بسم الله الرحمن الرحیم

**دانشکده مکانیک**

**پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد**

**عنوان:**

# *مدلسازی رشد ترک در مواد نرم به روش المان محدود*

**تهیه کننده :**

**رضا صفائی پیروز**

**طراحی کاربردی (جامدات)**

**۸۳۷٤۱۱۸۷**

**استاد راهنما : آقای دکتر آیت الهی**

**دی ماه ۱۳۸۵**

# چکیده:

با توجه به اهمیت آگاهی داشتن از رفتار قطعات ساخته شده از مواد نرم (مواد دارای رفتار الاستیک–پلاستیک فلزی و نه مواد پلیمری) در شرایط بروز ترک، در این پایان نامه سعی می شود تا با بهره گیری از تئوری های معتبر در زمینه مکانیک شکست، رفتار گروهی از این مواد در مقابل افزایش یکنواخت بار مورد بررسی قرار گیرد.

در این پایان نامه با استفاده از روش چگالی انرژی کرنشی در رشد ترک به عنوان روشی مبتنی بر انرژی و روش زاویه بازشدگی ترک به عنوان روشی مبتنی بر جابجائی، رشد ترک تحت بارگذاری یک جهته و افزاینده در نمونه هائی از مواد فولادی و آلومینیومی مورد بررسی قرار میگیرد. جهت انجام این مهم یک برنامه نرم افزاری با ماهیت پیش رونده نگاشته شده و تحلیلهای مورد نظر در نرم افزار المان محدود ABAQUS انجام می شوند.

در خاتمه این پژوهش نشان داده خواهد شد که هرچه شدت پلاستیک شدگی ناحیه در ماده بیشتر باشد (خواص هندسی) و هرچه ماده رفتار پلاستیک شدید تری از خود نشان دهد (خواص مادی)، میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک کاهش یافته و بروز ناپایداری سریع و شدید تر رخ خواهد داد. از سوی دیگر بر این نکته تاکید خواهد شد که روشهای جابجائی به سبب وابستگی به شرایط هندسی از محبوبیت و دامنه کاربرد کمتری نسبت به روشهای انرژی برخوردارند.

**در اینجا لازم است تا کمال سپاسگذاری و امتنان خود را از زحمات جناب آقای دکتر آیت اللهی که در طول دوره تحقیق و نگارش این پایان نامه مشفقانه اینجانب را راهنمائی و جهت دهی فرمودند، بعمل بیاورم.**

