

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

## تعیین پارامترهای آسیب نرم برای فولاد St12

اساتید راهنما:

دکتر مهدی سلمانی تهرانی

دکتر مهرداد پورسینا

استاد مشاور:

دکتر آرش بهروزی

پژوهشگر:

حسن نجات بخش

بهمن ماه ۱۳۹۰



دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه‌ی آقای حسن نجات بخش جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی با عنوان « تعیین پارامترهای آسیب نرم برای فولاد St12 » در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۹ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و با نمره ۱۹/۲ مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر مهدی سلمانی تهرانی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۲. استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر مهرداد پورسینا با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۲. استاد مشاور پایان‌نامه دکتر آرش بهروزی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۳. استاد داور داخلی گروه دکتر حسین گلستانیان با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا

۴. استاد داور داخلی گروه دکتر یعقوب طادی بنی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

دکتر بهزاد قاسمی

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی و مهندسی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

## تشکر و قدردانی

شکر خداوند متعال را به جای آورده که توفیق نصیب من کرد تا این پایان نامه را به پایان برسانم. سپاس بیکران بر همدلی و همراهی و همگامی مادر دلسوز و مهربانم که سجده‌ی ایثارش گل محبت را در وجودم پروراند و دامان گهربارش لحظه‌های مهربانی را به من آموخت.

تقدیر و تشکر شایسته از اساتید فرهیخته و فرزانه دکتر مهرداد پورسینا و دکتر مهدی سلمانی تهرانی که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمودند و همواره راهنما و راه‌گشای نگارنده در اتمام واکمال پایان‌نامه بوده است. همچنین از دکتر آرش بهروزی که زحمت مشاوره‌ی این پایان‌نامه را به عهده داشتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از شرکت شهرک‌های صنعتی استان چهارمحال بختیاری که ای پایان‌نامه را مورد حمایت خود قرار داد و از کلیه‌ی اساتیدی که در راه تعلیم و آموزش اینجانب از دانش آن‌ها بهره گرفته‌ام و سایر دوستانی که در به ثمر رسیدن این پایان‌نامه یاریم نمودند، بی‌نهایت ممنون و سپاسگزارم.

حسن نجات‌بخش

بهمن‌ماه ۱۳۹۰

**تقدیم به:**

**تمام پویندگان طریقت علم و معرفت  
و تقدیم به مادر عزیزم و همسر مهربانم**

## چکیده

فولاد St12 به علت قابلیت بالای شکل‌پذیری کاربرد زیادی در صنایع خودروسازی و همچنین سایر صنایع مرتبط با شکل‌دهی ورق‌ها دارد. در تحقیق پیش رو مدل آسیب هوپوترا برای فولاد St12 مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از آزمایش‌های کشش بر روی نمونه‌های استاندارد و نمونه‌های طراحی شده، پارامترهای این مدل استخراج شد. در این مدل آسیب، تنش سه محوره و کرنش شکست از اصلی‌ترین عواملی هستند که شروع و رشد آسیب را کنترل می‌کند. پارامترهای آسیب با انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های شیاردار (Flat-grooved) و نمونه‌های انتقالی، برشی و پروانه‌ای و به موازات آن‌ها انجام شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استخراج می‌شود. در پایان این تحقیق با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های شکافدار (Single & Double notched) مدل بدست آمده اعتبارسنجی شده و با مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با گزارش آزمایش‌های انجام شده مدل مناسبی جهت پیش‌بینی آسیب در فرآیندهای شکل‌دهی بدست آمده است. از نتایج دیگری که از این پژوهش استخراج شد تعیین پارامتر آسیب بحرانی برای این نوع فولاد تعیین شد.

## کلید واژه‌ها

فولاد St12، آسیب نرم، تنش سه‌محوره، کرنش شکست، آزمایش تجربی، شبیه‌سازی عددی

فصل اول - مقدمه

۸	۱-۱ مقدمه
۱۰	۲-۱ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی آسیب نرم
۱۱	۳-۱ اقدامات انجام شده در این تحقیق

