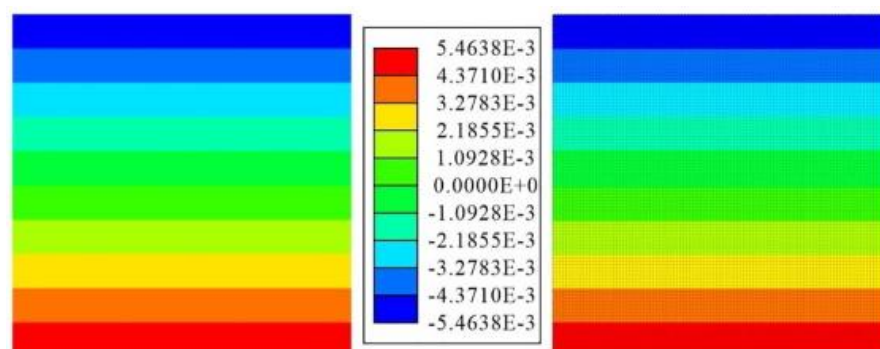
جدول (۴-۴) : نتایج حاصل برای نیروی واکنش تکیه گاهی $F_x [N]$ برای گوشه سمت راست

جهت الیاف (α)	حل تحلیلی	تئوری پری‌دینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه‌یافته	درصد خطا
0°	$1.6430E + 05$	$1.6430E + 05$	0%	$1.6450E + 05$	$1.2173E - 01\%$
15°	$5.5260E + 04$	$5.5260E + 04$	0%	$5.5283E + 04$	$4.1621E - 02\%$
30°	$2.1151E + 04$	$2.1151E + 04$	0%	$2.1171E + 04$	$9.4558E - 02\%$
45°	$1.2729E + 04$	$1.2729E + 04$	0%	$1.2748E + 04$	$1.4927E - 01\%$
60°	$1.0007E + 04$	$1.0007E + 04$	0%	$1.0017E + 04$	$1.0009E + 06\%$
75°	$9.1494 + 03$	$9.1494 + 03$	0%	$9.1519 + 03$	$2.7324E - 02\%$
90°	$8.9770E + 03$	$8.9770E + 03$	0%	$8.9785E + 03$	$1.6709E - 02\%$

دیاگرام و کانتور جابه‌جایی برای صفحه کامپوزیتی موردنظر با زاویه الیاف 90° در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است.



جابه‌جایی در جهت محور X با روش تئوری پری‌داینامیک جابه‌جایی در جهت محور X با روش المان محدود توسعه‌یافته

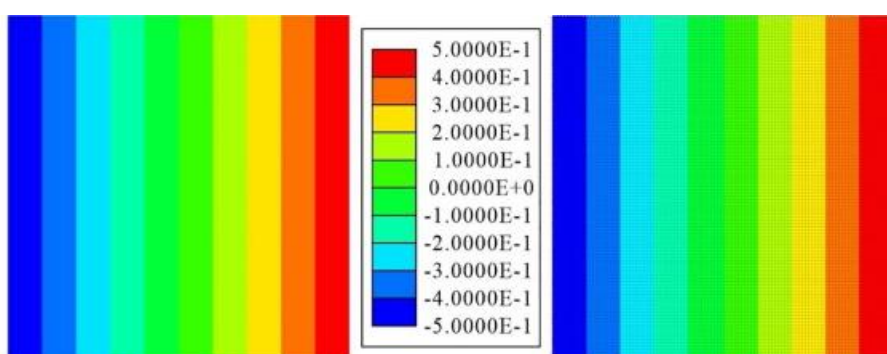


جابه‌جایی در جهت محور Y با روش تئوری پری‌داینامیک جابه‌جایی در جهت محور Y با روش المان محدود توسعه‌یافته

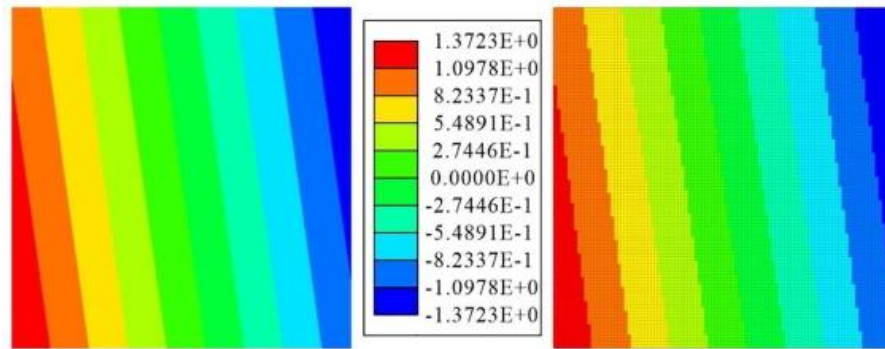
شکل (۱۲-۴): دیاگرام و کانتور جابه‌جایی برای صفحه کامپوزیتی موردنظر با زاویه الیاف 90°

در ادامه دیاگرام و کانتور جابه‌جایی برای صفحه کامپوزیتی موردنظر با زاویه الیاف 15° در شکل (۴-۱۳)

نشان داده شده است.



جابه‌جایی در جهت محور X با روش تئوری پری‌داینامیک جابه‌جایی در جهت محور X با روش المان محدود توسعه‌یافته



جابه‌جایی در جهت محور y با روش تئوری پری‌دینامیک جابه‌جایی در جهت محور y با روش المان محدود توسعه‌یافته

شکل (۱۳-۴): دیاگرام و کانتور جابه‌جایی برای صفحه کامپوزیتی موردنظر با زاویه الیاف 15°

با توجه به شکل (۱۲-۴) و (۱۳-۴) می‌توان بیان کرد که جهت الیاف بر جابه‌جایی نقاط جسم در صفحه کامپوزیتی موردنظر مؤثر می‌باشد.

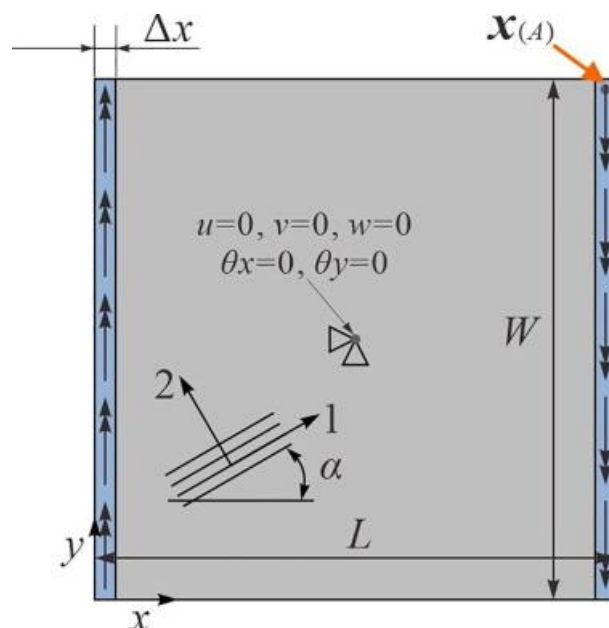
۲-۳-۴ صفحه کامپوزیتی تک‌لایه تک‌جهته تحت خمش خالص

در این قسمت به مقایسه نتایج حاصل از روش المان محدود توسعه‌یافته و تئوری پری‌دینامیک در تحلیل صفحه کامپوزیتی تک‌لایه تک‌جهته تحت خمش خالص پرداخته خواهد شد. هندسه صفحه موردنظر در شکل (۱۴-۴) نشان داده شده است.

در ابتدا جابه‌جایی نقطه مادی x_A در راستای محور Z برای صفحه کامپوزیتی با الیاف 0° برای نسبت پواسون‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است و نتایج حاصل در جدول (۵-۴) نشان داده شده است.

در جدول (۶-۴) واکنش تکیه‌گاهی M_y برای صفحه کامپوزیتی با الیاف 0° برای نسبت پواسون‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است.