**همچنین از کمک و راهنمائی های آقای مهندس مصطفوی نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم.**

# فهرست مطالب


**چکیده:** ..... **ت**

**فهرست مطالب** ..... **ج**

**فهرست شکلها** ..... **د**

**فهرست جداول** ..... **ز**

**لیست علائم و اختصارات** ..... **س**

**فصل اول : مقدمه** ..... **۱**

**۱-۱) اهمیت و ضرورت پرداختن به موضوع رشد ترک درمواد نرم** ..... **۲**

**۱-۲) خلاصه ای از فعالیتهای صورت گرفته در مورد روش SED** ..... **۳**

**۱-۳) بررسی فعالیت های صورت گرفته در زمینه رشد ترک به روش CTOA** ..... **۷**

**۱-٤) ساختار پایان نامه و ترتیب فصول** ..... **۹**

**فصل دوم : مبانی تئوری** ..... **۱۳**

**۲-۱) مقدمه:** ..... **۱٤**

**۲-۲) ترمیم منطقه پلاستیک بروش ایروین** ..... **۱٤**

**۲-۳) ترمیم منطقه پلاستیک به روش داگدیل** ..... **۱۷**

**۲-٤) کرنش صفحه ای در مقابل تنش صفحه ای** ..... **۲۰**

**۲-٥) مکانیک شکست در حالت الاستیک – پلاستیک** ..... **۲۲**

۲-٥-۱) انتگرال مداری J ..... ۲۳

۲-٥-۲) J بعنوان یک انتگرال مستقل از مسیر ..... ۲۴

۲-٥-۳) J بعنوان یک ضریب شدت تنش ..... ۲٥

۲-٥-۴) منطقه کرنش بزرگ ..... ۲۸

**۲-٦) تئوری تغییر مکان نوک ترک CTOD/CTOA** ..... **۳۰**

۲-۶-۱) آشنایی با مبانی روش CTOA در شکست نرم ..... ۳۷

۲-۶-۱-۱) اصول تحلیل المان محدود در تحلیل به روش CTOA ..... ۴۰

**۲-۷) روش چگالی انرژی کرنشی (SED)** ..... **٤۲**

۲-۷-۱) تئوری چگالی انرژی کرنشی در مسائل ترک (معیار چگالی انرژی کرنشی ) ..... ۴۳

۲-۷-۱-۱) بررسی مسائل ترک دوبعدی – حالت الاستیک ..... ۴٥

۲-۷-۱-۲) معیار چگالی انرژی کرنشی در مواد الاستیک – پلاستیک ..... ۴۶

۲-۷-۱-۳) نحوه تأثیر دادن تغییر خواص ماده در تحلیل رشد ترک ..... ٥۰

۴-۱-۷-۲) نحوه انجام آنالیز بر اساس روش SED در نرم افزار المان محدود ..... ۵۲

**۲-۸) جمع بندی ..... ۵۶**

**فصل سوم: آشنایی با نرم افزار ABAQUS و مراحل برنامه نویسی ..... ۵۷**

**۳-۱) مقدمه ..... ۵۸**

**۳-۱) آشنایی با ساختار داخلی نرم افزار ..... ۵۹**

**۳-۲) آشنایی با ساختار برنامه نویسی: ..... ۶۳**

**۳-۳) جمع بندی ..... ۶۷**

**فصل چهارم : معرفی مراحل مستند سازی و انجام تحلیلها ..... ۶۸**

**٤-۱) مقدمه: ..... ۶۹**

**٤-۲) بررسی صحت محاسبه انتگرال J در نمونه ای با نسبت A/W=0.2 در حالت کرنش کوچک ..... ۷۰**

**٤-۳) بررسی صحت محاسبه انتگرال J در نمونه ای با نسبت A/W=0.6 در حالت کرنش کوچک ..... ۷۶**

**٤-٤) بررسی صحت محاسبه انتگرال J با در نظر گرفتن اثرات تغییر شکلهای بزرگ ..... ۸۱**

**٤-٥) مدلسازی غیر اتوماتیک رشد ترک در ماده الاستیک-پلاستیک به روش SED ..... ۸۷**

**٤-٦) اهداف پروژه، مواد مورد استفاده و تحلیلهای انجام شده ..... ۹۱**

۴-۶-۱) معرفی مواد مورد استفاده ..... ۹۲

۴-۶-۲) معرفی نمونه های مورد استفاده ..... ۹۳

۴-۶-۳) معرفی تحلیلهای انجام شده ..... ۹۶

**٤-۷) جمع بندی ..... ۹۷**

**فصل پنجم : ارائه و بررسی نتایج ..... ۹۸**

**۵-۱) مقدمه ..... ۹۹**

**۵-۲) بررسی تاثیر طول اولیه بر رفتار رشد ترک ..... ۱۰۰**

۵-۲-۱) بررسی قطعه CT در حالت کرنش صفحه ای ..... ۱۰۰

۵-۲-۲) بررسی قطعه MT در حالت کرنش صفحه ای ..... ۱۰۲

۵-۲-۳) بررسی قطعه SEN در حالت کرنش صفحه ای ..... ۱۰۵

۵-۲-۴) بررسی قطعه CT در حالت تنش صفحه ای ..... ۱۰۷

۵-۲-۵) بررسی قطعه MT در حالت تنش صفحه ای ..... ۱۱۰

۵-۲-۶) بررسی قطعه SEN در حالت تنش صفحه ای ..... ۱۱۲

**۵-۳) بررسی تاثیر جنس نمونه بر رفتار رشد ترک ..... ۱۱۵**

۵-۳-۱) بررسی تاثیر جنس نمونه بر رفتار رشد ترک (حالت کرنش صفحه ای) ..... ۱۱۵

**٥-٤) بررسی تاثیر حالت تنش بر رفتار رشد ترک (اثر ضخامت) ..... ۱۱۸**

۵-۴-۱) بررسی تاثیر ضخامت در نمونه CT – فولادی ..... ۱۱۹
۵-۴-۲) بررسی تاثیر ضخامت در نمونه MT – فولادی ..... ۱۲۰
۵-۴-۳) بررسی تاثیر ضخامت در نمونه SEN – فولادی ..... ۱۲۱
۵-۴-۴) بررسی تاثیر ضخامت در نمونه CT – آلومینیومی ..... ۱۲۳
۵-۴-۵) بررسی تاثیر ضخامت در نمونه MT – آلومینیومی ..... ۱۲۴

**۵-۵) بررسی صحت نتایج ..... ۱۲۶**
۵-۵-۱) بررسی صحت نتایج با استفاده از روش CTOA ..... ۱۲۸
۵-۵-۲) بررسی صحت نتایج با استفاده از معیار SIH ..... ۱۳۲

**۵-۶) نتیجه گیری ..... ۱۳۵**
**فصل ششم : نتیجه گیری و فعالیتهای آینده ..... ۱۳۷**
**۶-۱) نتیجه گیری ..... ۱۳۸**
**۶-۲) فعالیتهای آینده ..... ۱۳۹**
**پیوست ۱ : کد کامپیوتری ..... ۱۴۰**
**مراجع: ..... ۱۴۷**

# فهرست شکلها


شکل ۱-۲. تقریب نخست از اندازه منطقه پلاستیک نوک ترک.[۷] ۱۵

شکل ۲-۲. تصحیح منطقه پلاستیک ایروین.[۷] ۱۷

شکل ۳-۲. مدل نوار تسلیم شده. منطقه پلاستیک با مقدار تنش تسلیم فشاری در طرفین نوک ترک مدل می شود.[۷] ۱۸

شکل ۴-۲. نیروی بازکننده ترک که در فاصله X از خط مرکزی اعمال شده است.[۷] ۱۹

شکل ۵-۲. تغییرات محدوده پلاستیک در عمق .[۷] ۲۱

شکل ۶-۲. الگوهای مختلف از (A) تغییر شکل برشی $45^{\circ}$ در حالت تنش صفحه ای و (B) تغییر شکل لولا شکل در حالت کرنش صفحه ای.[۹] ۲۲

شکل ۷-۲. مقایسه بین رفتار تنش- کرنش برای مواد الاستیک- پلاستیک و الاستیک غیرخطی.[۸] ۲۳