فصل دوم - آسیب

۱۳	۱-۲ مقدمه
۱۳	۲-۲ آسیب
۱۵	۳-۲ انواع آسیب
۱۵	۱-۳-۲ آسیب نرم (Ductile Damage)
۱۵	۲-۳-۲ آسیب ترد (Brittle Damage)
۱۶	۳-۳-۲ آسیب خزشی (Creep Damage)
۱۶	۴-۳-۲ آسیب خستگی (Fatigue Damage)
۱۷	۴-۲ پارامتر آسیب (Damage Variable)
۱۸	۵-۲ مفهوم تنش موثر (Effective Stress Concept)
۱۹	۶-۲ اصل کرنش معادل (Strain Equivalent Principle)
۱۹	۷-۲ اثرات آسیب
۱۹	۸-۲ اندازه‌گیری آسیب
۱۹	۱-۸-۲ اندازه‌گیری آسیب به روش تغییرات مدول الاستیسیته
۲۰	۲-۸-۲ اندازه‌گیری آسیب به روش انتشار امواج اولتراسونیک
۲۱	۹-۲ معیارهای پیش‌بینی شکست
۲۱	۱-۹-۲ مدل کرنش معادل ثابت (Constant Equivalent Strains)
۲۲	۲-۹-۲ مدل تنش برشی ماکزیمم (Maximum Shear Stress)
۲۳	۳-۹-۲ نمودار حد شکل‌دهی (Forming Limit Diagram)
۲۳	۱۰-۲ پیش‌بینی شکست ماده به کمک نمودار حد شکل‌دهی
۲۴	۱-۱۰-۲ روش‌های تجربی تعیین نمودارهای حد شکل‌دهی
۲۸	۲-۱۰-۲ ارزیابی کمی شکست به کمک نمودار حد شکل‌دهی

فصل سوم - آسیب نرم

۳۰	۱-۳ مقدمه
۳۰	۲-۳ آسیب نرم
۳۱	۳-۳ مدل آسیب نرم
۳۲	۱-۳-۳ کرنش شکست (Fracture Strain)



۳۲	۲-۳-۳ تنش سه محوره (Triaxiality Stress)
۳۳	۴-۳ مدل‌های آسیب نرم در ABAQUS
۳۴	۵-۳ مدل آسیب جانسون-کوک (Johanson-Cook Model)
۳۵	۶-۳ معادله‌ی هوپوترا (Hooputra)

### فصل چهارم - مدل آسیب نرم هوپوترا برای فولاد St12

۳۷	۱-۴ مقدمه
۳۷	۲-۴ استخراج خواص مکانیکی برای فولاد St12
۳۹	۳-۴ تعیین پارامترهای آسیب
۳۹	۱-۳-۴ تعیین پارامترهای آسیب برای تنش سه محوره زیاد ( $\eta > 0.4$ )
۳۹	۱-۱-۳-۴ رابطه بریچمن
۴۱	۲-۱-۳-۴ رابطه بریچمن برای نمونه‌های تخت
۴۴	۳-۱-۳-۴ طراحی، ساخت و آزمایش نمونه‌ها
۴۸	۲-۳-۴ تعیین پارامترهای آسیب برای تنش سه محوره کم ( $\eta < 0.4$ )
۴۸	۱-۱-۳-۴ طراحی، ساخت، آزمایش و شبیه‌سازی نمونه‌ی انتقالی
۵۲	۲-۱-۳-۴ طراحی، ساخت، آزمایش و شبیه‌سازی نمونه‌ی برشی
۵۲	۳-۱-۳-۴ طراحی، ساخت، آزمایش و شبیه‌سازی نمونه‌ی پروانه‌ای
۵۶	۴-۴ کالیبره کردن معادله‌ی هوپوترا
۵۶	۱-۴-۴ تعیین ضرایب ثابت معادله‌ی هوپوترا برای تنش سه محوره زیاد ( $\eta > 0.4$ )
۵۷	۲-۴-۴ تعیین ضرایب ثابت معادله‌ی هوپوترا برای تنش سه محوره کم ( $\eta < 0.4$ )
۵۹	۳-۴-۴ تعیین ضرایب ثابت معادله‌ی هوپوترا
۶۰	۵-۴ اعتبارسنجی مدل کالیبره شده‌ی هوپوترا
۶۰	۱-۵-۴ نمونه یک شکافدار (Single notched)
۶۳	۲-۵-۴ نمونه دو شکافدار (Double notched)

### فصل پنجم - نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶۸	۱-۵ مقدمه
۶۸	۲-۵ تاثیر تنش سه محوره بر روی کرنش شکست
۶۹	۳-۵ پیشنهادات جهت ادامه‌ی تحقیق

