

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



## **رشد ترک خستگی در قطعات ترکدار تقویت شده با وصله کامپوزیتی- فلزی به روش اجزا محدود توسعه یافته**

**نگارش**

**امیرحسین روزبهانی**

**استاد راهنما: دکتر علی پورکمالی انارکی**  
**استاد راهنما: دکتر فرامرز آشنای قاسمی**  
**استاد مشاور: مهندس حامد معیری کاشانی**

**پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد**  
**در رشته مکانیک- طراحی کاربردی**

**مرداد ماه ۱۳۹۱**

باسمه تعالی



### تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب امیرحسین روزبهانی متعهد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه/رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن ها استفاده شده است، مطابق مقررات، ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه/رساله قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی است.

نام و نام خانوادگی دانشجو

امضاء

شماره: ۱۱۷۸/۹۲۹۲  
تاریخ: ۱۳۹۴/۰۷/۱۵  
پوست:



بشماره

دانشگاه تربیت مدرس شیرازی

### صور تجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تاییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد جناب آقای امیرحسین روزبهانی رشته مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی تحت عنوان رشد ترک خستگی در قطعات ترک دار تقویت شده با وصله کامپوزیتی- فازی به روش اجزاء محدود توسعه یافته، که در تاریخ ۹۱/۴/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی برگزار گردید و نتیجه به شرح زیر اعلام گردید.

قبول (بدرجه ..... امتیاز: ۲۰، ۱۷، ..... )  دفاع مجدد  مردود.

۱- عالی (۲۰-۱۹)

۲- بسیار خوب (۹۹/۱۸-۱۸)

۳- خوب (۹۹/۱۷-۱۶)

۴- قابل قبول (۹۹/۱۵-۱۴)

۵- غیر قابل قبول (کمتر از ۱۴)

اعضاء	نام و نام خانوادگی	مرتبیه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر علی پورکمالی انارکی	استادیار	
استاد راهنما	دکتر فرامرز آشنای قاسمی	استادیار	
استاد مشاور	مهندس حامد معیری کاشانی	مدرس	
استاد داور داخلی	دکتر جواد کدخدای پور	استادیار	
استاد داور خارجی	دکتر علی مهدی پور	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر میراعلم مهدی	استادیار	

دکتر غلامن پاجان

رئیس دانشکده مهندسی مکانیک

تهران، لویزان، کد پستی: ۱۶۷۸۸-۱۵۸۱۱  
صندوق پستی: ۱۶۷۸۵-۱۶۲  
تلفن: ۰۶-۰۹-۲۲۹۷۰۰۰۰ فکس: ۲۲۹۷۰۰۰۲۲  
Email: sru@sru.ac.ir  
www.srttu.edu

## چکیده

در این پژوهش برای اولین بار به بررسی عددی رشد ترک خستگی در قطعات ترکدار آلومینیومی که با وصله ی کامپوزیتی FML<sup>1</sup> ترمیم شده اند، به روش اجزا محدود توسعه یافته (XFEM) پرداخته شده است. قطعات با نرم افزار ABAQUS 6.11 شبیه سازی شده و نتایج بدست آمده از این تحلیل با داده های عددی که از روش اجزا محدود (FEM) و با نرم افزار ABAQUS 6.10 و همچنین با داده های تجربی بدست آمده از تست های تجربی و آزمایشگاهی انجام شده روی قطعات، مقایسه شده است. در این پژوهش برای آنکه بتوان هم از مزایای روش اجزاء محدود و هم از روش بدون مش بهره جست از روش اجزاء محدود توسعه یافته استفاده شده است. در این روش بدون آنکه ناپیوستگی به طور آشکار مدلسازی گردد، در مش بندی اجزاء محدود مدلسازی می گردد. با این کار می توان به قابلیت هایی نظیر افزایش سرعت همگرایی، ردیابی انتشار ترک، پرهیز از بازیابی مش بندی، ساده سازی مشکلات موجود در مدلسازی هندسه ترک اعم از نوک ترک و سطوح ترک و کاهش درجات آزادی اضافی در اثر افزایش تعداد المان ها دست یافت. تمام این مزیت ها سبب می شود که این روش بعنوان یک روش توانمند مدلسازی برای مسائل شامل ناپیوستگی مطرح گردد که می تواند مشکلات در سایر روش ها را برطرف سازد.

همچنین در این پژوهش به بررسی پارامترهای موثر در رشد ترک خستگی از قبیل: زاویه ترک اولیه، عرض وصله و چیدمان لایه ها در وصله پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان دهنده افزایش چشمگیر عمر قطعات تعمیر شده با این وصله در مقایسه با قطعات بدون وصله است.

## کلمات کلیدی

روش اجزا محدود توسعه یافته، تعمیر، وصله کامپوزیتی، FML، رشد ترک خستگی.