شکل ۸-۲. مدار اختیاری در اطراف نوک یک ترک.[۷] ۲۵

شکل ۹-۲. تأثیر توان کرنش سختی، N بر ثابت انتگرال $HRR$ .[۷] ۲۷

شکل ۱۰-۲. تغییرات زاویه ای تنش بدون بعد برای N =۳ N = ۱۳ [۷] ۲۸

شکل ۱۱-۲. نتایج تحلیل تنش بر اساس تئوری کرنش بزرگ در نوک ترک[۱۸] ۳۰

شکل ۱۲-۲. تغییر مکان نوک ترک CTOD یک ترک تیز اولیه در اثر تغییر شکل پلاستیک بصورت منحنی (BLUNT) درمی آید بطوری که به اندازه $\delta$ تغییر شکل می دهد.[۷] ۳۲

شکل ۱۳-۲. تخمین CTOD از تغییر مکان مؤثر ترک در منطقه پلاستیک تصحیح شده توسط ایروین.[۷] ۳۲

شکل ۱۴-۲. تخمین CTOD از مدل نوار ناحیه تسلیم.[۷] ۳۴

شکل ۱۵-۲. تعریف های دیگری از CTOD.[۷] ۳۵

شکل ۱۶- ۲. مدل لولایی برای تخمین CTOD و CTOA با استفاده از خمش سه تکیه گاهی.[۷] ۳۵

شکل ۱۷-۲. تعیین مؤلفه پلاستیک تغییر مکان دهانه ترک.[۷] ۳۷

شکل ۱۸-۲. مقدار CTOA بحرانی برای نمونه های تنش صفحه ای.[۵] ۳۹

شکل ۱۹-۲. مقدار CTOA بحرانی برای نمونه های کرنش صفحه ای.[۵] ۴۰

شکل ۲۰-۲. چگونگی مدلسازی رشد ترک به روش CTOA.[۱] ۴۱

شکل ۲۱-۲. توان باقی مانده $\left(\frac{dW}{dV}\right)_C^*$ و توان هدررفته $\left(\frac{dW}{dV}\right)_P$ در اثر تغییر شکل پلاستیک.[۱۴] ۴۷

شکل ۲۲-۲. نمودار تئوری انرژی کرنشی بدون در نظر گرفتن تاثیر پلاستیسیته[۱۴] ۴۸

شکل ۲۳-۲. نمودار تئوری انرژی کرنشی با در نظر گرفتن تاثیر پلاستیسیته (رشد پایدار ترک).[۱۶] ۴۹

شکل ۲۴-۲. نمودار تئوری انرژی کرنشی با در نظر گرفتن تاثیر پلاستیسیته (رشد ناپایدار ترک).[۱۶] ۴۹

شکل ۱-۳. ساختار داخلی نرم افزار ABAQUS [۲۸] ۶۱

شکل۱-۴.مدل تحت بارگذاری ..... ۷۰
شکل۲-۴.مدل یک چهارم و شبکه المان محدود مورد استفاده ..... ۷۱
شکل ۳-۴. کانتور تنش فون مایزز در نوک ترک ..... ۷۲
شکل ۴-۴.نمودار مقادیر انتگرال J ..... ۷۳
شکل ۵-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش زاویه ای ..... ۷۴
شکل ۶-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش تحت زاویه صفر درجه ..... ۷۵
شکل ۷-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش تحت زاویه ۴۵ درجه ..... ۷۵
شکل ۸-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش تحت زاویه۶۷/۵ درجه ..... ۷۵
شکل۹-۴.مدل تحت بارگذاری ..... ۷۶
شکل۱۰-۴. مدل یک چهارم و شبکه المان محدود ..... ۷۷
شکل ۱۱-۴. کانتور تنش فون مایزز در نوک ترک ..... ۷۷
شکل ۱۲-۴.نمودار مقادیر انتگرال J ..... ۷۸
شکل ۱۳-۴.نمودار اختلاف مقادیر تنشهای محاسبه شده ..... ۸۰
شکل ۱۴-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش تحت زاویه صفر درجه ..... ۸۰
شکل ۱۵-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش تحت زاویه ۴۵ درجه ..... ۸۱
شکل ۱۶-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش تحت زاویه ۶۷/۵ درجه ..... ۸۱
شکل۱۸-۴. مدل تحت بارگذاری ..... ۸۲
شکل ۱۹-۴. المان بندی در نوک ترک ..... ۸۳
شکل ۲۰-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش تحت زاویه صفر درجه ..... ۸۴
شکل ۲۱-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش تحت زاویه ۴۵ درجه ..... ۸۴
شکل ۲۲-۴.نمودار مقایسه مقادیر اختلاف در محاسبه تنش تحت زاویه ۶۷/۵ درجه ..... ۸۵
شکل ۲۳-۴.شبکه المان بندی در نوک ترک ..... ۸۸
شکل۲۴-۴. مدل رفتار ماده در حالت الاستیک – پلاستیک ..... ۸۸
شکل۲۵-۴. نمودار چگالی انرژی کرنشی برای رشد ترک در هر مرحله ..... ۸۹
شکل۲۶-۴. نمودار رشد ترک بازای اعمال بار ..... ۹۰
شکل۲۷-۴. نمودار مقایسه ای چگالی انرژی کرنشی و مقاومت ماده برای رشد ترک در مرحله اول ..... ۹۰
شکل۲۸-۴. نمودار مقایسه ای چگالی انرژی کرنشی و مقاومت ماده برای رشد ترک در مرحله دوم ..... ۹۱
شکل۲۹-۴. نمودار مقایسه ای چگالی انرژی کرنشی و مقاومت ماده برای رشد ترک در مرحله سوم ..... ۹۱
شکل۳۰-۴. نمودار تنش – کرنش واقعی برای مواد استفاده شده در آنالیز ..... ۹۳
شکل ۳۳-۴. مدل و بار گذاری نمونه SEN ..... ۹۵
شکل ۳۴-۴. شبکه المان بندی در نوک و اطراف ترک ..... ۹۵