با توجه به جدول (۵-۴) می‌توان بیان کرد که نسبت پواسون بر جابه‌جایی در راستای محور Z برای صفحه کامپوزیتی تاثیرگذار می‌باشد و نتایج حاصل از تئوری پری‌دینامیک کاملاً منطبق بر نتایج حاصل از روش تئوری می‌باشد اما روش المان محدود توسعه‌یافته دارای درصد خطای کمی می‌باشد.



شکل (۴-۱۴): صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته تحت خمش خالص

جدول (۴-۵) : جابه جایی نقطه x_A در راستای محور z برای صفحه کامپوزیتی با الیاف 0°

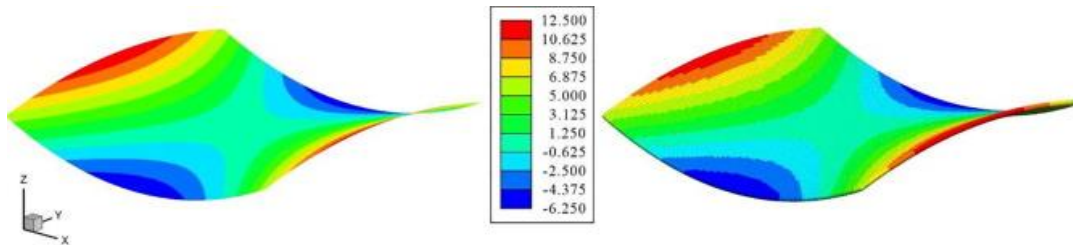
نسبت پواسون	حل تحلیلی	روش پری دینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه یافته	درصد خطا
-0.5	18.380551	18.380551	0%	18.380678	6.9095E - 04%
0.0	12.253701	12.253701	0%	12.253835	1.0935E - 03%
0.5	6.126850	6.126850	0%	6.126928	1.2731E - 03%

جدول (۴-۶) : واکنش تکیه گاهی $M_y [N.m]$ برای صفحه کامپوزیتی با الیاف 0°

نسبت پواسون	حل تحلیلی	روش پری دینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه یافته	درصد خطا
-0.5	-1.369E + 04	-1.369E + 04	0%	-1.373E + 04	2.9218E - 01%
0.0	-1.369E + 04	-1.369E + 04	0%	-1.373E + 04	2.9218E - 01%
0.5	-1.369E + 04	-1.369E + 04	0%	-1.373E + 04	2.9218E - 01%

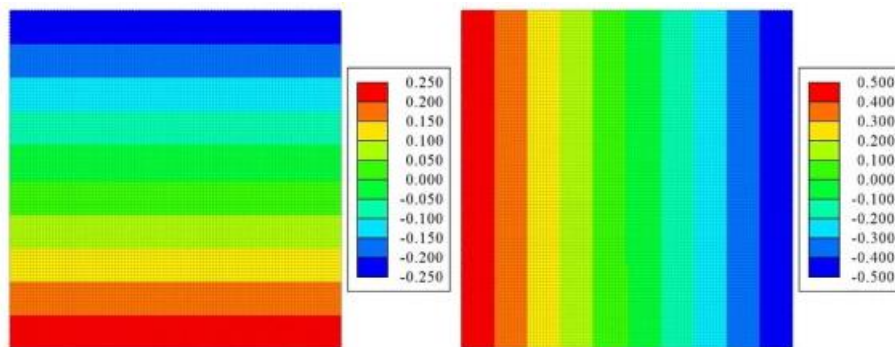
در شکل (۴-۱۵) تغییر شکل صفحه کامپوزیتی با الیاف 0° به ترتیب برای نسبت پواسون $\nu = 0.5$ نشان داده شده است. با توجه به این شکل می توان بیان کرد که نسبت پواسون

در نظر گرفته شده برای صفحه کامپوزیتی بر روی تغییر شکل صفحه موردنظر تحت خمش خالص مؤثر می‌باشد.



جابه‌جایی در راستای محور Z با استفاده از روش المان محدود توسعه‌یافته

جابه‌جایی در راستای محور Z با استفاده از روش تئوری پری‌دینامیک



چرخش در راستای محور X با استفاده از روش تئوری پری‌دینامیک

چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش تئوری پری‌دینامیک

شکل (۱۵-۴): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی با الیاف 0° در حالت $v_{12} = 0.5$ تحت خمش خالص

در ادامه به مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی تغییر مکان در جهت محور Z برای صفحه کامپوزیتی موردنظر تحت خمش خالص با زاویه الیاف های متفاوت پرداخته شده است. نتایج حاصل از این قسمت در جدول (۴-۷) بیان شده است.

جدول (۷-۴): نتایج حاصل از پیش‌بینی جابه‌جایی در جهت محور Z برای صفحه کامپوزیتی موردنظر تحت خمش خالص

جهت الیاف (α)	حل تحلیلی	تئوری پری دینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه‌یافته	درصد خطا
0°	6.126850	6.126850	0%	6.137520	$1.7415E - 01\%$
15°	-11.0735	-11.0735	0%	-11.2765	$1.8332E + 00\%$
30°	-9.2248	-9.2248	0%	-9.2542	$3.1871E - 01\%$

1.1413E + 00%	1.1607	0%	1.1741	1.1741	45°
1.1815E - 01%	7.6083	0%	7.6173	7.6173	60°
1.9921E - 02%	11.0415	0%	11.0437	11.0437	75°
4.5426E - 02%	13.2023	0%	13.2083	13.2083	90°

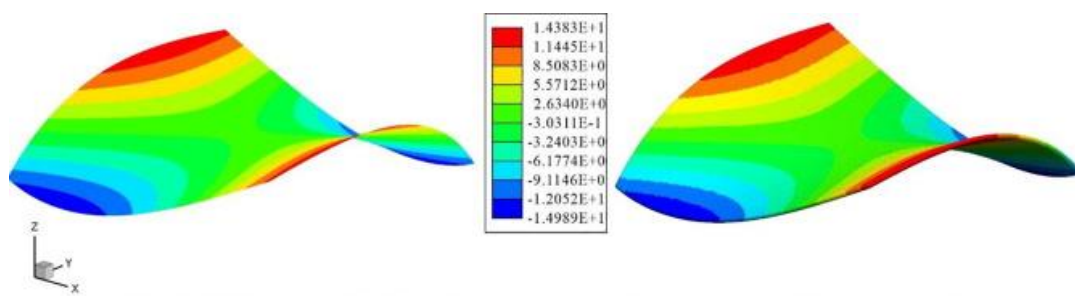
در ادامه به مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی واکنش تکیه گاهی ممان M_y برای صفحه کامپوزیتی موردنظر تحت خمش خالص با زاویه الیاف های متفاوت پرداخته شده است. نتایج حاصل از این قسمت در جدول (۴-۸) بیان شده است.

با توجه به نتایج حاصل در جدول‌های (۴-۷) و (۴-۸) می‌توان بیان کرد که نتایج حاصل از تئوری پری‌داینامیک در مقایسه با روش المان محدود توسعه‌یافته در تحلیل صفحه کامپوزیتی تحت خمش خالص از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده و مطابق با نتایج حاصل از روش تئوری می‌باشد. همچنین می‌توان بیان کرد که زاویه الیاف در تغییر شکل و همچنین جابه‌جایی و واکنش تکیه گاهی ممان M_y مؤثر خواهد بود.