---

<sup>1</sup> - Fiber reinforced and Metal Laminates

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول: مقدمه و پیشینه تحقیق</b>
۲	۱-۱- مقدمه ای درباره مکانیک شکست.....
۲	۲-۱- تاریخچه مکانیک شکست.....
۴	۳-۱- انواع ناپیوستگی.....
۵	۴-۱- مکانیک شکست.....
۶	۱-۴-۱- شکل موده‌های بارگذاری.....
۶	۱-۱-۴-۱- مود اول.....
۷	۲-۱-۴-۱- مود دوم.....
۷	۳-۱-۴-۱- مود سوم.....
۸	۲-۴-۱- مکانیک شکست ماده الاستیک خطی.....
۸	۱-۲-۴-۱- فاکتور شدت تنش.....
۸	۲-۲-۴-۱- آنالیز وسترگارد برای یک ترک نوک تیز.....
۹	۳-۲-۴-۱- تئوری گریفیث برای انرژی آزاد شده.....
۱۰	۳-۴-۱- مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک.....
۱۱	۴-۴-۱- رشد ترک تحت خستگی.....
۱۱	۱-۴-۴-۱- رشد ترک و ضریب شدت تنش.....
۱۲	۲-۴-۴-۱- رشد ترک در یک سازه تحت بارهای با دامنه ثابت.....
۱۲	۵-۴-۱- شکست دینامیکی و ابسته به زمان.....
۱۳	۵-۱- مکانیک شکست محاسباتی.....
۱۳	۱-۵-۱- روش اجزاء محدود.....
۱۳	۱-۱-۵-۱- روش ریلی ریتز.....
۱۵	۲-۱-۵-۱- روش گلرکین.....
۱۶	۲-۵-۱- روش بدون مش.....
۱۶	۳-۵-۱- روش المان های مرزی.....
۱۷	۴-۵-۱- روش اجزاء محدود در مکانیک شکست.....
۱۷	۱-۴-۵-۱- شبیه سازی ترک بوسیله جداسازی بین المانی.....
۱۸	۲-۴-۵-۱- مدل سازی ترک بوسیله المان گسسته شده.....
۱۹	۳-۴-۵-۱- مدل ترک آغشته.....
۱۹	۴-۴-۵-۱- مدل چسبناک.....
۲۰	۵-۴-۵-۱- روش بدون مش بندی.....

- ۲۰ ..... ۵-۴-۶-المان های غنی شده.....
- ۲۱ ..... ۱-۶-۶-مقدمه ای درباره ترمیم قطعات و سازه های ترکدار.....
- ۲۱ ..... ۱-۶-۱-ترمیم قطعات و سازه های ترکدار.....
- ۲۷ ..... ۱-۶-۲-ترمیم با مواد کامپوزیت در مقایسه با تعمیرات مکانیکی.....
- ۳۰ ..... ۱-۶-۳-مقایسه ترمیم یک طرفه و دو طرفه.....
- ۳۳ ..... ۱-۷-پیشینه تحقیق در مورد اجزا محدود توسعه یافته.....
- ۳۶ ..... ۱-۸-پیش زمینه ای از تعمیرات وصله ای.....

### فصل دوم: روش المان محدود توسعه یافته

- ۴۵ ..... ۲-۱-روش پیکربندی واحد.....
- ۴۵ ..... ۲-۲-روش غنی سازی.....
- ۴۶ ..... ۲-۲-۱-غنی سازی درونی.....
- ۴۷ ..... ۲-۲-۲-غنی سازی خارجی.....
- ۴۸ ..... ۲-۲-۳-سازی به روش پیکربندی واحد.....
- ۴۹ ..... ۲-۲-۴-غنی سازی به روش اجزاء محدود تعمیر یافته.....
- ۴۹ ..... ۲-۲-۵-غنی سازی به روش اجزاء محدود توسعه یافته.....
- ۴۹ ..... ۲-۲-۶-غنی سازی Hp-clouds.....
- ۵۰ ..... ۲-۲-۷-غنی سازی به روش پیکربندی واحد تعمیر یافته.....
- ۵۰ ..... ۲-۲-۸-انتقال و ارتباط تقریب استاندارد به تقریب غنی سازی.....
- ۵۲ ..... ۲-۳-اجزاء محدود توسعه یافته.....
- ۵۲ ..... ۲-۳-۱-اصول اجزاء محدود توسعه یافته.....
- ۵۳ ..... ۲-۳-۲-تابع فاصله علامت.....
- ۵۴ ..... ۲-۳-۳-مدلسازی میدان های شامل ناپیوستگی قوی.....
- ۵۵ ..... ۲-۳-۳-۱-بررسی یک مدل ساده.....
- ۵۶ ..... ۲-۳-۳-۲-تابع هویساید.....
- ۵۹ ..... ۲-۳-۳-۳-تابع علامت.....
- ۶۰ ..... ۲-۳-۴-غنی سازی ناحیه پلاستیک.....
- ۶۱ ..... ۲-۳-۵-نحوه ی انتخاب گره ها جهت غنی سازی ناپیوستگی.....
- ۶۳ ..... ۲-۳-۶-مدل کردن ترک.....
- ۶۴ ..... ۲-۴-نحوه ی گسسته سازی و انتگرالگیری.....
- ۶۴ ..... ۲-۴-۱-معادلات حاکم.....
- ۶۴ ..... ۲-۴-۲-نحوه گسسته سازی در روش اجزاء محدود توسعه یافته.....
- ۶۷ ..... ۲-۴-۳-نحوه ی پیکربندی المان و محاسبه انتگرال عددی.....
- ۶۹ ..... ۲-۴-۴-ترک متقاطع.....