شکل ۱-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه CT در تحلیلهای A1,A4&A7 ..... ۱۰۰
شکل ۲-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه MT در تحلیلهای A2,A5&A8 ..... ۱۰۳
شکل ۳-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه SEN در تحلیلهای A3,A6&A9 ..... ۱۰۵
شکل ۴-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه CT در تحلیلهای A10,A13&A16 ..... ۱۰۸
شکل ۵-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه MT در تحلیلهای A11,A14&A17 ..... ۱۱۰
شکل ۶-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه SEN در تحلیلهای A12,A15&A18 ..... ۱۱۳
شکل ۷-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه CT در تحلیلهای A1,A19&A22 ..... ۱۱۶
شکل ۸-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه MT در تحلیلهای A2,A20&A23 ..... ۱۱۶
شکل ۹-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه SEN در تحلیلهای A3,A21&A24 ..... ۱۱۷
شکل ۱۰-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه CT در حالات تنش صفحه ای و کرنش صفحه ای (نمونه فولادی) ..... ۱۱۹
شکل ۱۱-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه MT در حالات تنش صفحه ای و کرنش صفحه ای (نمونه فولادی) ..... ۱۲۱
شکل ۱۲-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه SEN در حالات تنش صفحه ای و کرنش صفحه ای (نمونه فولادی) ..... ۱۲۲
شکل ۱۳-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه CT در حالات تنش صفحه ای و کرنش صفحه ای (نمونه آلومینیومی) ..... ۱۲۳
شکل ۱۴-۵. مقایسه رفتار رشد ترک برای نمونه MT در حالات تنش صفحه ای و کرنش صفحه ای (نمونه آلومینیومی) ..... ۱۲۵
شکل ۱۵-۵. مقایسه نتایج حاصل از روشهای SED و CTOA در تحلیل A1 ..... ۱۲۸
شکل ۱۶-۵. مقایسه نتایج حاصل از روشهای SED و CTOA در تحلیل A2 ..... ۱۲۹
شکل ۱۷-۵. مقایسه نتایج حاصل از روشهای SED و CTOA در تحلیل A4 ..... ۱۲۹
شکل ۱۸-۵. مقایسه نتایج حاصل از روشهای SED و CTOA در تحلیل A5 ..... ۱۳۰
شکل ۱۹-۵. مقایسه نتایج حاصل از روشهای SED و CTOA در تحلیل A10 ..... ۱۳۰
شکل ۲۰-۵. مقایسه نتایج حاصل از روشهای SED و CTOA در تحلیل A11 ..... ۱۳۱
شکل ۲۱-۵. مقایسه نتایج حاصل از روشهای SED و CTOA در تحلیل A13 ..... ۱۳۱
شکل ۲۲-۵. مقایسه نتایج حاصل از روشهای SED و CTOA در تحلیل A14 ..... ۱۳۲
شکل ۲۳-۵. نمودار تغییرات فاکتور چگالی انرژی کرنشی بر حسب رشد ترک در تحلیلهای A1 و A2 ..... ۱۳۲
شکل ۲۴-۵. نمودار تغییرات فاکتور چگالی انرژی کرنشی بر حسب رشد ترک در تحلیلهای A4 و A5 ..... ۱۳۳
شکل ۲۵-۵. نمودار تغییرات فاکتور چگالی انرژی کرنشی بر حسب رشد ترک در تحلیلهای A10 و A11 ..... ۱۳۳
شکل ۲۶-۵. نمودار تغییرات فاکتور چگالی انرژی کرنشی بر حسب رشد ترک در تحلیلهای A13 و A14 ..... ۱۳۴

# فهرست جداول

جدول ۱-۴. مشخصات ماده مورد استفاده ..... ۷۰
جدول ۲-۴. مقادیر انتگرال J محاسبه شده در نوک ترک ..... ۷۲
جدول ۳-۴. مشخصات ماده مورد استفاده ..... ۷۶
جدول ۴-۴. مشخصات ماده مورد استفاده در تئوری HRR ..... ۷۷
جدول ۵-۴. مقدار انتگرال J ..... ۷۸
جدول ۶-۴. نتایج اعمال تئوری SED با در نظر گرفتن اثر پلاستیسیته در نوک ترک ..... ۸۹
جدول ۷-۴. مشخصات و خواص مواد مورد استفاده در تحلیلها.[۱،۵] ..... ۹۲
جدول ۸-۴. مشخصات تحلیلهای انجام شده ..... ۹۶