جدول (۴-۸) : نتایج حاصل از پیش‌بینی واکنش تکیه گاهی ممان $M_y [N.m]$ برای صفحه کامپوزیتی موردنظر تحت خمش خالص

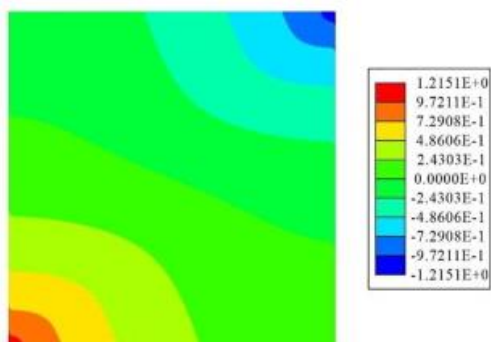
جهت الیاف (α)	حل تحلیلی	تئوری پری‌داینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه‌یافته	درصد خطا
0°	-1.369E + 04	-1.369E + 04	0%	-1.354E + 04	1.0957E + 00%
15°	-8.453E + 03	-8.453E + 03	0%	-8.377E + 03	8.9909E - 01%
30°	-2.627E + 03	-2.627E + 03	0%	-2.605E + 03	8.3746E - 01%
45°	1.189E + 03	1.189E + 03	0%	1.186E + 03	2.5231E - 01%
60°	-8.513E + 02	-8.513E + 02	0%	-8.512E + 02	1.1747E - 02%
75°	-7.637E + 02	-7.637E + 02	0%	-7.635E + 02	2.6188E - 02%
90°	-6.721E + 02	-6.721E + 02	0%	-6.719E + 02	2.9757E - 02%

در ادامه نحوه تغییر شکل صفحه کامپوزیتی با الیاف 15° تحت خمش خالص در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است. با مقایسه شکل (۴-۱۶) و شکل (۴-۱۵) برای تغییر شکل برای الیاف 0° می‌توان بیان کرد که زاویه الیاف بر تغییر شکل صفحه کامپوزیتی موردنظر مؤثر می‌باشد.



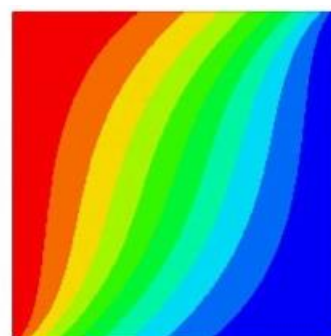
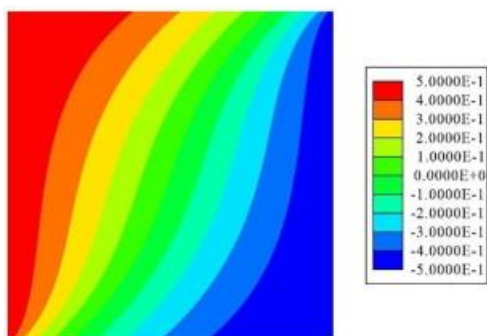
جابه‌جایی در راستای محور Z با استفاده از روش المان محدود توسعه‌یافته

جابه‌جایی در راستای محور Z با استفاده از روش تئوری پری‌داینامیک



چرخش در راستای محور X با استفاده از روش المان محدود توسعه‌یافته

چرخش در راستای محور X با استفاده از روش تئوری پری‌داینامیک



چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش المان محدود توسعه‌یافته

چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش تئوری پری‌داینامیک

شکل (۴-۱۶): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی با الیاف 15° در حالت $v_{12} = 0.5$ تحت خمش خالص

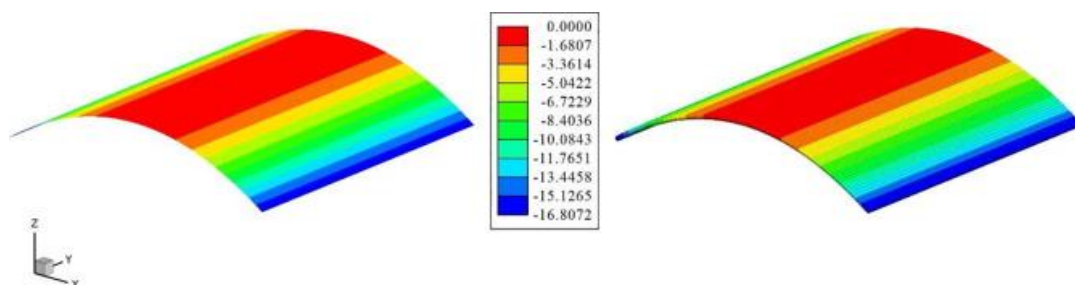
۴-۴ مقایسه روش المان محدود توسعه یافته و تئوری

پری داینامیک در تحلیل صفحه کامپوزیتی چندلایه

۴-۴-۱ صفحه کامپوزیتی چندلایه تحت کشش یکنواخت

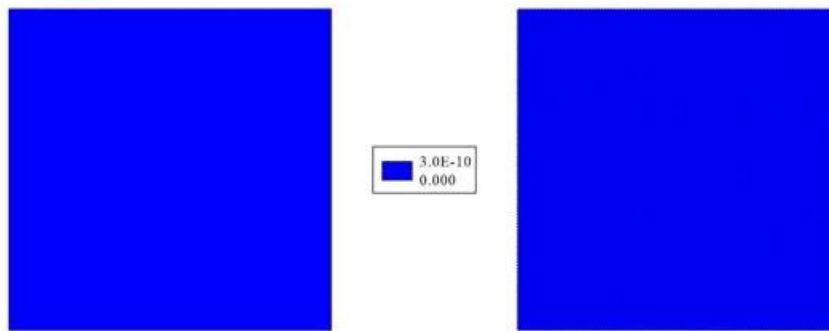
در ادامه در این قسمت به تحلیل دو صفحه کامپوزیتی چندلایه تحت کشش یکنواخت که چیدمان لایه های آن به صورت $[0/90]$ و $[45/-45]$ می باشد، پرداخته شده است. هندسه صفحه کامپوزیتی چندلایه موردنظر در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. ضخامت هر لایه نیز $h = 1\text{mm}$ است. نتایج حاصل از پیش بینی جابه جایی نقطه مادی x_A به مختصات $(L - 0.5 \cdot \Delta x$ و $w - 0.5 \Delta y)$ در جهت محور Z ها و واکنش تکیه گاهی F_x با استفاده از روش تئوری پری داینامیک و روش المان محدود توسعه یافته در جداول (۴-۹) و (۴-۱۰) بیان شده است.

همچنین در ادامه دیاگرام و کانتور حاصل از تغییر شکل صفحه کامپوزیتی چندلایه موردنظر با چیدمان لایه ها به صورت $[0/90]$ و $[45/-45]$ تحت کشش یکنواخت به ترتیب در شکل های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) نشان داده شده است.

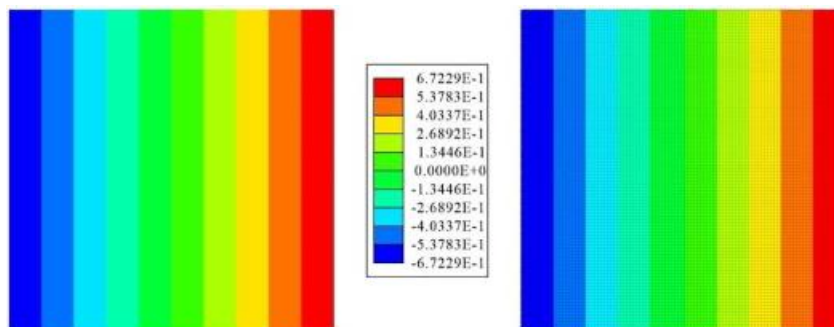


جابه جایی در راستای محور Z با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته

جابه جایی در راستای محور Z با استفاده از روش تئوری پری داینامیک



چرخش در راستای محور X با استفاده از روش تئوری پری دینامیک
چرخش در راستای محور X با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته



چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش تئوری پری دینامیک
چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته

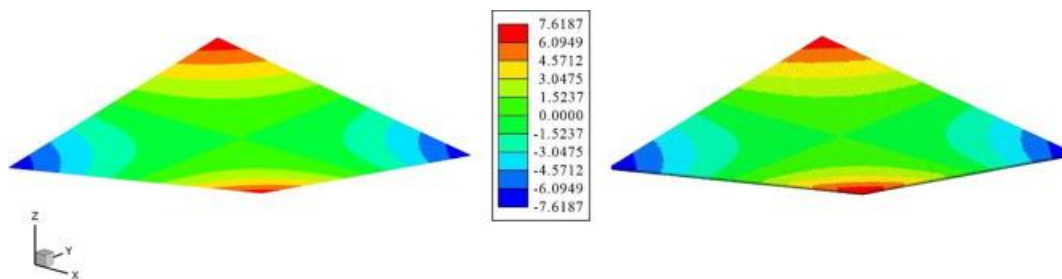
شکل (۱۷-۴): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی $[0/90]$ تحت کشش یکنواخت

جدول (۹-۴): نتایج حاصل از پیش‌بینی جابه‌جایی در جهت محور Z ها

چیدمان لایه ها	حل تحلیلی	تئوری پری دینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه یافته	درصد خطا
$[0/90]$	-16.4761	-16.4761	0%	-16.4583	$1.0804E - 01\%$
$[45/-45]$	-7.4686	-7.4686	0%	-7.4510	$2.3565E - 01\%$

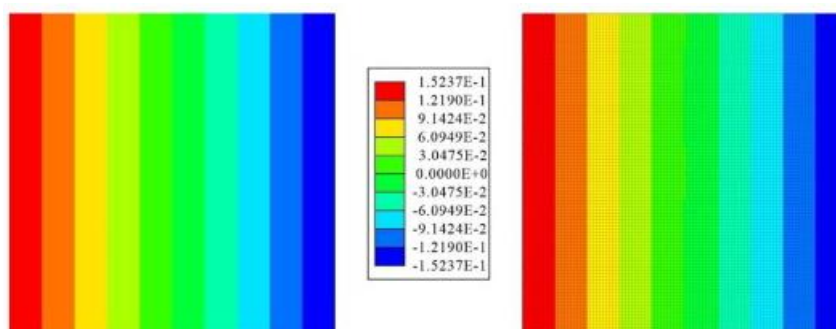
جدول (۱۰-۴): نتایج حاصل از پیش‌بینی واکنش تکیه گاهی $F_x [N]$

چیدمان لایه ها	حل تحلیلی	تئوری پری دینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه یافته	درصد خطا
$[0/90]$	$6.8931E + 04$	$6.8931E + 04$	0%	$6.8850E + 04$	$1.1751E - 01\%$
$[45/-45]$	$3.1246E + 04$	$3.1246E + 04$	0%	$3.0676E + 04$	$1.8242E + 00\%$



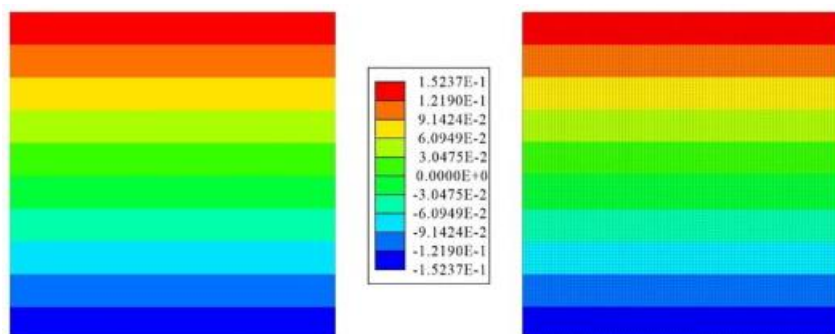
جابه جایی در راستای محور Z با استفاده از روش
المان محدود توسعه یافته

جابه جایی در راستای محور Z با استفاده از روش
تئوری پری داینامیک



چرخش در راستای محور X با استفاده از روش المان
محدود توسعه یافته

چرخش در راستای محور X با استفاده از روش تئوری
پری داینامیک



چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش المان
محدود توسعه یافته

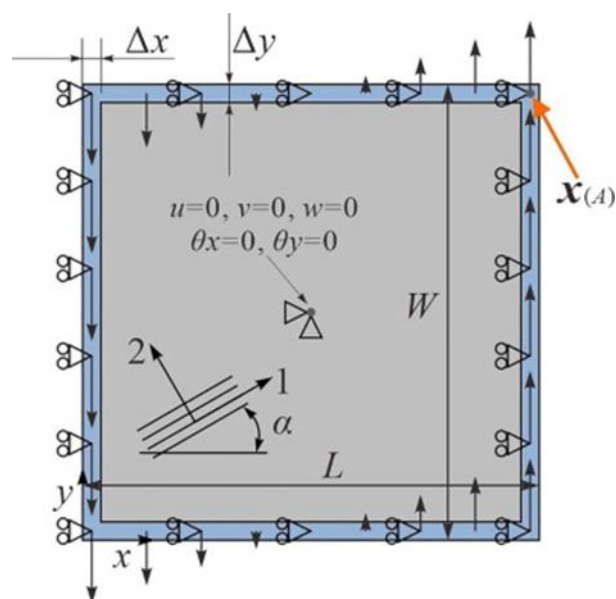
چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش تئوری
پری داینامیک

شکل (۴-۱۸): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی $[45/-45]$ تحت کشش یکنواخت

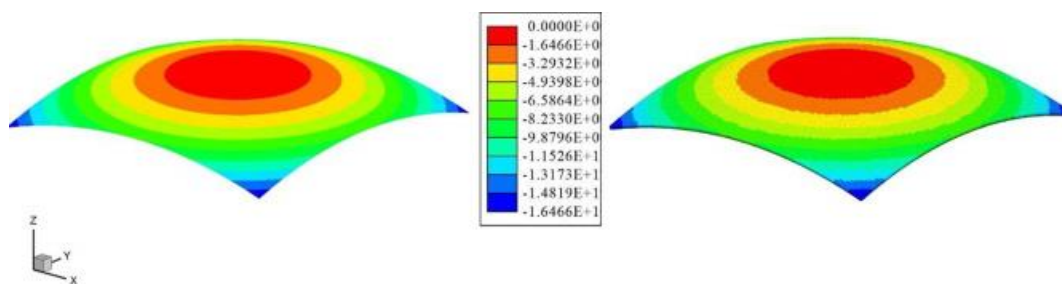
۴-۴-۲ صفحه کامپوزیتی چندلایه تحت بارگذاری ترکیبی

در ادامه در این قسمت به تحلیل دو صفحه کامپوزیتی چندلایه تحت بارگذاری ترکیبی که چیدمان لایه های آن به صورت $[45/-45]$ و $[45/-15]$ می باشد، پرداخته شده است. هندسه صفحه کامپوزیتی چندلایه موردنظر در شکل (۴-۱۹) نشان داده شده است. ضخامت هر لایه نیز

$h = 1\text{mm}$ است. نتایج حاصل از پیش‌بینی جابه‌جایی نقطه مادی x_A به مختصات $(w - 0.5\Delta x, L - 0.5\Delta y)$ در جهت محور Z ها و واکنش تکیه گاهی F_y با استفاده از روش تئوری پری‌داینامیک و روش المان محدود توسعه‌یافته در جدول (۴-۱۱) و (۴-۱۲) بیان شده است. همچنین در ادامه دیاگرام و کانتور حاصل از تغییر شکل صفحه کامپوزیتی چندلایه موردنظر با چیدمان لایه ها به صورت $[45/-45]$ و $[45/-15]$ تحت کشش یکنواخت به ترتیب در شکل (۴-۲۰) و (۴-۲۱) نشان داده شده است.