- ۶۹ ..... ۵-۲- مقایسه روش اجزاء محدود و اجزاء محدود توسعه یافته در مدلسازی ترک
- ۷۱ ..... ۶-۲- مدلسازی رشد ترک
- ۷۱ ..... ۷-۲- روش تابع تراز
- ۷۲ ..... ۱-۷-۲- تابع تراز
- ۷۴ ..... ۲-۷-۲- استفاده از تابع تراز برای مدلسازی ترک
- ۷۷ ..... ۸-۲- بررسی نحوه اعمال تابع تراز در انتشار ترک سه بعدی

### فصل سوم: بررسی تجربی و عددی

- ۸۱ ..... ۱-۳- مقدمه
- ۸۱ ..... ۲-۳- انتخاب مواد بکار رفته برای ساخت نمونه های مورد آزمایش
- ۸۱ ..... ۱-۲-۳- ورق آلومینیوم پایه
- ۸۲ ..... ۲-۲-۳- الیاف و رزین ولایه فلز به کار رفته در ساخت FML
- ۸۳ ..... ۳-۲-۳- چسب
- ۸۳ ..... ۳-۳- مقدمه
- ۸۴ ..... ۴-۳- مدلسازی قطعه
- ۸۵ ..... ۱-۴-۳- روشهای مدل سازی ترک به روش FEM
- ۸۷ ..... ۲-۴-۳- روشهای مدل سازی ترک به روش XFEM
- ۸۸ ..... ۵-۳- مدلسازی وصله کامپوزیت
- ۸۸ ..... ۱-۵-۳- استفاده از ابزار composite lay up در ماژول property
- ۸۹ ..... ۲-۵-۳- تقسیم بندی (Partition) وصله
- ۸۹ ..... ۶-۳- اتصال وصله با نمونه
- ۹۱ ..... ۷-۳- بارگذاری و شرایط مرزی
- ۹۲ ..... ۸-۳- تحلیل مدل سازی توسط نرم افزار ABAQUS
- ۹۲ ..... ۹-۳- خروجیهای عمومی نرم افزار
- ۹۲ ..... ۱-۹-۳- تاثیر لایه چینی وصله بر جابجایی نقاط دهانه ترک
- ۹۵ ..... ۲-۹-۳- اثر عرض وصله بر روی جابجایی دهانه ترک
- ۹۶ ..... ۳-۹-۳- بررسی تقارن در اثر ترمیم یک طرفه
- ۹۸ ..... ۱۰-۳- خروجی های مکانیک شکست نرم افزار
- ۹۸ ..... ۱-۱۰-۳- جهت رشد ترک CPD
- ۹۹ ..... ۲-۱۰-۳- ضریب شدت تنش (SIF)
- ۱۰۰ ..... ۳-۱۰-۳- تاثیر زاویه بر ضریب شدت تنش
- ۱۰۶ ..... ۴-۱۰-۳- تاثیر وصله کامپوزیتی FML و لایه چینی آن بر ضریب شدت تنش
- ۱۰۸ ..... ۵-۱۰-۳- تاثیر عرض وصله کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش
- ۱۰۹ ..... ۶-۱۰-۳- مدلسازی مسیر رشد ترک تا شکست ماده



## فصل چهارم: جمع بندی و نتیجه گیری

۱۱۴	..... ۱-۴- مقدمه
۱۱۴	..... ۲-۴- مزایای روش های عددی
۱۱۴	..... ۱-۲-۴- روش اجزاء محدود
۱۱۴	..... ۲-۲-۴- روش بدون مش
۱۱۵	..... ۳-۲-۴- روش المان مرزی
۱۱۵	..... ۳-۴- معایب روش های عددی در مدلسازی ناپیوستگی
۱۱۵	..... ۱-۳-۴- روش اجزاء محدود
۱۱۵	..... ۲-۳-۴- روش بدون مش
۱۱۶	..... ۳-۳-۴- روش المان مرزی
۱۱۶	..... ۴-۴- ویژگی روش اجزاء محدود توسعه یافته در مکانیک شکست
۱۱۶	..... ۵-۴- معرفی موضوعات تحقیقاتی پیشنهاد شده
۱۱۷	..... منابع و مآخذ

## فهرست جداول

صفحه	عنوان جدول
۲۲	جدول ۱-۱: عمر متوسط برخی از هواپیماها
۲۳	جدول ۲-۱: قیمت تقریبی برخی از هواپیماها
۲۴	جدول ۳-۱: هواپیماهای ترمیم شده توسط ARL
۲۵	جدول ۴-۱: برخی از هواپیماهای ترمیم شده و نوع کامپوزیت استفاده شده در ترمیم
۲۵	جدول ۵-۱: مقایسه مزایا و معایب اتصالات چسبی و پیچ شده
	جدول ۱-۳: جدول کوانتو متری و تعیین درصد عناصر و آلیاژ آلومینیوم ورق پایه
۸۱	ASTM E1251-07
	جدول ۲-۳: خواص مکانیکی بدست آمده ورق آلومینیوم پایه بر اساس آزمون کشش طبق
۸۲	استاندارد ASTM E8M-09