۷۱	منابع و مراجع
۷۲	چکیده انگلیسی

## فهرست شکل‌ها

شماره صفحه

عنوان

- ۹ شکل (۱-۱)- کاربرد حوزه‌های مکانیک آسیب و مکانیک شکست
- ۱۰ شکل (۲-۱)- حفره و المان در نظر گرفته شده توسط مک کلینتوک
- ۱۴ شکل (۱-۲)- اندازه المان آسیب در فلز (چپ)، در کامپوزیت (وسط) و در بتن (راست)
- ۱۵ شکل (۲-۲)- شروع آسیب نرم در یک فرایند شکل‌دهی
- ۱۶ شکل (۳-۲)- آسیب ترد
- ۱۶ شکل (۴-۲)- آسیب خزشی
- ۱۷ شکل (۵-۲)- آسیب خستگی
- ۱۷ شکل (۶-۲)- مفهوم پارامتر آسیب
- ۲۰ شکل (۷-۲)- اندازه‌گیری آسیب به روش تغییرات مدول الاستیسیته
- ۲۲ شکل (۸-۲)- نمونه‌ی شیاردار برای کالیبراسیون مدل کرنش معادل ثابت
- ۲۴ شکل (۹-۲)- نمودار حد شکل‌دهی و مناطق مختلف آن
- ۲۵ شکل (۱۰-۲)- الگوی دایره‌ای بر روی ورق
- ۲۶ شکل (۱۱-۲)- دستگاه مارک‌زنی بر روی ورق فلزی
- ۲۶ شکل (۱۲-۲)- قرارگرفتن نمونه مارک زده شده روی دستگاه
- ۲۷ شکل (۱۳-۲)- منطقه گلوبی شده بعد از آزمایش
- ۲۷ شکل (۱۴-۲)- خط‌کش میلر
- ۲۹ شکل (۱۵-۲)- محاسبه پارامتر آسیب حدشکل‌دهی به کمک نمودار آن
- ۳۱ شکل (۱-۳)- مراحل رشد آسیب نرم در یک ماده‌ی تحت نیرو
- ۳۵ شکل (۲-۳)- نمودار آسیب جانسون-کوک برای نوعی آلومینیوم
- ۳۶ شکل (۳-۳)- وابستگی کرنش شکست به تنش سه محوره برای آلومینیوم ۲۰۲۴
- ۳۸ شکل (۱-۴)- نمونه‌ی استاندارد کشش ساده مطابق با استاندارد
- ۳۸ شکل (۲-۴)- منحنی تنش کرنش حقیقی فولاد St1۲
- ۴۰ شکل (۳-۴)- نمونه‌های استفاده شده برای تعیین نمودار کرنش شکست بر حسب تنش سه محوره الف) نمونه با شعاع شیار ۱۲ میلی متر ب) نمونه با شعاع شیار ۶ میلی متر ج) نمونه بدون شیار
- ۴۱ شکل (۴-۴)- مقایسه‌ی بین رابطه اصلی بریجمن و رابطه بریجمن اصلاح شده برای اندازه‌گیری تنش سه محوره در مرکز نمونه‌های شیاردار برای نسبت‌های مختلف قطر مقطع به شعاع شیار
- ۴۲ شکل (۵-۴)- الف) مقطع شیاردار نمونه‌های مورد استفاده ب) شکل هندسی نمونه
- ۴۴ شکل (۶-۴)- نقشه‌ی ساخت نمونه‌ی شیاردار با شعاع شیار ۱۲ میلی متر (ابعاد بر حسب میلی متر)
- ۴۵ شکل (۷-۴)- نمونه‌های ساخته شده الف) شعاع شیار ۱۲ میلی متر ب) شعاع شیار ۶ میلی متر ج) شعاع شیار ۴ میلی متر
- ۴۶ شکل (۸-۴)- دستگاه آزمایش کشش به همراه نمونه‌ی شکسته شده