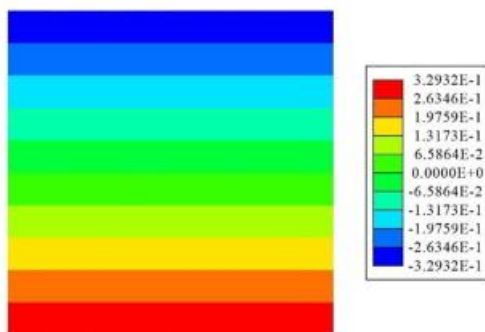


شکل (۴-۱۹): صفحه کامپوزیتی چندلایه تحت بارگذاری ترکیبی



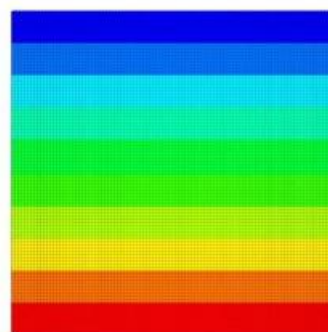
جابجایی در راستای محور Z با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته

جابجایی در راستای محور Z با استفاده از روش تئوری پری داینامیک



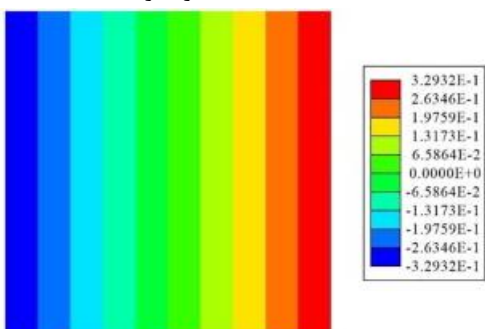
چرخش در راستای محور X با استفاده از روش المان

محدود توسعه یافته



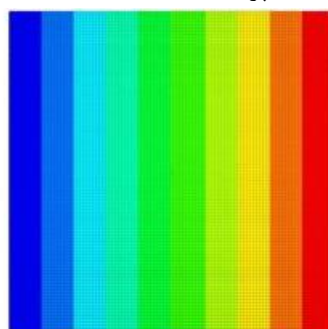
چرخش در راستای محور X با استفاده از روش تئوری

پری داینامیک



چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش المان

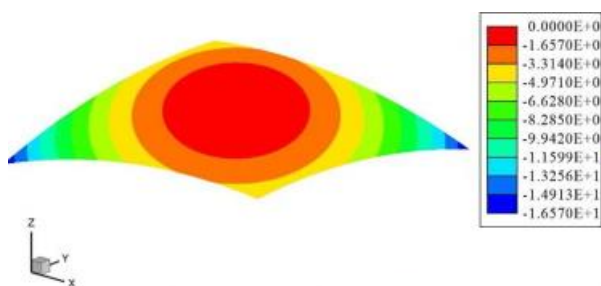
محدود توسعه یافته



چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش تئوری

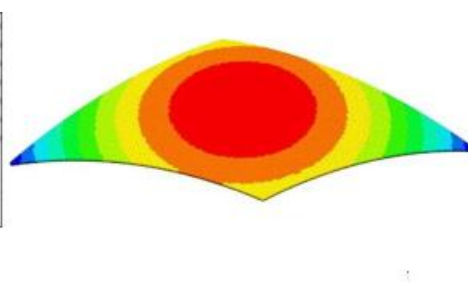
پری داینامیک

شکل (۴۰-۴): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی [45/-45] تحت بارگذاری ترکیبی



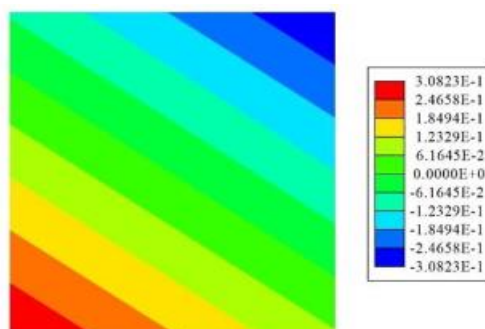
جابجایی در راستای محور Z با استفاده از روش المان

محدود توسعه یافته



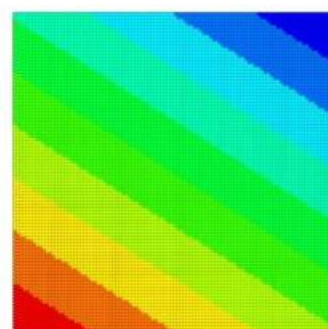
جابجایی در راستای محور Z با استفاده از روش تئوری

پری داینامیک



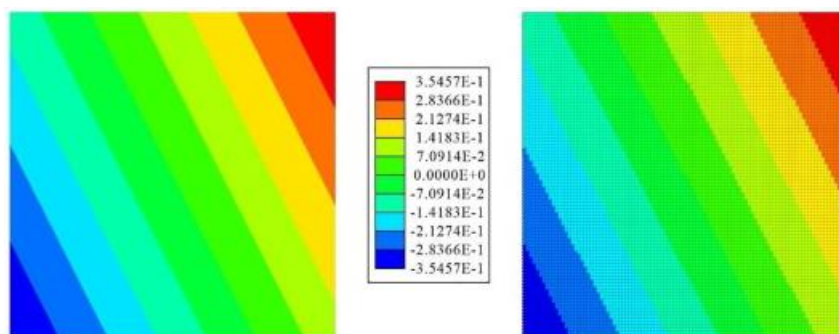
چرخش در راستای محور X با استفاده از روش المان

محدود توسعه یافته



چرخش در راستای محور X با استفاده از روش تئوری

پری داینامیک



چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش تئوری پری دینامیک
چرخش در راستای محور Y با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته

شکل (۴-۲۱): تغییر شکل در صفحه کامپوزیتی $[45/-15]$ تحت بارگذاری ترکیبی

با توجه به نتایج بدست آمده در این بخش و مقایسه آن با بخش قبلی می توان بیان کرد که علاوه بر تعداد لایه ها و نحوه چیدمان آن ها در صفحات کامپوزیتی نوع بارگذاری نیز در چگونگی رفتار و تغییر شکل آن ها بسیار مؤثر می باشد.

جدول (۴-۱۱): نتایج حاصل از پیش بینی جابه جایی در جهت محور z ها تحت بارگذاری ترکیبی

چیدمان لایه ها	حل تحلیلی	تئوری پری دینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه یافته	درصد خطا
$[45/-45]$	-16.1416	-16.1416	0%	-16.1335	$5.0181E - 02\%$
$[45/-15]$	-16.2435	-16.2435	0%	-16.2287	$9.1113E - 02\%$

جدول (۴-۱۲): نتایج حاصل از پیش بینی واکنش تکیه گاهی $F_y [N]$ تحت بارگذاری ترکیبی

چیدمان لایه ها	حل تحلیلی	تئوری پری دینامیک	درصد خطا	روش المان محدود توسعه یافته	درصد خطا
$[45/-45]$	$3.3766E + 04$	$3.3766E + 04$	0%	$3.3628E + 04$	$4.0870E - 01\%$
$[45/-15]$	$2.4693E + 04$	$2.4693E + 04$	0%	$2.4520E + 04$	$7.0060E - 01\%$

۴-۵ مدل سازی رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک لایه تک

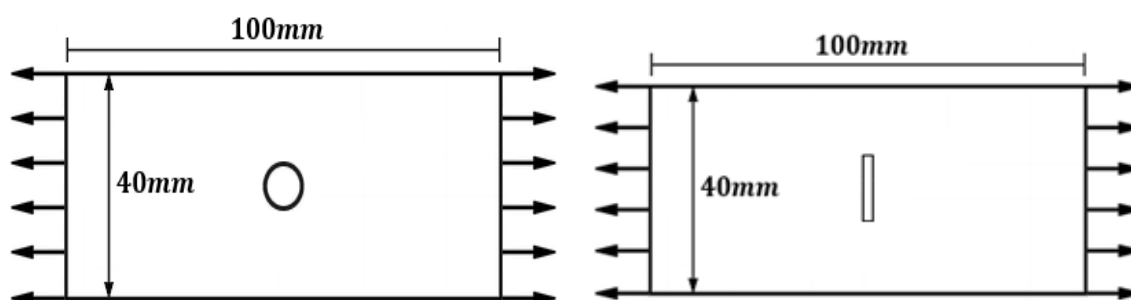
جهته

در این قسمت به مدل سازی رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته دارای سوراخ پرداخته خواهد شد و در نهایت نتایج حاصل از تئوری پری دینامیک با روش المان محدود توسعه یافته مورد

مقایسه قرار خواهد گرفت. همچنین در این قسمت تأثیر نوع ترک و سوراخ و زاویه الیاف بر چگونگی انتشار ترک در جسم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هندسه صفحه کامپوزیتی مورد نظر در شکل (۴-۲۲) نمایش داده شده است و خواص مکانیکی آن در جدول (۴-۱۳) بیان شده است. نتایج حاصل از این بخش در شکل‌های (۴-۲۳) و (۴-۲۴) نمایش داده شده است. طول پیش ترک و قطر سوراخ دایروی برابر با 10mm می‌باشد و تحت تنش 4MPa قرار دارد.