## فهرست شکل ها

صفحه	شکل	عنوان شکل
۴	شکل ۱-۱	طبقه بندی یوستگی.....
۵	شکل ۱-۲	سوراخ بیضی شکل در یک صفحه الاستیک خطی با ابعاد بینهایت.....
۷	شکل ۱-۳	مود اول جابه جایی.....
۷	شکل ۱-۴	مود دوم جابه جایی.....
۷	شکل ۱-۵	مود سوم جابه جایی.....
۸	شکل ۱-۶	صفحه بی نهایت که با تنش های یکنواخت عمودی و برشی بار گذاری شده است.
۱۰	شکل ۱-۷	ناحیه غیر الاستیک و میدان $k$ در اطراف نوک ترک.....
۱۱	شکل ۱-۸	منحنی شدن و تیز شدن مجدد نوک ترک در بارگذاری نوسانی.....
۱۳	شکل ۱-۹	فرایند بدست آوردن میدان تنش در روش اجزاء محدود.....
۱۷	شکل ۱-۱۰	المان های تکین.....
۱۸	شکل ۱-۱۱	جداسازی بین المانی برای مدلسازی ترک.....
۱۸	شکل ۱-۱۲	نحوه ی گسسته سازی المان، جهت مدلسازی ترک.....
۱۹	شکل ۱-۱۳	نمایش مدل ترک آغشته.....
۲۰	شکل ۱-۱۴	مدل داگدل برای ترکی به طول $2a$ و در حالت مد $I$ بارگذاری.....
۲۱	شکل ۱-۱۵	المان های غنی شده.....
۲۱	شکل ۱-۱۶	انجام تعمیرات روی ناوگان هوایی کشور به منظور تمدید عمر.....
۲۶	شکل ۱-۱۷	طبقه بندی و کاربرد اتصالات چسبی.....
۲۷	شکل ۱-۱۸	انتقال تنش از طرق کل سطح وصله کامپوزیتی.....
۲۸	شکل ۱-۱۹	کاهش ضریب شدت تنش با انجام ترمیم.....
۲۸	شکل ۱-۲۰	تاثیر وصله بر عمر سازه های ترکدار.....
۳۰	شکل ۱-۲۱	نمایش تعدادی از اتصالات چسبی.....
۳۰	شکل ۱-۲۲	خمش ایجاد شده در ترمیم نامتقارن بدلیل جابجایی تار خنثی.....
۳۱	شکل ۱-۲۳	بارهای وارده به وصله.....
۳۲	شکل ۱-۲۴	ظرفیت اتصال در اتصالات چسبی.....
۴۲	شکل ۱-۲۵	فیکسچر و نمونه تست خستگی آقای چانگ.....
۴۷	شکل ۱-۲	مختصات قطبی در نزدیکی نوک ترک.....
۴۸	شکل ۲-۲	غنی سازی در میدان پیکر بندی واحد.....
۵۰	شکل ۲-۳	نمایش سطح انتقال بین دامنه تقریب و غنی شده.....
۵۱	شکل ۲-۴	نمایش المان های استاندارد، غنی شده و مختلط.....
۵۳	شکل ۲-۵	تاثیر دامنه گره لبه ای $J$ و گره داخلی $J'$ در یک مش بندی دلخواه اجزاء محدود.....
۵۴	شکل ۲-۶	نمایش تابع علامت بر دامنه.....

۵۴	شکل ۲-۷: شبیه سازی ترک در یک مسئله یک بعدی با استفاده از توابع شکل اجزاء محدود
۵۴	استاندارد.....
۵۵	شکل ۲-۸: نمایش یک المان که بوسیله ترک گسسته شده است.....
۵۵	شکل ۲-۹: توصیف یک ناپیوستگی با استفاده از تابع تراز.....
۵۶	شکل ۲-۱۰: تغییر فرم یک المان چهار ضلعی با استفاده از تابع جهش نوع اول.....
۵۶	شکل ۲-۱۱: شکل های متفاوت تابع هویساید.....
۵۶	شکل ۲-۱۲: تاثیر تابع پله بر روی توابع فرمی.....
۵۷	شکل ۲-۱۳: تاثیر تغییر مکان بر روی توابع فرمی.....
۵۸	شکل ۲-۱۴: تغییر فرم المان چهارضلعی با استفاده از تابع جهشی.....
۵۹	شکل ۲-۱۵: تاثیر تابع پله بر روی توابع فرمی.....
۵۹	شکل ۲-۱۶: تاثیر انتقال بر روی توابع فرمی.....
۶۱	شکل ۲-۱۷: غنی سازی گره ها در مراحل مختلف انتشار ترک.....
۶۲	شکل ۲-۱۸: غنی سازی گره ها در مراحل مختلف انتشار ترک.....
۶۲	شکل ۲-۱۹: انتخاب گره، برای غنی سازی در مراحل مختلف انتشار ترک.....
۶۳	شکل ۲-۲۰: نمایش مختصات محلی در نوک ترک.....
۶۴	شکل ۲-۲۱: یک جسم در وضعیت تعادل.....
۶۸	شکل ۲-۲۲: نمایش روش های پیکربندی المان.....
۶۸	شکل ۲-۲۳: معیار غنی سازی گره.....
۶۹	شکل ۲-۲۴: ترک متقاطع در یک المان.....
۷۰	شکل ۲-۲۵: مقایسه FEM و X-FEM.....
۷۱	شکل ۲-۲۶: ردیابی نقاط نشانه گذاری شده بر روی مرز های متحرک.....
۷۲	شکل ۲-۲۷: نمایش LSM و FMM.....
۷۲	شکل ۲-۲۸: توصیف هندسی تابع تراز.....
۷۴	شکل ۲-۲۹: نمایش هندسه ی ترک مدل شده.....
۷۴	شکل ۲-۳۰: توصیف تابع فاصله $f$ و تابع هویساید.....
۷۵	شکل ۲-۳۱: نمایش نحوه ی برون یابی بردار تابع تراز.....
۷۷	شکل ۲-۳۲: نحوه ی توزیع تابع تراز.....
۷۸	شکل ۲-۳۳: همگرایی خطای مد یک بار گذاری.....
۷۸	شکل ۲-۳۴: نمایش موقعیت ترک و نحوه بار گذاری.....
۷۸	شکل ۲-۳۵: گسسته سازی سطح.....
۷۹	شکل ۲-۳۶: مقایسه نتایج به وسیله حل صورت گرفته توسط راجو و نیومن.....
۸۱	شکل ۳-۱: نمونه استاندارد آزمون کشش بر طبق استاندارد ASTM E8M-09.....
۸۲	شکل ۳-۳: شکل تنش کرنش ورق آلومینیوم پایه.....