- شکل (۹-۴) - نمودار نیرو-جابجایی نمونه با شعاع ۴ میلی متر ۴۶
- شکل (۱۰-۴) - نمودار نیرو-جابجایی نمونه با شعاع ۶ میلی متر ۴۷
- شکل (۱۱-۴) - نمودار نیرو-جابجایی نمونه با شعاع ۱۲ میلی متر ۴۷
- شکل (۱۲-۴) - نمونه‌ی انتقالی طراحی شده ۴۹
- شکل (۱۳-۴) - نمونه‌ی انتقالی ساخته شده ۴۹
- شکل (۱۴-۴) - الف) نمونه قرار گرفته در دستگاه ب) نمونه دچار شکست شده ۵۰
- شکل (۱۵-۴) - نمودار نیرو-جابجایی نمونه انتقالی ۵۰
- شکل (۱۶-۴) - نمونه‌ی مش‌بندی شده در نرم افزار ABAQUS ۵۱
- شکل (۱۷-۴) - وضعیت تنش سه محوره در طول بارگذاری برای نمونه انتقالی ۵۱
- شکل (۱۸-۴) - نمونه برشی ساخته شده ۵۲
- شکل (۱۹-۴) - وضعیت تنش سه محوره در طول بارگذاری برای نمونه برشی ۵۳
- شکل (۲۰-۴) - الف) نمای سه بعدی نمونه پروانه‌ای ب) نقشه نمونه پروانه‌ای (ابعاد بر حسب میلی متر) ۵۳
- شکل (۲۱-۴) - نمونه پروانه‌ای شکل ساخته شده از فولاد St1۲ ۵۴
- شکل (۲۲-۴) - شکست نمونه‌ی پروانه‌ای شکل ۵۴
- شکل (۲۳-۴) - نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ی پروانه‌ای شکل ۵۵
- شکل (۲۴-۴) - نحوه‌ی مش‌بندی نمونه‌ی پروانه‌ای شکل ۵۵
- شکل (۲۵-۴) - وضعیت تنش سه محوره در طول بارگذاری برای نمونه‌ی پروانه‌ای ۵۶
- شکل (۲۶-۴) - نمودار منطبق شده توسط نرم‌افزار LAB Fit در محدوده تنش سه‌محوره زیاد ۵۸
- شکل (۲۷-۴) - نمودار منطبق شده توسط نرم‌افزار LAB Fit در محدوده تنش سه‌محوره کم ۵۹
- شکل (۲۸-۴) - منحنی کرنش شکست بر حسب تنش سه‌محوره برای فولاد St1۲ ۶۰
- شکل (۲۹-۴) - نقشه نمونه‌ی آزمایش یک شکاف‌دار (ابعاد بر حسب میلی متر) ۶۱
- شکل (۳۰-۴) - نمونه‌ی یک شکاف‌دار در دستگاه آزمایش ۶۲
- شکل (۳۱-۴) - منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌ی یک شکاف‌دار ۶۲
- شکل (۳۲-۴) - مدل المان محدود نمونه‌ی یک شکاف‌دار ۶۳
- شکل (۳۳-۴) - نتایج آزمایش کشش ساده برای نمونه‌ی یک شکاف‌دار (شبیه‌سازی - تجربی) ۶۴
- شکل (۳۴-۴) - نقشه‌ی نمونه‌ی آزمایش دو شکاف‌دار (ابعاد بر حسب میلی متر) ۶۴
- شکل (۳۵-۴) - نمونه‌ی ساخته شده آزمایش دو شکاف‌دار ۶۴
- شکل (۳۶-۴) - منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌ی دو شکاف‌دار ۶۵
- شکل (۳۷-۴) - نمونه دچار شکست شده‌ی دو شکاف‌دار ۶۵
- شکل (۳۸-۴) - مدل مش‌بندی نمونه‌ی دو شکاف‌دار ۶۶
- شکل (۳۹-۴) - مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی نمونه‌ی دو شکاف‌دار ۶۶

## فهرست جداول

شماره صفحه

عنوان

۳۹	جدول (۱-۴) - خواص مکانیکی فولاد St1۲
۴۸	جدول (۲-۴) - نتایج حاصل از آزمایش کشش نمونه‌های شیاردار
۵۲	جدول (۳-۴) - تنش سه محوره و کرنش شکست در المان میانی شکست نمونه‌ی انتقالی
۵۳	جدول (۴-۴) - تنش سه محوره و کرنش شکست در المان میانی شکست نمونه‌ی برشی
۵۶	جدول (۵-۴) - تنش سه محوره و کرنش شکست در المان میانی شکست نمونه‌ی پروانه‌ای
۵۷	جدول (۶-۴) - کرنش شکست و تنش سه‌محوره برای نمونه‌های مربوط به ناحیه تنش سه‌محوره‌ی زیاد
۵۸	جدول (۷-۴) - کرنش شکست و تنش سه‌محوره برای نمونه‌های مربوط به ناحیه تنش سه‌محوره‌ی کم