# لیست علائم و اختصارات

| | |
|---|---|
| $T_i$ : | بردار تنش عمود بر سطح |
| $n_j$ : | بردار نرمال سطح |
| $\alpha$ : | ضریب سخت شوندگی |
| $n$ : | توان سخت شوندگی |
| $\sigma_0$ : | تنش مبنا |
| $\varepsilon_0$ : | کرنش مبنا |
| $I_n$ : | ثابت انتگرال HRR |
| $\widetilde{\sigma}_{ij}(n,\theta)$ : | تابع تنش در HRR |
| $\widetilde{\varepsilon}_{ij}(n,\theta)$ : | تابع کرنش در HRR |
| $U_i$ : | بردار جابجائی |
| $m$ : | ثابت رابطه میان $\delta, K$ |
| $r_o$ : | فاکتور چرخش |
| $V_p$ : | جابجائی دهانه ترک |
| $el$ : | اندیس الاستیک |
| $pl$ : | اندیس پلاستیک |
| $\Delta C_S$ : | بازه رشد ترک |
| $\Delta T$ : | تغییرات دما |
| $\Delta C$ : | تغییرات رطوبت |
| $\sigma_{eff}$ : | تنش معادل |
| $\widetilde{\sigma}_n$ : | تنش فون مایزز در نقطه انتگرال گیری |
| $\widetilde{\varepsilon}_n$ : | کرنش متناظر با $\widetilde{\sigma}_n$ در نمودار تنش کرنش واقعی |
| $S_{mis}, S_{mises}$ : | تنش معادل فون مایزز در المان |
| $S_{22}$ : | تنش عمود بر راستای محور شعاعی |
| $S_{tt}$ : | تنش زاویه ای |
| $S_r$ : | تنش در فاصله دور نسبت به ترک |
| $CPE8$ : | المان صفحه ای درجه ۲- کرنش صفحه ای |
| $CPS8$ : | المان صفحه ای درجه ۲ -تنش صفحه ای |

| | |
|---|---|
| $\sigma_i$ : | تنش نرمال |
| $\tau_{ij}$ : | تنش برشی |
| $\sigma_{ij}$ : | عناصر تانسور تنش |
| $\varepsilon_{ij}$ : | عناصر تانسور کرنش |
| $W$ : | انرژی کرنشی |
| $\frac{dW}{dV}$ : | چگالی انرژی کرنشی |
| $\left(\frac{dW}{dV}\right)_C$ : | چگالی انرژی کرنشی بحرانی |
| $\left(\frac{dW}{dV}\right)_C^*$ : | توان باقیمانده در ماده |
| $S$ : | فاکتورچگالی انرژی کرنشی |
| $S_C$ : | فاکتورچگالی انرژی کرنشی بحرانی |
| $a_{ij}$ : | ضرائب فاکتور چگالی انرژی کرنشی |
| $K_I$ : | ضریب شدت تنش |
| $K_{IC}$ : | ضریب شدت تنش بحرانی |
| $E$ : | مدول الاستیسیته |
| $G$ : | مدول برشی |
| $\nu$ : | ضریب پواسون |
| $r, \theta$ : | مختصات قطبی نسبت به نوک ترک |
| $CTOD, \delta$ : | جابجائی بازشدگی نوک ترک |
| $CTOA, \psi_C$ : | زاویه بازشدگی نوک ترک |
| $CMOD$ : | جابجائی بازشدگی دهانه ترک |
| $a$ : | جابجائی بازشدگی نوک ترک |
| $w$ : | عرض قطعه |
| $\sigma_{ys}, S_y$ : | تنش تسلیم |
| $r_p$ : | فاصله در ناحیه پلاستیک |
| $r_p^*$ : | شعاع حد ناحیه پلاستیک |
| $C$ : | ضریب هندسی شدت تنش |
| $J$ : | انتگرال-J |

# فصل اول : مقدمه

## ۱-۱) اهمیت و ضرورت پرداختن به موضوع رشد ترک درمواد نرم

از زمانی که بشر برای اولین بار به استفاده هدفمند از پیرامون خود پرداخت و اشیاء اطراف خود را به صورت ترکیبی برای برآوردن نیازهایش مورد استفاده قرار داد، همواره داشتن آگاهی نسبت به رفتار لوازم و ابزارها جزء دغدغه های اصلی وی بوده است. وجود این نیاز یعنی شناخت رفتارها، علم و دانش بشری را به سوی ابداع و استفاده از روشهای مدلسازی سوق داده است به گونه ای که امروزه هر یک از شاخه های علم به نحوی بر شالوده ای از مدلسازی استوار اند. اما نکته حائز اهمیت در بررسی رابطه علوم دانشگاهی و کاربردهای صنعتی در این است که بسیاری از یافته های علمی بدلیل نداشتن توجیه های اقتصادی از دیدگاه صنعت هنوز نتوانسته اند جایگاه شایسته خود را در کاربردهای صنعتی نهادینه نمایند. البته صنایع مرتبط با علوم برتر (High Technology) از این قائده مستثنی هستند.