۸۵	.....	شکل ۳-۴: اجزاء مختلف در مدل سازی عددی به روش اجزاء محدود
۸۵	.....	شکل ۳-۵: روش ایجاد ترک در مازول INTERACTION در نرم افزار ABAQUS
۸۶	.....	شکل ۳-۶: ناکرانداری در راس ترک توسط المانهای Singular
۸۷	.....	شکل ۳-۷: المان های منفرد در حالت LEFM و تیز بودن نوک ترک در این حالت
۸۷	.....	شکل ۳-۸: المان های منفرد در حالت EPFM و تیز بودن نوک ترک در این حالت
۸۸	.....	شکل ۳-۹: نمایش هندسه یک ترک لبه ای در حالت سه بعدی
۸۸	.....	شکل ۳-۱۰: لایه چینی کامپوزیت در مازول property
۸۹	.....	شکل ۳-۱۱: مدل سازی وصله به روش تقسیم بندی مقطع وصله
۹۰	.....	شکل ۳-۱۲: پیوند وصله و قطعه به کمک تکنیک Tie
۹۱	.....	شکل ۳-۱۳: اعمال قید coupling
۹۲	.....	شکل ۳-۱۴: شرائط مرزی و بارگذاری در مدل سازی
۹۴	.....	شکل ۳-۱۵: تاثیر لایه چینی وصله بر جابجایی نقاط دهانه ترک به روش XFEM
۹۴	.....	شکل ۳-۱۶: تاثیر لایه چینی وصله بر جابجایی نقاط دهانه ترک به روش FEM
۹۵	.....	شکل ۳-۱۷: اثر عرض وصله مختلف بر روی جابجایی دهانه ترک به روش XFEM
۹۵	.....	شکل ۳-۱۸: اثر عرض وصله مختلف بر روی جابجایی دهانه ترک به روش FEM
۹۶	.....	شکل ۳-۱۹: اعمال نیرو به نمونه بی وصله و وصله دار و ایجاد خمیدگی در نمونه وصله شده
۹۷	.....	شکل ۳-۲۰: جابجایی های U1 و U2 و U3 و U magnitude در دو نمونه وصله دار و بدون وصله
۹۷	.....	شکل ۳-۲۱: جابجایی های U1 و U2 و U3 و U magnitude در دو نمونه وصله دار و بدون وصله
۹۸	.....	شکل ۳-۲۱: جابجایی های U1 و U2 و U3 و U magnitude در دو نمونه وصله دار و بدون وصله
۹۸	.....	شکل ۳-۲۲: نقاط روی جبهه ترک در نمونه های وصله شده و وصله نشده
۹۹	.....	شکل ۳-۲۳: جهت رشد ترک
۹۹	.....	شکل ۳-۲۴: جهت رشد ترک (CPD) نمونه های ترکدار بدون وصله به روش XFEM
۱۰۱	.....	شکل ۳-۲۵: جهت رشد ترک (CPD) نمونه های ترکدار بدون وصله به روش FEM
۱۰۱	.....	شکل ۳-۲۶: ضرایب شدت تنش K1 و K2 و K3 نمونه ترکدار بی وصله 0 درجه به روش XFEM
۱۰۱	.....	شکل ۳-۲۷: ضرایب شدت تنش K1 و K2 و K3 نمونه ترکدار بی وصله ۳۰ درجه به روش XFEM
۱۰۲	.....	شکل ۳-۲۸: ضرایب شدت تنش K1 و K2 و K3 نمونه ترکدار بی وصله ۴۵ درجه به روش XFEM
۱۰۲	.....	شکل ۳-۲۹: ضرایب شدت تنش K1 و K2 و K3 نمونه ترکدار بی وصله 0 درجه به روش XFEM