## فهرست علائم

علامت

عنوان

$\varepsilon^e$	کرنش الاستیک
$\varepsilon^p$	کرنش پلاستیک
$\delta S$	سطح مقطع المان حجمی نماینده
$\delta S_D$	سطح مقطع ریزحفره‌ها در المان حجمی نماینده
$D_{\bar{n}}$	پارامتر آسیب در جهت بردار نرمال
$\bar{n}$	بردار نرمال
$D$	پارامتر آسیب ایزوتروپیک
$\sigma$	تنش تک محوره
$F$	نیرو
$S$	سطح مقطع
$S_D$	سطح مقطع ریز ترک‌ها و حفره‌ها
$\tilde{\sigma}$	تنش موثر
$\sigma_{ij}$	تانسور تنش
$\tilde{\sigma}_{ij}$	تانسور تنش موثر
$E$	مدول الاستیسیته ماده‌ی بکر
$\tilde{E}$	مدول الاستیسیته ماده‌ی آسیب دیده
$v_L$	سرعت امواج طولی در ماده‌ی بکر
$v_{L,D}$	سرعت امواج طولی در ماده‌ی آسیب دیده
$\rho$	چگالی ماده‌ی بکر
$\rho_D$	چگالی ماده‌ی آسیب دیده
$\nu$	ضریب پواسون
$\bar{\varepsilon}$	کرنش معادل
$\bar{\varepsilon}_f$	کرنش معادل شکست
$\varepsilon_1$	کرنش اصلی اول
$\varepsilon_2$	کرنش اصلی دوم
$\varepsilon_3$	کرنش اصلی سوم
$\tau_{\max}$	تنش برشی ماکزیمم
$(\tau_{\max})_f$	تنش برشی ماکزیمم شکست
$\sigma_1$	تنش اصلی اول
$\sigma_2$	تنش اصلی دوم
$\sigma_3$	تنش اصلی سوم
$e_1$	کرنش مهندسی بزرگتر حد شکل‌دهی

$e_2$	کرنش مهندسی کوچکتر حد شکل دهی
$d_1$	قطر بزرگ بیضی حد شکل دهی
$d_2$	قطر کوچک بیضی حد شکل دهی
$d_0$	قطر دایره حد شکل دهی
$\varepsilon_1$	کرنش حقیقی بزرگتر حد شکل دهی
$\varepsilon_2$	کرنش حقیقی کوچکتر حد شکل دهی
$\varepsilon_{Major}^{FLD}$	کرنش اصلی حد شکل دهی
$\varepsilon_{minor}$	کرنش فرعی حد شکل دهی
$T$	دما
$\omega_{FLD}$	پارامتر حد شکل دهی
$\sigma_m$	تنش هیدروستاتیک
$\sigma_{eq}$	تنش معادل فون میزز
$\eta$	تنش سه محوره

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱ مقدمه

یکی از مهم‌ترین اهداف و چالش‌های مهندسين مکانیک، پیش‌بینی استحکام قطعات و سازه‌ها است. پیش‌بینی استحکام به مهندسين اجازه می‌دهد تا بدون از دست دادن ایمنی و قابلیت اطمینان، محصولاتشان را از لحاظ وزن، ماده، مصرف انرژی و غیره به صورت بهینه طراحی نمایند. همچنین در بسیاری از کاربردهای مهندسی به خصوص آنهایی که اجزای مکانیکی یا سازه‌ای در معرض شرایط سخت سرویس هستند، عمر مفید اجزا از جمله مواردی است که در پروسه طراحی باید مورد توجه قرار گیرد. در برخی از حالات، قابلیت طراح برای پیش‌بینی شکست مکانیکی عامل بسیار حیاتی است. در بعضی دیگر از موارد مانند ماشین‌های صنعتی، وقفه‌های ناخواسته برای تعمیرات و نگهداری ناشی از شکست‌های پیش‌بینی نشده ممکن است موجب پیامدهای اقتصادی بسیار جدی شود. علاوه بر این در کاربردهای امنیتی مثل صنایع هسته‌ای و فضایی، شکست‌های غیرمترقبه وقایع فاجعه انگیز همراه با ضررهای جانبی و اقتصادی قابل توجه‌ای از خود به جای می‌گذارد.

از گذشته تا کنون، پیش‌بینی عمر مفید یا شکست مواد بر اساس آزمایش‌های تجربی متداول و مرسوم بوده است. در برخی از موارد، پیش‌بینی شکست بر اساس آزمایش‌های روش‌مند بسیار دردسر ساز و پرهزینه است. اما امروزه با پیشرفت و توسعه سریع تکنیک‌های مکانیک محاسباتی، تعیین استحکام، عمر مفید و پیش‌بینی شکست بسیار سریع‌تر و ارزان‌تر تمام خواهد شد.