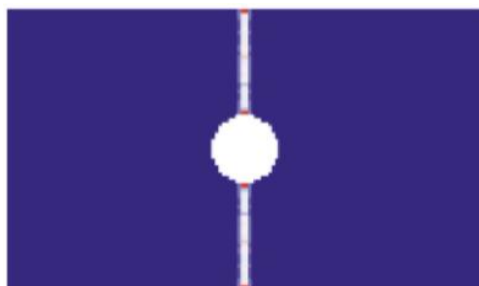
جدول (۴-۱۳): خواص مکانیکی صفحه کامپوزیتی تک‌لایه تک‌جهته [۳۵]

ρ	G_0^{22}	G_0^{11}	ν_{12}	E_{22}	E_{12}	E_{11}
1630kg/m^3	0.168kJ/m^2	15.49kJ/m^2	0.346	6GPa	4.4GPa	329GPa

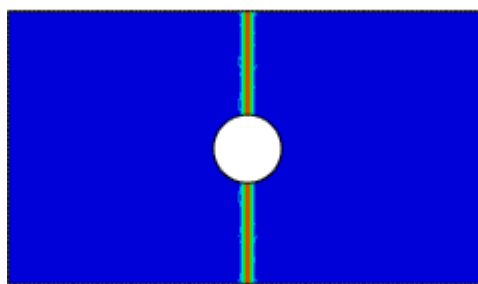


شکل (۴-۲۲): هندسه صفحه کامپوزیتی تک‌لایه تک‌جهته (الف): دارای سوراخ دایروی (ب): دارای پیش ترک عمودی

در شکل (۴-۲۳) و (۴-۲۴) نتایج حاصل از مدل‌سازی رشد ترک در صفحه کامپوزیتی به ترتیب در حالتی که دارای سوراخ دایروی و پیش ترک عمودی است برای زاویه الیاف 0° ، 90° و 45° با استفاده از روش المان محدود توسعه‌یافته با نتایج حاصل از روش تئوری پری‌داینامیک مورد مقایسه قرار گرفته شده است.



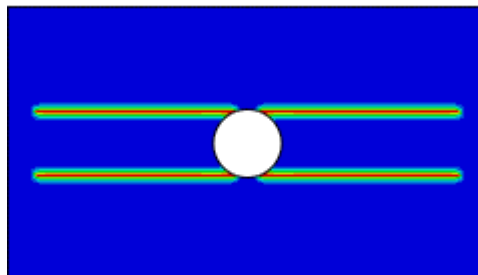
زاویه الیاف 0°



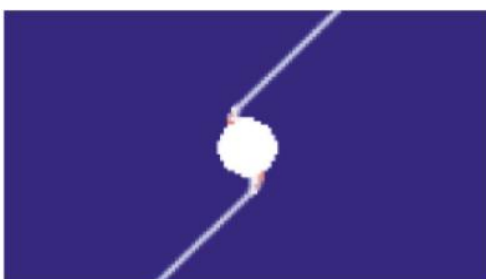
زاویه الیاف 0°



زاویه الیاف 90°

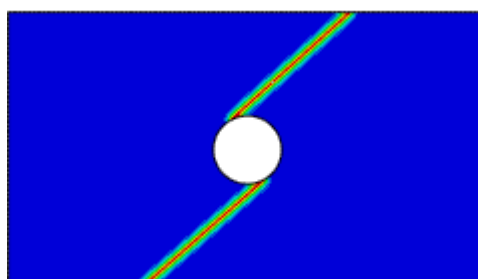


زاویه الیاف 90°



زاویه الیاف 45°

تئوری پری داینامیک

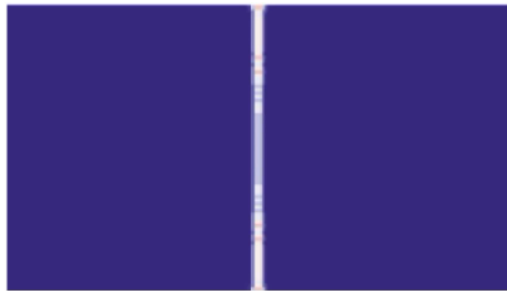


زاویه الیاف 45°

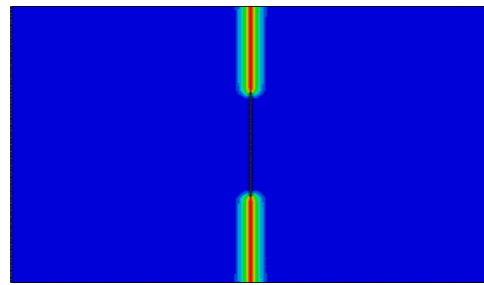
روش المان محدود توسعه یافته

شکل (۲۳-۴): نتایج حاصل از رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته دارای سوراخ دایروی برای زوایای الیاف مختلف

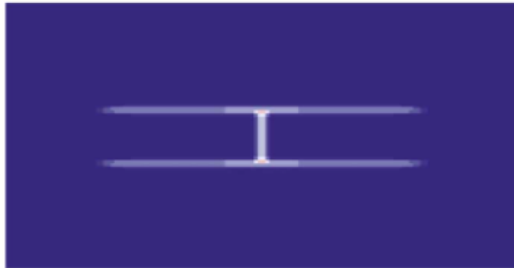
با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۲۳-۴) و (۲۴-۴) می‌توان بیان کرد که تئوری پری داینامیک بخوبی قادر به مدل‌سازی رشد ترک در اجسام می‌باشد و نتایج تئوری پری داینامیک و روش المان محدود توسعه یافته نزدیک به هم می‌باشند با این تفاوت که تئوری پری داینامیک بدون تغییر در معیار قادر به مدل‌سازی رشد ترک در اجسام می‌باشد و هزینه محاسباتی آن بسیار کمتر از روش المان محدود توسعه یافته می‌باشد.