۱۰۳	..... FEM
	شکل ۳-۳۰: ضرایب شدت تنش $K_1$ و $K_2$ و $K_3$ نمونه ترکدار بی وصله 30 درجه به روش
۱۰۴	..... FEM
	شکل ۳-۳۱: ضرایب شدت تنش $K_1$ و $K_2$ و $K_3$ نمونه ترکدار بی وصله 45 درجه به روش
۱۰۴	..... FEM
	شکل ۳-۳۲: ضریب شدت تنش $K_1$ نمونه های بی وصله با زاویه ترک 0 و 30 و 45 درجه به روش
۱۰۵	..... XFEM
	شکل ۳-۳۳: ضریب شدت تنش $K_1$ نمونه های بی وصله با زاویه ترک 0 و 30 و 45 درجه به روش
۱۰۵	..... FEM
	شکل ۳-۳۴: ضریب شدت تنش $K_2$ نمونه های بی وصله با زاویه ترک 0 و 30 و 45 درجه به روش
۱۰۶	..... XFEM
	شکل ۳-۳۵: ضریب شدت تنش $K_2$ نمونه های بی وصله با زاویه ترک 0 و 30 و 45 درجه به روش
۱۰۶	..... FEM
	شکل ۳-۳۶: ضریب شدت تنش $K_3$ نمونه های بی وصله با زاویه ترک 0 و 30 و 45 درجه به روش
۱۰۷	..... XFEM
	شکل ۳-۳۷: ضریب شدت تنش $K_3$ نمونه های بی وصله با زاویه ترک 0 و 30 و 45 درجه به روش
۱۰۷	..... FEM
	شکل ۳-۳۸: اثر وصله کامپوزیتی FML و لایه چینی آن بر ضریب شدت تنش $K_1$ نمونه های
۱۰۸	..... XFEM
	ترکدار با زاویه 0 درجه به روش
	شکل ۳-۳۹: اثر وصله کامپوزیتی FML و لایه چینی آن بر ضریب شدت تنش $K_1$ نمونه های
۱۰۹	..... FEM
	ترکدار با زاویه 0 درجه به روش
	شکل ۳-۴۰: اثر وصله کامپوزیتی FML و لایه چینی آن بر ضریب شدت تنش $K_2$ نمونه های
۱۰۹	..... XFEM
	ترکدار با زاویه 0 درجه به روش
	شکل ۳-۴۱: تاثیر عرض وصله با لایه چینی paff بر میزان ضریب شدت تنش $K_1$ به روش
۱۱۰	..... XFEM
	شکل ۳-۴۲: تاثیر عرض وصله با لایه چینی paff بر میزان ضریب شدت تنش $K_1$ به روش
۱۱۱	..... FEM
	شکل ۳-۴۳: مدلسازی مسیر رشد ترک تا شکست ماده
۱۱۱	..... XFEM
	شکل ۳-۴۴: تاثیر جنس وصله با لایه چینی pfaf بر میزان ضریب شدت تنش $K_I$ به روش
۱۱۲	..... XFEM
	شکل ۳-۴۵: تاثیر جنس وصله با لایه چینی pfaf بر میزان ضریب شدت تنش $K_I$ به روش
۱۱۲	..... XFEM
	شکل ۳-۴۶: تاثیر جنس وصله با لایه چینی pfaf بر میزان ضریب شدت تنش $K_I$ به روش

۱۱۲ ..... XFEM  
شکل ۳-۴۷: تاثیر حذف لایه آلومنیوم در وصله کامپوزیتی بر میزان ضریب شدت تنش  $K_I$  به  
روش XFEM .....  
.....

## فصل اول

مقدمه و پیشینه تحقیق



## ۱-۱- مقدمه ای درباره مکانیک شکست

محققان معمولاً مسائل و پدیده های فیزیکی در طبیعت را ابتدا در محیط آزمایشگاهی مدلسازی می نمایند و سپس جهت توجیه مسائل به مدلسازی ریاضی پدیده های فیزیکی روی می آورند تا با شناخت دقیق تر پدیده های فیزیکی و ایجاد فرمولبندی برای رفتار آنها بتوانند شرایط و اثرات سایر رخدادهای فیزیکی را پیش بینی نمایند. با توجه به اینکه مدلسازی شرایط مرزی و هندسه های پیچیده به وسیله مدلسازی ریاضی روش های تحلیلی، موضوعی دشوار و در بعضی از مواقع غیر ممکن می باشد، به مدلسازی عددی پدیده ها همراه با ظهور وسایل محاسباتی نظیر رایانه روی آورده شده و در پی آن، روش های تحلیل مسائل به صورت عددی به وجود آمده است. هر کدام از روش های موجود آمده بخشی از نیاز محققین و مهندسین را در تحلیل ها برطرف می کند. این روش ها به مرور زمان در حال تکامل می باشند. به این نکته باید توجه نمود که روش های عددی نیز پیچیدگی های خاص خود را دارا می باشند که باید با بینشی صحیح نسبت به رفتار فیزیکی و انتخاب روش درست تحلیل، مسئله را مورد بررسی قرار داد.

ترک<sup>۱</sup> در یک قطعه می تواند باعث کاهش باربری و استحکام شود. برای مطالعه این موضوع باید عوامل ایجاد ترک و چگونگی تاثیر آن در استحکام مواد به خوبی شناخته شود تا بتوان با بینشی صحیح و دقیق وضعیت قطعه یا سازه ترک دار را تحت بارگذاری های مختلف مورد ارزیابی قرار داد و با شناخت کامل این رفتار، کنترل این پدیده در اختیار آورده شود. موضوع پروژه در نظر گرفته شده به دنبال معرفی یک روش توانمند برای مدلسازی ناپیوستگی ها، مزایای آن و نحوه مدلسازی مسائل شکست می باشد. در این فصل ابتدا به تاریخچه پیدایش علم مکانیک شکست، معرفی مکانیک شکست<sup>۲</sup> و پارامترهای شکست پرداخته می گردد و در ادامه مشکلاتی که در حل مسائل مکانیک شکست به صورت تحلیلی و عددی وجود دارد و راهکارهای رفع این مشکلات و همچنین نقاط ضعف و قوت راهکارهای ارائه شده مورد نقد و بررسی قرار گرفته خواهند شد. در انتهای فصل جهت رفع کاستی های موجود در روش های عددی مرسوم در مکانیک شکست، روش دیگری مطرح خواهد شد.