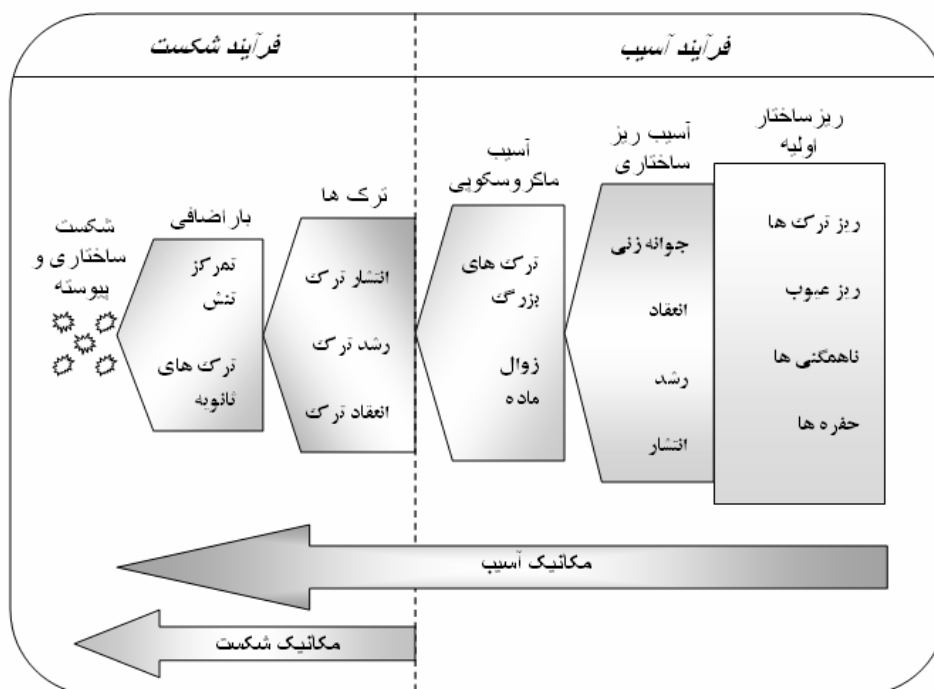
امروزه که استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به دلیل کاهش هزینه‌های مربوط به طراحی و ساخت رواج بسیار زیادی یافته است شرکت‌های سازنده‌ی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نیز سعی نموده‌اند که توانایی پیش‌بینی

شکست و پارگی را در نرم‌افزار تولیدی خود افزایش دهند. بنابراین در سال‌های اخیر استفاده از معیارهای شکست متفاوت در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی افزایش یافته تا به این وسیله خواسته‌ی کاربران این نرم‌افزارها تامین گردد.

یکی از متداول‌ترین و کارآمدترین مدل‌های شکست ارائه شده، مدل شکست نرم (Ductile fracture) ماده می باشد که مبتنی بر مفهوم آسیب نرم (Ductile damage) است و در اکثر فرآیندهای شکل‌دهی فلزات مشاهده می‌گردد. آسیب فرآیندی فیزیکی و پیش‌رونده است که در نهایت منجر به شکست ماده می‌گردد، بنابراین آسیب بخش غیرقابل مشاهده‌ی یک شکست می‌باشد و می‌توان گفت که شکست نرم در یک ماده در ادامه‌ی رشد آسیب نرم در اثر بارگذاری در آن ماده رخ می‌دهد [۱]. شکل ۱-۱ کاربرد حوزه‌ی مکانیک آسیب و مکانیک شکست و همچنین روند رشد آسیب و وقوع شکست در ماده را نشان می‌دهد.

مفهوم رشد آسیب نرم در دهه‌ی ۶۰ میلادی ارائه شد، سپس تحقیقاتی در زمینه‌ی این نوع آسیب صورت گرفت تا اینکه در سال‌های اخیر معیار آسیب نرم به عنوان یکی از معیارهای شکست در نرم‌افزارهای المان محدود معتبر قرار گرفت.

در معیار آسیب نرم، عامل موثر در رشد آسیب و شکست ماده کمیتی به نام تنش سه محوره (Stress triaxiality) در نظر گرفته می‌شود که از تقسیم تنش میانگین (Mean stress) وارد شده به ماده بر تنش معادل فن‌میز بدست می‌آید. در معیار آسیب نرم پارامتری به نام پارامتر آسیب تعریف شده که با در نظر گرفتن تنش سه محوره و کرنش ایجاد شده در ماده و آنچه که به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شده است محاسبه می‌گردد. با بررسی مقدار پارامتر آسیب محاسبه شده، ارزیابی کلی از امکان و یا عدم امکان شکست ماده در مسئله‌ی مدل‌سازی شده میسر می‌گردد.