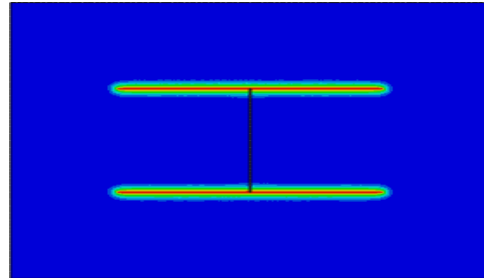
زاویه الیاف 0°



زاویه الیاف 0°



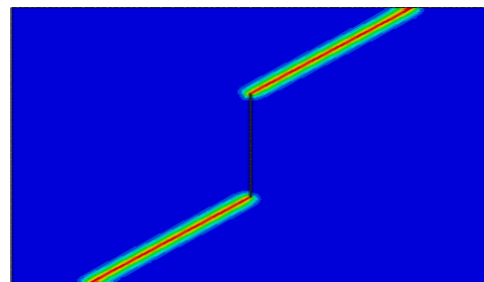
زاویه الیاف 90°



زاویه الیاف 90°



زاویه الیاف 45°



زاویه الیاف 45°

تئوری پری داینامیک

روش المان محدود توسعه یافته

شکل (۴-۲۴): نتایج حاصل از رشد ترک در صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته دارای پیش ترک افقی برای زوایای الیاف مختلف

۴-۶ اثر مدول یانگ صفحه کامپوزیتی تک لایه بر رشد ترک در

آن

در این قسمت به بررسی اثر مدول یانگ صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته بر چگونگی رشد ترک در آن پرداخته شده است سناریوها و حالت های مورد بررسی در جدول (۴-۱۴) نشان داده شده است و نتایج حاصل برای زوایای الیاف 0° و 45° و 90° به ترتیب در جدول های ۲ و ۳ و ۴ نشان داده شده است

جدول (۴-۱۴) : حالت های مورد بررسی اثر مدول یانگ بر صفحه کامپوزیتی تک لایه تک جهته

حالت مورد بررسی	E_{11}	E_{12}	E_{22}
(۱)	250GPa	3.6GPa	5GPa
(۲)	329GPa	4.4GPa	6GPa
(۳)	400GPa	5GPa	7.5GPa
(۴)	500GPa	7GPa	9GPa

جدول (۴-۱۵) : پارامترهای موثر بر رشد ترک در صفحه کاکپوزیتی تک لایه با الیاف 0° برای سوراخ

مستطیلی

حالت مورد بررسی	زمان شروع رشد ترک	زمان کل شبیه سازی	ماکزیمم سرعت رشد ترک	انشعاب ترک	
				زمان انشعاب	مکان انشعاب
(۱)	18 μ s	110 μ s	1800m/s	-	-
(۲)	22 μ s	120 μ s	1600m/s	-	-
(۳)	25 μ s	130 μ s	1400m/s	-	-
(۴)	28 μ s	135 μ s	1100m/s	-	-

جدول (۴-۱۶) : پارامترهای موثر بر رشد ترک در صفحه کاکپوزیتی تک لایه با الیاف 45° برای سوراخ

مستطیلی

حالت مورد بررسی	زمان شروع رشد ترک	زمان کل شبیه سازی	ماکزیمم سرعت رشد ترک	انشعاب ترک	
				زمان انشعاب	مکان انشعاب
(۱)	19 μ s	113 μ s	1750m/s	-	-
(۲)	23 μ s	124 μ s	1650m/s	-	-
(۳)	26 μ s	133 μ s	1400m/s	-	-
(۴)	30 μ s	137 μ s	1200m/s	-	-

جدول (۴-۱۷) : پارامترهای موثر بر رشد ترک در صفحه کاکپوزیتی تک لایه با الیاف 90° برای سوراخ

مستطیلی

حالت مورد بررسی	زمان شروع رشد ترک	زمان کل شبیه سازی	ماکزیمم سرعت رشد ترک	انشعاب ترک	
				زمان انشعاب	مکان انشعاب
(۱)	23 μ s	118 μ s	1650m/s	26 μ s	12mm
(۲)	25 μ s	128 μ s	1400m/s	29 μ s	14mm
(۳)	29 μ s	140 μ s	1200m/s	33 μ s	15mm
(۴)	31 μ s	155 μ s	1000m/s	35 μ s	17mm

با توجه به نتایج حاصل می توان بیان کرد که مسیر رشد ترک در حسم به زاویه الیاف در آن بستگی دارد و تغییرات خواص مکانیکی و مدول یانگ صفحه موردنظر بر پارامترهای موثر بر رشد ترک نظیر زمان آغاز و پایان رشد ترک زمان و مکان انشعاب رشد ترک و همچنین سرعت رشد ترک در حسم تاثیر دارد.

فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۵ نتیجه گیری

در این پژوهش به تحلیل و مدل سازی رشد ترک در اجسام با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته و روش تئوری پری داینامیک پرداخته شده است. که در ابتدا جهت اعتبارسنجی کد نوشته شده در نرم افزار لمپس جهت مدل سازی رشد ترک با استفاده از تئوری پری داینامیک و روش المان محدود توسعه یافته در نرم افزار آباکوس به مدل سازی رشد ترک در صفحه ایزوتروپیک مستطیلی دارای پیش ترک افقی پرداخته شده است و سپس به بررسی اثر شدت تنش و تعداد و مکان سوراخ ها در جسم بر چگونگی انتشار ترک در جسم پرداخته شده است که نتایج حاصل حاکی از آن است که مسیر رشد ترک در جسم وابستگی بسیار زیادی به شدت تنش اعمالی بر جسم و تعداد و مکان سوراخ ها در جسم دارد. در ادامه به تحلیل صفحه کامپوزیتی تک لایه و تک جهته و صفحه کامپوزیتی چندلایه با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته و همچنین تئوری پری داینامیک پرداخته شد که نتایج این قسمت نشان دهنده آن است که نتایج حاصل از تئوری پری داینامیک با روش تئوری کاملاً منطبق می باشد و بدون تغییر در معیار و با هزینه محاسباتی کم و بدون نیاز به روابط تکمیلی در مقایسه با روش المان محدود توسعه یافته که دارای خطای نسبتاً کم و هزینه محاسباتی بالا و نیاز به روابط تکمیلی جهت تحلیل و مدل سازی صفحه کامپوزیتی تک لایه و چندلایه می باشد، قادر به تحلیل صفحات کامپوزیتی تک لایه و چندلایه می باشد. علاوه بر این نتایج حاصل از این قسمت نشان دهنده آن است که نوع بارگذاری، جهت الیاف و تعداد لایه ها و نحوه چیدمان و آرایش لایه ها در رفتار صفحات کامپوزیتی بسیار مؤثر می باشد. در ادامه در بخش نهایی این پژوهش به مدل سازی رشد ترک در صفحه مستطیلی کامپوزیتی تک لایه تک جهته با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته و تئوری پری داینامیک پرداخته شده است. که نتایج حاصل از این بخش نشان دهنده آن است که نتایج حاصل از روش المان محدود توسعه یافته و تئوری پری داینامیک به هم نزدیک بوده اما هزینه محاسباتی روش المان محدود توسعه یافته بسیار بالاتر بوده و این روش برای مدل سازی رشد ترک و ناپیوستگی ها در جسم نیاز به

روابط تکمیلی و اضافی مکانیک شکست دارد در حالی که تئوری پری داینامیک بدون تغییر در معیار و با هزینه محاسباتی بسیار کم رشد ترک در صفحات کامپوزیتی موردنظر را مدل سازی می کند. علاوه بر این نتایج این بخش نشان داد که زاویه الیاف در صفحه کامپوزیتی تأثیر بسیار زیادی بر چگونگی انتشار ترک در جسم می گذارد.

۵-۲ پیشنهادات

- در این قسمت به ارائه پیشنهادات برای پژوهش های آتی پرداخته شده است که عبارتند از:
- مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی رشد ترک با استفاده از تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند و تئوری پری داینامیک مبتنی بر حالت نوع اول (معمولی) و تئوری پری داینامیک مبتنی بر حالت نوع دوم (مضاعف)
 - بهبود تئوری پری داینامیک مبتنی بر پیوند با استفاده از اصلاح روابط برای بالابردن دقت در مدل سازی رشد ترک و آسیب در اجسام و همچنین مشاهده ناحیه پلاستیک نوک ترک در هنگام رشد
 - ترکیب و کوپل تئوری پری داینامیک با روش المان محدود توسعه یافته یا دیگر تئوری ها برای بهبود نتایج جهت تحلیل و مدل سازی رشد ترک و آسیب در اجسام تحت شرایط ساختاری و بارگذاری مختلف و متفاوت
 - بررسی ترکیب بارگذاری مکانیکی و حرارتی به طور همزمان بر نحوه رشد ترک در اجسام و سازه ها
 - بررسی تأثیر ابعاد و تعداد و مکان سوراخ ها و نحوه چیدمان و ترکیب آن ها در جسم بر فاکتور شدت تنش با استفاده از تئوری پری داینامیک و مقایسه آن با دیگر تئوری ها و روش های موجود.
 - مدل سازی رشد ترک در صفحات کامپوزیتی تک لایه و چندلایه تحت بارگذاری ضربه ای