---

Crack-<sup>۱</sup>

Fracture mechanic-<sup>۲</sup>

## ۱-۲- تاریخچه مکانیک شکست [۲]

قدم اساسی در ایجاد رابطه بین تنش شکست و ابعاد ترک در سال ۱۹۲۰ توسط شخصی به نام گریفیث<sup>۱</sup> برداشته شد [۱]. او روش تحلیل تنش در اطراف یک سوراخ بیضی شکل را (که در سال ۱۹۱۳ توسط اینگلیس<sup>۲</sup> انجام شده بود) برای حل انتشار یک ترک ناپایدار به کار گرفت. گریفیث توانست تئوری شکست را بر اساس یک تعادل ساده انرژی پایه گذاری نماید. او در این تئوری بیان نمود که شرط ناپایداری در رشد ترک و شکست در یک جسم آن است که تغییر در انرژی کرنشی حاصل از رشد ترک برای غلبه بر انرژی سطحی ماده کافی باشد. تجربه کشتی های آزادی در جنگ جهانی دوم که باعث ایجاد خسارات شدیدی گردید سبب شد که گروهی از محققان در آزمایشگاه تحقیقاتی دریایی واشنگتن دی-سی آمریکا، مطالعات جدی را برای بهبود دانش مکانیک شکست در اجسام، سازماندهی نمایند. ایروین تئوری گریفیث را برای فلزات تعمیم داد همچنین وی خاطر نشان ساخت که برای رشد ترک، علاوه بر انرژی سطحی، می بایست انرژی لازم برای غلبه بر جریان پلاستیک اطراف ترک را نیز فراهم ساخت. در سال ۱۹۵۶ ایروین<sup>۳</sup> مفهوم نرخ رهایی انرژی را مطرح نمود که تعمیم تئوری گریفیث بود ولی فرم ارائه شده به صورت کاربردی تری برای حل مسائل مهندسی استفاده می شد. در این میان نظر ایروین و همکارانش متوجه مقاله ای گردید که توسط وسترگارد<sup>۴</sup> در سال ۱۹۳۹ منتشر شده بود که در آن روشی برای تحلیل تنش و تغییر مکان در نوک ترک ارائه گردیده بود. ایروین با استفاده از این روش نشان داد که تنش و تغییر شکل را می توان با عامل ثابتی ارتباط داد که رابطه مستقیم با نرخ رهایی انرژی دارد. این عامل بعداً به فاکتور شدت تنش<sup>۵</sup> شناخته شد. در همین سالها ویلیامز روش دیگری را برای تحلیل تنش و تغییر مکان در نوک ترک ارائه نمود که اساساً با روش ایروین یکسان بود.

حدوداً در سالهای ۱۹۶۰ بنیاد های مکانیک شکست خطی کاملاً شناخته شد. پس از آن غالب تحقیقات معطوف به بررسی پلاستیسیته ی نوک ترک بود. در سالهای ۱۹۶۱-۱۹۶۰ ایروین با استفاده از مکانیک شکست الاستیسیته خطی<sup>۶</sup> (LEFM) مدل تصحیح منطقه پلاستیک را ارائه نمود و داگدال<sup>۷</sup> و بارنبلات<sup>۸</sup> هر یک مبادرت به توسعه ی مدل های واقعی تری بر اساس نوار باریکی از ماده ماده تسلیم شده در نوک ترک نمودند. ولز<sup>۹</sup> معیار شکست دیگری بر مبنای تغییر مکان در نوک ترک<sup>۱۰</sup> (CTOD) در ماده ای با تغییر شکل پلاستیک زیاد در هنگام شکست را پیشنهاد داد. در سال ۱۹۶۸ رایس<sup>۱۱</sup> با فرض رفتار الاستیک غیرخطی برای ماده ای با تغییر شکل پلاستیک موفق شد مفهوم نرخ رهایی انرژی را برای مواد با رفتار غیر خطی تعمیم دهد. او نشان داد که نرخ رهایی انرژی

---

Griffith-<sup>۱</sup>  
C. E. Inglis-<sup>۲</sup>  
G.R.Irwin-<sup>۳</sup>  
Westergaard-<sup>۴</sup>  
-Stress intensity factor<sup>۵</sup>  
Linear Elastic Fracture Mechanics-<sup>۶</sup>  
Dugdal-<sup>۷</sup>  
Barenblat-<sup>۸</sup>  
Wells-<sup>۹</sup>  
Crack Tip opening Displacement<sup>۱۰</sup>-  
Rice-<sup>۱۱</sup>

غیر خطی را می توان بر مبنای انتگرال خطی  $J$  در یک مسیر اختیاری در اطراف ترک محاسبه نمود. در همان سال ها هاتچینسن<sup>۱</sup>، رایس و رزنگرن<sup>۲</sup> موفق شدند انتگرال  $J$  را برای یک ماده با رفتار غیر خطی ارتباط دهند. تحلیل های فوق خاطر نشان ساخت که  $J$  می تواند بعنوان یک عامل شدت تنش غیر خطی و همچنین بعنوان نرخ رهایی انرژی در نظر گرفته شود. در سال ۱۹۷۶ شیه<sup>۳</sup> و هاتچینسن موفق به ارائه چهار چوب تئوریک برای کاربرد مکانیک شکست در طراحی شدند که بر مبنای آن رابطه ی ریاضی بین چقرمگی<sup>۴</sup>، تنش و ابعاد ترک بر مبنای  $J$  مشخص می شد. شیه همچنین با برقراری رابطه بین  $J$  و جابه جایی نوک ترک (CTOD) نشان داد که هر یک از دو مشخصه فوق می تواند بعنوان معیاری برای شکست اجسام در نظر گرفته شود.