از نمونه های این مطلب می توان به مکانیک شکست اشاره نمود که با وجود گذشت قریب به یک قرن از تولد آن در عرصه های دانشگاهی ، تا به حال هنوز دراستاندارد ها و کدهای مرسوم مورد استفاده در طراحی های صنعتی جایگاهی شایان توجه برای خود ایجاد ننموده است ، و موارد استفاده شده( نظیر کد مخازن تحت فشار ASME sec8(2004) در قسمت دوم) به صورت اختیاری و غیر اجباری به مکانیک شکست خطی اشاره شده است که صرفاً جهت بررسی قطعه طراحی شده در مقابل بروز ترک و نه به عنوان مبنایی برای جلوگیری از رشد ترک در حین طراحی ارائه شده است .

البته در استانداردهائی نظیر ASTM، BS و موارد مشابه ،استانداردهائی جهت استخراج خواص مواد از دیدگاه مکانیک شکست وجود دارند که از آنها جهت استانداردسازی رویه های آزمایشگاهی و نه به منظور انجام طراحی استفاده می شود. مواد نرم یا Ductile که در بیشتر ماشین آلات حضور دارند اغلب به صورت موردی و توسط آزمایشگاههای تحقیقاتی بزرگ در شرکتهایی نظیر خودروسازی ها و صنایع نظامی مورد بررسی قرار می گیرند . طراحی

های مقابله با رشدترک عموما با جلوگیری از ورود قطعه به فاز پلاستیک پیشرفته همراه هستند که این امر به نوبه خود موجب افزایش هزینه ها گردیده و در مواردی منجر به غیر اقتصادی شدن انجام طرح می گردد.

در این پروژه سعی شده است تا با استفاده از دو تئوری معتبر شناخته شده در زمینه رشد ترک یعنی تئوری چگالی انرژی کرنشی SED و تئوری زاویه بازشدگی در نوک ترک CTOA و همچنین استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS که در دسترس عموم مهندسین آشنا به المان محدود قرار دارد ، تلاشی برای یافتن پارامترهایی در قطعات ترکدار صورت گیرد.

## ۲-۱) خلاصه ای از فعالیتهای صورت گرفته در مورد روش SED

G.C.Sih را می توان بنیانگذار و معرفی کننده اصول تئوری چگالی انرژی کرنشی در رشد ترک دانست. وی در سال ۱۹۷۱ در مقاله ای تحت عنوان A special theory of crack propagation ، پس از بررسی سابقه تئوری های ارائه شده مبتنی بر روش انرژی برای رشد ترک ،روشی را تحت عنوان چگالی انرژی کرنشی برای پیش بینی رشد ترک در مواد الاستیک یا دارای رفتار شکست ترد ارائه نمود . [۱۲] . Sih تئوری خود را که به تئوری S معروف است بر حسب تنشهای درون المان ماده در مقابل جبهه ترک برای مواد دارای خواص الاستیک به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dW}{dV}=\left[\frac{1}{2E}(\sigma_x{}^2+\sigma_y{}^2+\sigma_z{}^2)-\frac{\nu}{E}(\sigma_x\sigma_y+\sigma_y\sigma_z+\sigma_x\sigma_z)+\frac{1}{2G}(\tau_{xy}^2+\tau_{xz}^2+\tau_{yz}^2)\right] \qquad (۱-۱)$$

که $\frac{dW}{dV}$ بیانگر انرژی کرنشی ذخیره شده در واحد حجم ماده در محل مورد نظر؛ تنشهای $\sigma_i,\tau_{ij}$ اعضای تانسورتنش در موقعیت مورد بررسی ؛ $E$ بیانگر مدول الاستیک؛ $G$ بیانگر مدول برشی و $\nu$ ضریب پواسون می باشند .

Sih با استفاده از تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی LEFM ، رابطه فوق را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{dW}{dV}=\frac{1}{r}(a_{11}k_1{}^2+2a_{12}k_1k_2+a_{22}k_2{}^2+a_{33}k_3{}^3)+.... \qquad (۱-۲)$$

که در آن $k_i = \frac{K_I}{\sqrt{\pi}}$ بوده و $K_I$ ها فاکتورهای شدت تنش هستند. Sih ، مقدار داخل پرانتز را به عنوان فاکتور چگالی انرژی کرنشی تعریف نمود و بیان داشت که این عامل ، فاکتور تأثیر گذار در رشد ترک می باشد.

$$S = a_{11}k_1^{\,2} + 2a_{12}k_1k_2 + a_{22}k_2^{\,2} + a_{33}k_3^{\,3} \qquad (۱-۳)$$

در این رابطه مقادیر $a_{ij}$ به صورت زیر محاسبه می شوند .

$$a_{11} = \frac{1}{16G}[(3-4\upsilon-\cos\theta)(1+\cos\theta)]$$

$$a_{12} = \frac{1}{16G}[2Sin\theta(\cos\theta-(1-2\upsilon))] \qquad (۱-۴)$$

$$a_{22} = \frac{1}{16G}[4(1-\upsilon)(1-\cos\theta)+(1+\cos\theta)(3\cos\theta-1)]$$

$$a_{33} = \frac{1}{4G}$$

براساس این تئوری رشد ترک با دو شرط زیر قابل پیش بینی است:

۱- ترک در جهتی که S در آن کمترین مقدار را دارد، رشد می نماید.

$$\frac{\partial S}{\partial\theta} = 0, \frac{\partial^2 S}{\partial^2\theta} \geq 0 \qquad (۱-۵)$$

۲- میزان رشد ترک توسط عاملی به نام $S_c$ یا فاکتور چگالی کرنشی بحرانی کنترل می شود .