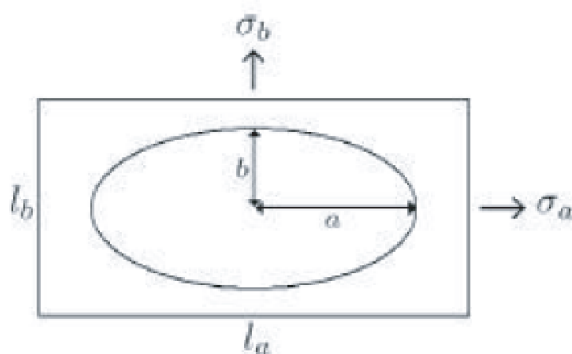
شکل ۱-۱ کاربرد حوزه‌های مکانیک آسیب و مکانیک شکست



آنچه که برای محاسبه‌ی پارامتر آسیب به عنوان ورودی باید به نرم‌افزار المان محدود داده شود اطلاعات مربوط به کرنش شکست ماده‌ی مورد نظر در تنش‌های سه محوره‌ی متفاوت می‌باشد. این اطلاعات باید به وسیله‌ی انجام آزمایش‌های خاص بر روی ماده مشخص شده و به نرم‌افزار وارد گردد. در این تحقیق معیار آسیب نرم در نرم‌افزار ABAQUS بررسی شده و اطلاعات مورد نیاز برای استفاده از این معیار در شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی برای فولاد St1۲ تعیین شده است.

## ۲-۱ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی آسیب نرم

مکانیک آسیب پیوسته (Continuum Damage Mechanics) ابزار جدیدی در مهندسی مکانیک است. اساس تئوری به کچانف [۲] (Kachanov) ۱۹۵۸ نسبت داده می‌شود. البته توسعه و استخراج مکانیک آسیب از سال ۱۹۸۰ و به خصوص تحت تاثیر مدرسه فرانسوی، شابوش (Chaboche) ۱۹۸۸ و لمتر (Lemaitre) [۳] ۱۹۹۶ انجام شده است. امروزه مکانیک آسیب به عنوان عضو بالغی از خانواده تئوری مکانیک پیوسته که متمم تئوری پلاستیسیته و مکانیک شکست است شناخته می‌شود. در سال ۱۹۶۸ مک کلینتوک [۴] (McClintock) رشد حفره‌های دایره‌ای را در شرایط کرنش صفحه‌ای مورد بررسی قرار داد. او فرض کرد که شکست در المان نشان داده شده در شکل ۱-۲ زمانی آغاز می‌شود که حفره به مرز المان برسد.



شکل ۱-۲ حفره و المان در نظر گرفته شده توسط مک کلینتوک [۴]

او کرنش شکست ماده را بر اساس طول المان در نظر گرفته شده و تنش‌های اعمال شده بر المان بی‌ان نمود. در سال ۱۹۶۹ رایس (Rice) و تریسی (Tracey) [۵] با مطالعه بر روی رشد حفره‌های کروی شکل نشان دادند که سرعت به هم پیوستن حفره‌ها در ماده و در نتیجه شکست ماده با افزایش تنش سه محوره افزایش می‌یابد.

هنکوک (Hancock) و مکنزی (Mackenzie) [۶] در سال ۱۹۷۶ نشان دادند که تنش سه محوره، که از تقسیم تنش میانگین به تنش فن‌میز حاصل می‌شود، برای نشان دادن حالت تنش وارد شده به ماده از پارامتر مناسب‌تر است. آن‌ها همچنین اثر تنش سه محوره بر کرنش شکست ماده را بررسی نموده و معادله را با سه ضریب ثابت، برای محاسبه‌ی کرنش شکست ماده بر حسب تنش سه محوره ارائه نمودند.

یکی از مهمترین مدل‌ها برای آسیب توسط گرسون [7] (Gurson) ۱۹۷۷ فرمول بندی شد. وی حفره‌های موجود در ماده را به صورت شبه کره فرض نمود و سپس تابع تسلیم در ماده نرم متخلخل را به صورت تابعی از آسیب در نظر گرفت. اولین روش تحلیلی در مقیاس ماکروسکوپی، مدل آسیب گرسون است.

مدل آسیب دیگر در سال ۱۹۸۵ توسط لمترا [۸] (Lemaitre) ارائه شد. این مدل اولین مدل آسیبی بود که بر مبنای یک متغیر حالت داخلی بنا شده بود و در سال‌های بعد توسط محققین گسترش یافت.