- مدل سازی رشد ترک در صفحات بی متریا ل با استفاده از تئوری پری داینامیک

مرجع

- [1] مکانیک شکست و خستگی، دکتر قاجار، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸
- [2] Gross, D. and Seelig, T., 2017. *Fracture mechanics: with an introduction to micromechanics*. Springer.
- [3] Guo, J., Gao, W., Liu, Z., Yang, X. and Li, F., 2019. Study of Dynamic Brittle Fracture of Composite Lamina Using a Bond-Based Peridynamic Lattice Model. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
- [4] Zhang, H. and Qiao, P., 2019. A state-based peridynamic model for quantitative elastic and fracture analysis of orthotropic materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 206, pp.147-171.
- [5] Abbasiniyan, L., Hoseini, S.H. and Faroughi, S., 2019. Fracture analysis of pre-cracked and notched thin plates using peridynamic theory. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*.
- [6] Akbari, M., Kazemi, S. (2018). 'The effect of horizon size and projectile shape on the crack growth in the cracked beam using peridynamic method', *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 8(4), pp. 39-51.
- [7] Shafiei, A., 2018. Dynamic crack propagation in plates weakened by inclined cracks: an investigation based on peridynamics. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(4), pp.527-535.
- [8] Kazemi S R, Shakouri M. Effects of the speed of applying loads on the growth of inclined crack in plates using Peridynamic theory. *Modares Mechanical Engineering*. 2017; 17 (1):403-412
- [9] Shakouri, M., Kazemi, S. (2019). 'A Peridynamic Study on Crack Growth in Plates with Two Anti-symmetric Cracks under Various Tensile Velocities', *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(1), pp. 43-52.
- [10] Zhou, W., Liu, D. and Liu, N., 2017. Analyzing dynamic fracture process in fiber-reinforced composite materials with a peridynamic model. *Engineering Fracture Mechanics*, 178, pp.60-76.
- [11] Ha, Y.D. and Bobaru, F., 2010. Studies of dynamic crack propagation and crack branching with peridynamics. *International Journal of Fracture*, 162(1-2), pp.229-244.
- [12] Ha, Y.D. and Bobaru, F., 2011. Characteristics of dynamic brittle fracture captured with peridynamics. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(6), pp.1156-1168.
- [13] Ren, B., Wu, C.T. and Askari, E., 2017. A 3D discontinuous Galerkin finite element method with the bond-based peridynamics model for dynamic brittle failure analysis. *International Journal of Impact Engineering*, 99, pp.14-25.
- [14] Taştan, A., Yolum, U., Güler, M.A., Zaccariotto, M. and Galvanetto, U., 2016. A 2D peridynamic model for failure analysis of orthotropic thin plates due to bending. *Procedia Structural Integrity*, 2, pp.261-268.
- [15] Hu, W., Ha, Y.D. and Bobaru, F., 2012. Peridynamic model for dynamic fracture in unidirectional fiber-reinforced composites. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 217, pp.247-261.
- [16] Hu, W., 2012. *Peridynamic models for dynamic brittle fracture*. The University of Nebraska-Lincoln.
- [17] Shlyannikov, V.N. and Tumanov, A.V., 2011. An inclined surface crack subject to biaxial loading. *International journal of solids and structures*, 48(11-12), pp.1778-1790.
- [18] Alali, B. and Lipton, R., 2012. Multiscale dynamics of heterogeneous media in the peridynamic formulation. *Journal of Elasticity*, 106(1), pp.71-103.
- [19] Du, Q. and Zhou, K., 2011. Mathematical analysis for the peridynamic nonlocal continuum theory. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 45(2), pp.217-234.

- [20] Zhou, K. and Du, Q., 2010. Mathematical and numerical analysis of linear peridynamic models with nonlocal boundary conditions. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 48(5), pp.1759-1780.
- [21] Emmrich, E. and Weckner, O., 2007. On the well-posedness of the linear peridynamic model and its convergence towards the Navier equation of linear elasticity. *Communications in Mathematical Sciences*, 5(4), pp.851-864.
- [22] Silling, S.A., Epton, M., Weckner, O., Xu, J. and Askari, E., 2007. Peridynamic states and constitutive modeling. *Journal of Elasticity*, 88(2), pp.151-184.
- [23] Foster, J.T., Silling, S.A. and Chen, W.W., 2009, June. State based peridynamic modeling of dynamic fracture. In *SEM Annual Conf and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Albuquerque, USA (pp. 2312-2317).
- [24] Lehoucq, R.B. and Sears, M.P., 2011. Statistical mechanical foundation of the peridynamic nonlocal continuum theory: Energy and momentum conservation laws. *Physical Review E*, 84(3), p.031112.
- [25] S. Silling, Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48, No. 1, pp. 175-209, 2000.
- [26] Anderson, T.L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, Fourth Edition (4th ed.)
- [27] Madenci, E. and Oterkus, E., 2014. Peridynamic theory. In *Peridynamic Theory and Its Applications* (pp. 19-43). Springer, New York, NY.
- [28] M. S. Breitenfeld, P. H. Geubelle, O. Weckner, S. A. Silling, Nonordinary state-based peridynamic analysis of stationary crack problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 272, pp. 233-250, 2014.
- [29] Warren, T.L., Silling, S.A., Askari, A., Weckner, O., Epton, M.A. and Xu, J., 2009. A non-ordinary state-based peridynamic method to model solid material deformation and fracture. *International Journal of Solids and Structures*, 46(5), pp.1186-1195.
- [30] Madenci, E. and Oterkus, S., 2016. Ordinary state-based peridynamics for plastic deformation according to von Mises yield criteria with isotropic hardening. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 86, pp.192-219.
- [31] Silling, S.A. and Askari, E., 2005. A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics. *Computers & structures*, 83(17-18), pp.1526-1535.
- [32] Liu, W. and Hong, J.W., 2012. Discretized peridynamics for linear elastic solids. *Computational mechanics*, 50(5), pp.579-590.
- [33] Bobaru, F., Foster, J.T., Geubelle, P.H., & Silling, S.A. (Eds.). (2016). *Handbook of Peridynamic Modeling* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC.
- [34] Madenci, E. and Oterkus, E., 2014. Peridynamic theory. In *Peridynamic Theory and Its Applications* (pp. 19-43). Springer, New York, NY.
- [35] Hu, W., Ha, Y. D., & Bobaru, F. (2011). Modeling dynamic fracture and damage in a fiber-reinforced composite lamina with peridynamics. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 9(6).

Abstract

In the present study, crack growth is modeled and the factors affecting it in the composite plate are investigated using perodynamic theory based on bonding. In order to collect information and analyze and model crack growth in the composite plate, the monolith, the monolith, the monolith, the monolith, the monoplay theory of bond-based establishment in LAMMPS software was used. Also in this study, the results of periodynamic theory were compared with the results of finite element method developed in ABAQUS software. It should be noted that in this study, the factors affecting the growth of cracks in the composite plate such as the effect of stress intensity on the body and how to load it and the angle of the fibers in the body in four different positions 0, 30, 45, and 90 degrees Also, the type of pre-crack and the hole in the body and its position (composite plate) on how to propagate the crack in it will be examined. The results show that the type of loading, the direction of the fibers and the number of layers and the arrangement and arrangement of the layers are very strong in the behavior of composite sheets.

Keywords : crack growth, composite plate, perodynamic theory, bond-based, crack



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Applied Mechanics Engineering

***Modeling crack growth and
investigation of effective parameters in
composite plate using bound-based
peridynamic theory***

By: Fatemeh Farhadi

Supervisor:
Dr. Mohammad Jafari

October, 2021