همانطور که در بالااشاره شد این روش بر حد بحرانی چگالی انرژی کرنشی برای رشد ترک استوار است و در نتیجه خواهیم داشت :

$$\left(\frac{dW}{dV}\right)_c = \frac{S_1}{r_1} = \frac{S_2}{r_2} = \ldots\ldots\ldots = \frac{S_c}{r_c} \qquad (۱-۶)$$

۹

$$S_1 < S_2 < ..... < S_c \qquad (۱-۷)$$

در این روابط $S_c$ میزان رشد ترک را پیش بینی می کند و $r_c$ کمترین فاصله از نوک ترک است که بـروز ناپایـداری یـا رشد ترک پایدار تا آن نقطه ادامه می یابد .

Sih، در مقاله دیگری در سال ۱۹۷۹به بررسی دقیقتر تئوری خود پرداخت. وی در این مقالـه تـأثیر پلاسـتیک شـدگی محدود درنوک ترک و اثرضخامت را نیز مورد بررسی قرارداد . براساس آنچه وی در این مقاله عنوان نمود در صورتی که ناحیه پلاستیک در مقابل جبهه ترک ناچیز باشد، شرایط عنوان شده بـرای حالـت الاسـتیک قابـل اعمـال بـه حالـت الاستیک پلاستیک خواهند بود و $\frac{S_c}{r_c}$ ثابت باقی خواهد ماند . او دراین بررسی اظهار داشت که $S_c$ برای قطعات دارای پلاستیسیته محدود در نوک جبهه ترک مانند حالت الاستیک ثابت باقی می ماند . [۱۳]

براساس این بررسی در حالت الاستیک، رفتارغیرخطی رشد ترک فقط براثر اعمال بارگذاری غیر خطی بروز خواهد کرد . اما در حالت الاستیک- پلاستیک محدود یعنی بدون در نظر گرفتن اثرات کرنشهای پلاستیک انباشته، بروز ناپایداری در رشد ترک علاوه بربارگذاری شدیداً به رفتار غیر خطی ماده وابسته است .

Sih و همکاران وی (Matic, Madenci) در ادامه بررسـی هـای خـود بـر روی تئـوری SED طـی سلـسله مقالاتی به بررسی اثر کرنشهای دائمی انباشته شده بر اثر تغییر شکل پلاستیک در ناحیه مقابـل جبهـه تـرک پرداختنـد (۱۹۸۶-۱۹۸۲). براساس این بررسی ها ، Sih و همکارانش اعلام نمودند که براثربروز تغییرشکل دائمی در مقابل جبهه ترک ، مقاومت ماده دربرابر رشد ترک در قسمتی از جبهـه تـرک کـه رشـد در آن صـورت خواهـد گرفـت بـه صـورت محسوسی کاهش می یابد و این امر موجب بروزعامل غیر خطی ثانویـه ای در رفتـار قطعـه ترکـدار در برابـر بارگـذاری می شود. به عبارت بهتر در هر مرحله از بارگذاری مقاومت ماده مقابل جبهه ترک در برابر رشد ترک کاهش مـی یابـد و

این امر رشد رادر ماده تسهیل نموده و موجب افزایش میزان رشدترک در ماده و بروز سریعتر حالت ناپایداری و یا به عبارتی Fast Fracture می گردد . این مباحث در فصل دوم مورد بررسی قرار می گیرند . [۱۴،۱۵،۱۶]

Zhao Yishu در سال ۱۹۸۷ به بررسی رشدترک در حالت مود ترکیبی براساس روش چگالی انرژی پرداخت. او برای تخمین جهت رشد ترک از این معیارکه "رشد ترک در جهتی که چگالی انرژی کرنش کمترین است رخ می دهد" استفاده نمود. براساس بررسی به عمل آمده توسط وی، از روش SED می توان نه تنها برای مواد دارای شکست ترد بلکه برای مواد دارای ناحیه پلاستیک محدود در مقابل ترک استفاده نمود. از مزایایی که وی برای روش SED ذکر کرده است می توان به داشتن توجیه فیزیکی محسوس ، گستره وسیع قابلیت اعمال و ریاضیات نسبتاً ساده اشاره کرد . از سوی دیگر این روش تطابق خوبی با نتایج حاصل درآزمایش دارد . [۲۲]

گروهی دیگر از محققان در این زمینه نیز به بررسی موضوع از دیدگاه المان محدود پرداختند و روشی را براساس تئوری فوق بنیان نهادند .فعالیتهای قابل ذکر در این زمینه اغلب توسط محقق چینی به نام Chow وهمکارانش صورت گرفت . این افراد براساس فرمولاسیون المان محدود روشی را برای بررسی تغییرات انرژی کرنشی در ماده مورد بررسی براساس تغییرات انرژی پتانسیل با استفاده از تئوری پلاستیسیته هیل (Hill) و معادلات پرنتل- رس بنیان نهادند و نتایج بدست آمده توسط Sih وهمکارانش را تأیید نمودند . [۱۹،۲۰،۲۱]