توسعه مکانیک شکست اجسام از سالهای ۱۹۸۰ به بعد بیشتر متوجه رفتار شکست مواد غیر خطی و وابسته به زمان نظیر ویسکوالستیسیته و ویسکوپلاستیسیته گردید. [۱]

### ۱-۳- انواع ناپیوستگی<sup>۵</sup>

در تحلیل یک مسئله شامل ناپیوستگی، دانستن نوع و درجه ناپیوستگی، در نحوه تحلیل از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. علت اهمیت این موضوع آن است که نوع و درجه ناپیوستگی اساس روش های به کار گرفته برای تحلیل واماندگی و تخریب قطعات و سازه های شامل ناپیوستگی است، به عنوان مثال در مسائل مربوط به پلاستیسیته اساساً میدان جابه جایی و در اغلب موارد میدان کرنش پیوسته باقی می ماند. مکانیک شکست که از نوع ناپیوستگی قوی می باشد، میدان جابه جایی و میدان کرنش در طول سطح ترک ناپیوسته می باشد. همانطور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است منظور از پیوستگی، پیوسته بودن میدان جابه جایی و کرنش می باشد. در ناپیوستگی ضعیف<sup>۶</sup> میدان کرنش دچار ناپیوستگی خواهد شد و در ناپیوستگی قوی<sup>۷</sup>، ناپیوستگی میدان کرنش و جابه جایی مشاهده می گردد [۲].

<sup>۱</sup> Hutchinson

<sup>۲</sup> Rosengren

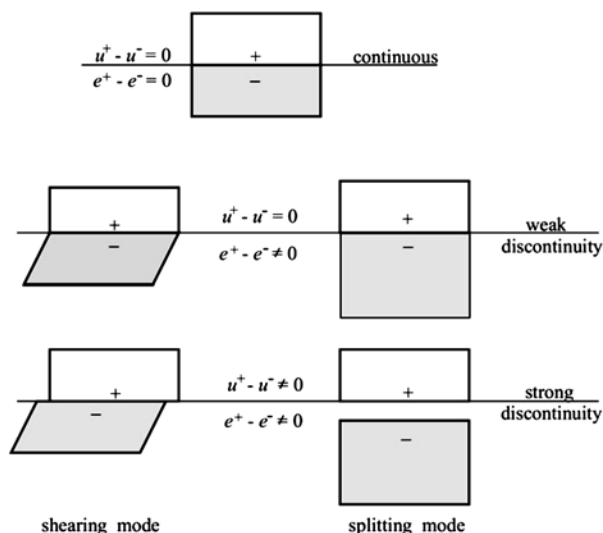
<sup>۳</sup> Shih

<sup>۴</sup> Toughness

<sup>۵</sup> -Analysis of discontinuity

<sup>۶</sup> Weak discontinuity

<sup>۷</sup> Strong discontinuity



شکل ۱-۱ طبقه بندی پیوستگی [۲]

#### ۱-۴- مکانیک شکست

مکانیک شکست علمی است که به بررسی رفتار مکانیکی اجسام ترک دار (دو سطحی از یک جسم که روی هم قرار دارند ولی به یکدیگر متصل نیستند و شرایط بار گذاری می تواند باعث حرکت نسبی این دو سطح نسبت به یکدیگر شود) می پردازد. وجود ترک در قطعه می تواند سبب می شود که یک قطعه تحت بارگذاری هایی که تنشی، کمتر از تنش تسلیم را ایجاد می کنند دچار تخریب شود. معمولاً در شرایط طراحی اولیه وجود ترک احتمالی در نظر گرفته نمی شود و بعد از کاربرد قطعه و اعمال شرایط بارگذاری زمانی که ترک مشاهده شد، این موضوع باید بررسی شود که این قطعه چه مقدار از کاربری خود را از دست داده است و شرایط امن بارگذاری در شرایط جدید ترک چگونه می باشد و قطعه ترک دار مورد نظر تحت چه شرایط بارگذاری می تواند مورد استفاده قرار گیرد. علت اهمیت بررسی ترک ها این مطلب می باشد که ترک باعث ایجاد میدان تکین تنش در اطراف نوک ترک، باعث افزایش قابل ملاحظه ی مقدار تنش در اطراف خود می گردد. مکانیک شکست در بسیاری از زمینه های مهندسی کاربرد دارد که از جمله این کاربردها عبارت است از: هوافضا، سازه های کشتی، استخراج نفت، مخازن تحت فشار، صنایع خودرو سازی، سازه های عمرانی، صنایع نظامی و راکتورهای هسته ای. [۳]

تاریخچه اولین کار محاسباتی که در این زمینه انجام گرفته است، به سال ۱۹۱۳ برمی گردد که شخصی به نام اینگلیس تحلیل تنش یک سوراخ بیضی شکل در یک صفحه بی نهایت الاستیک خطی و تحت بار یکنواخت خارجی در مرزها قرار گرفته بود را انجام داد. شرایط بارگذاری و موقعیت ترک در شکل (۱-۲) مشاهده می گردد. اینگلیس برای این کار یک تابع تنش مختلط پتانسیل را به صورت رابطه (۱-۱) در نظر گرفت. در رابطه (۱-۱)،  $\psi(z)$  و  $\chi(z)$  دو تابع هارمونیک تحلیلی می باشند که