یکی از نکات مهم در تئوری چگالی انرژی کرنشی که کمتر توسط محققان پیشین مورد توجه قرار گرفته است توانایی این مدل در ارائه منحنی بار – رشد ترک است که می تواند در طراحی مورد استفاده قرار گیرد . به عبارت دیگر این مدل می تواند با ارائه نمودار رفتاربار - رشد ترک در محدوده های زیر بحرانی و بحرانی رشد ترک (حالات پایدار و ناپایدار رشد ترک) ، الگوی مناسبی را جهت استفاده طراحان در طراحی نحوه تحت بار قرارگیری قطعات در صورت وجود ترکهای احتمالی در اختیارقرار دهد . به سبب اهمیت بررسی نحوه رفتار ترک در هنگام رشد در حین فرآیند

طراحی این بررسی ها در این پروژه تا حد امکان صورت خواهند گرفت و نمودارهـای بـار – رشـد تـرک بـرای حـالات مختلف بررسی قرار خواهند شد. هدف دیگری که در این بررسی پیگیری می شود مطالعه نحوه تـاثیر شـدت پلاسـتیک شدگی مقطع بر رفتار رشد ترک در حالت کنترل بار (Load Control) می باشـد.ایـن روش ، روش اصـلی مـورد استفاده در این پایان نامه می باشد.

## ۳-۱) بررسی فعالیت های صورت گرفته در زمینه رشد ترک به روش CTOA

سابقه استفاده از تغییر مکان نوک ترک به عنوان معیار رشد ترک درمواد دارای رفتار الاستیک – پلاستیک به تلاشهای ولز [۲۵] در سالهای ۱۹۶۰ باز می گردد . وی در بررسی های خود متوجه تغییر شکل نوک ترک پیش از رشد آن شـد و دریافت که تغییر مکان نوک ترک را می توان به عنوان معیاری برای رشد ترک در مواد با رفتـار پلاسـتیک کـه توسـط مدل اروین قابل توضیح اند، استفاده کرد ، وی توضیح داد که در مواردی که مکانیک شکست خطی فاقد اعتبـار اسـت ، جابجایی در نوک ترک عامل مناسبی برای بررسی شرایط در نوک ترک خواهد بود . پس از ولز در سالهای بعـد بررسـی بر روی حالات مختلف جابجایی درنوک ترک برای پیش بینی رفتار ترک گسترش یافت . [۷]

در سال ۱۹۷۵ Konning نشان داد که در مواد نرم CTOA درهنگام رشد ترک ثابت تقریباً باقی مـی مانـد. وی در بررسی های خود مقادیری را برای مواد و نمونه های مورد استفاده اش ارائـه نمـود.[۴،۵]. پـس از وی بررسـی هـای Shih و همکـارانش (۱۹۷۹) ، Kanninen (۱۹۷۹) و BrocksوYuan از یـک سـو و Newman و همکارانش در سال ۱۹۹۱ نشان داد که درآنالیز دو بعدی المان محدود در حالتهای تنش صفحه ای و کرنش صـفحه ای مقدار CTOA از مقادیر محاسبه شده توسط Konning بیشتر می باشد . [۳،۶]

Newman و همکارانش در طی مقاله ای(۱۹۹۴) نشان دادند که دلایل تفاوت ذکر شده با روش Konning در نحوه در نظر گرفتن قیود تنش در نوک ترک می باشند و بااعمال درست و صحیح این قیود در آنالیزها می توان به مقدار ثابتی برای $CTOA, \frac{dCTOD}{da}$ در هنگام رشد ترک دست یافت . [۵]

فعالیتهای گسترده ای نیز براساس مدل سازی سه بعدی المان محدود در نوک ترک صورت گرفته است که موجب دقیق تر شدن نتایج بدست آمده شده اند. از جمله این بررسی ها می توان به فعالیتهای Dawicke , Newman در دهه ۹۰ اشاره نمود . [۱،۳،۱۱].

از سوی دیگر در کنار فعالیتهای صورت گرفته بر مبنای ثابت بودن یا نبودن مقادیر $CTOA, dCTOD/da$ در رشد ترک ، فعالیتهای دیگری نیز بر روی نحوه اندازه گیری صحیح مقادیر ذکر شده و مقایسه آنها با نتایج تئوریک صورت گرفته است .[۴،۵]. از میان این فعالیتها می توان به فعالیتهای آزمایشگاهی Luxmoore و همکارانش در سال ۱۹۷۷ اشاره کرد که نشان داد در رشد پایدار ترک مقادیر CTOA برای ورقه های آلومینیومی ثابت می مانند . Paleebut نیز در سال ۱۹۷۸ نشان داد که مقادیر CTOD اندازه گیری شده توسط وی مطابقت مناسبی با نتایج تئوریک هم عصران خود داشت.

از سوی دیگر بررسی های Reuter (۱۹۹۱) و Dawicke (۱۹۹۴) به روش عکسبرداری فوق دقیق نشان داد که مقادیر CTOA در ورقه های نازک فولادی در شروع رشد پایدار ترک تا ابتدای مرحله ناپایداری ثابت باقی می ماند. [۵،۶،۱۰]

از سایر فعالیتهای قابل توجهی که در این زمینه صورت گرفته است می توان به مقاله Druce , Gibson [۲] اشاره کرد که در آن تغییرات CMOD , CTOD , CTOA در مواد فولادی مورد بررسی قرار گرفته است (۱۹۸۷). براساس این بررسی $CTOA, \frac{dCTOD}{da}$ معیارهای مناسبی برای رشد پایدار ترک محسوب می شوند اما CMOD