یکی از تحقیقات اصلی انجام شده بر روی شکست مواد نرم در سال ۱۹۸۵ توسط جانسون (Johanson) و کوک (Cook) [۸] انجام گردید. در تحقیقات انجام شده توسط این دو محقق، مهمترین عاملی که بر روی شکست مواد نرم اثر گذار است، تنش سه محوره معرفی شد. همچنین اثر نرخ کرنش و دما بر روی شکست مواد نرم بررسی گردید. جانسون و کوک یک رابطه برای در نظر گرفتن اثرات مربوط به کرنش، نرخ کرنش و دما روی رفتار ماده و نیز کرنش شکست ماده ارائه نمودند که امروزه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. آن‌ها همچنین در ادامه‌ی تحقیقات خود با انجام آزمایش‌هایی رابطه‌ی خود را برای چندین نوع فلز نرم کالیبره کرده و ضرایب ثابت معادله‌ی خود را برای این مواد بدست آوردند.

در ادامه‌ی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی آسیب نرم، محققان آزمایش‌های دیگری را برای تعیین ضرایب مجهول معادله انجام دادند. این آزمایش‌ها تا حد بسیار زیادی رفتار مواد در نرخ‌های کرنش بالا و دماهای بالا را مشخص کرد به طوری که در بعضی موارد مکانیزم‌هایی که توسط جانسون و کوک برای رفتار ماده در نظر گرفته نشده بود در معادلات بعدی لحاظ گردید و معادله‌ی جانسون-کوک در برخی موارد اصلاح شد.

تحقیقات گسترده‌ی دیگری در سال ۲۰۰۴ توسط هوپوترا (Hooputra) و همکارانش [۹] در گروه تحقیقاتی BMW بر روی شکست مواد نرم صورت گرفت. در این تحقیقات هدف دستیابی به یک مدل آسیب کامل بود که بتوان از آن در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی استفاده نمود. حاصل این پژوهش یک مدل آسیب برای فلزات نرم بود که امکان شبیه‌سازی شکست و پیش‌بینی مناطق ترک را فراهم می‌نمود. مدل ارائه شده توسط هوپوترا در نرم‌افزارهای المان محدود معتبر از جمله LS-Dyna و ABAQUS برای پیش‌بینی مناطق رشد آسیب مورد استفاده قرار گرفت. در مدل هوپوترا کرنش شکست ماده به عنوان تابعی از تنش سه محوره بدست می‌آید. در فصل سوم این مدل و نحوه‌ی استفاده از آن به طور کامل توضیح داده شده است.

در سال ۲۰۰۴ باؤ (Bao) و ویرزبکی (Wierzbicki) [۱۰] با انجام یک سری از آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های تخت و شیاردار وابستگی کرنش شکست ماده به تنش سه محوره را نشان داد و رابطه‌ای را برای این تابعیت ارائه نمود.

در آزمایش‌های انجام شده توسط این دو محقق کرنش شکست یک آلیاژ آلومینیوم در رنج گسترده‌ای از تنش سه محوره تعیین شد. آن‌ها همچنین با انجام آزمایش‌های فشاری بر روی این آلیاژ کرنش شکست آن را در تنش سه محوره‌ی منفی نیز تعیین نمودند.

در سال ۲۰۰۷ مطالعاتی توسط بای (Bai) [۱۱] بر روی رفتار نوعی آلیاژ آلومینیوم انجام شد در این تحقیقات آزمایش‌های کششی و فشاری زیادی بر روی ماده انجام گردید و یک مدل جدید برای رفتار الاستیک-پلاستیک این آلیاژ و رفتار شکست آن بر حسب نامتغیرهای (Invariants) تنش ارائه شد. بر طبق تحقیقات انجام گرفته توسط بای و همکارانش مشخص شد که هم معادلات ساختاری پلاستیک ماده و هم رفتار شکست آن تحت تاثیر نامتغیر سوم تنش می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی شکست نرم و رفتار ماده تحت مقادیر متفاوت تنش سه محوره توسط ویرزبیک و همکارانش در دانشگاه MIT (Massachusetts Institute of Technology) انجام شده است. در این تحقیقات با استفاده از نمونه‌های مختلف از ماده نقش عوامل موثر بر شکست ماده بررسی گردیده است [۱۴،۱۳،۱۲].

### ۱-۳ اقدامات انجام شده در این تحقیق

در این پایان‌نامه ابتدا با انجام آزمایش‌های لازم خواص مکانیکی و همچنین پارامترهای ورودی لازم برای اعمال معیار آسیب نرم بر روی فولاد St12 مشخص شده است. در ادامه جهت اطمینان از صحت نتایج بدست آمده آزمایش کشش بر روی نمونه‌های تک شکافه (Single notched) و دو شکافه (Double notched) انجام شد و نتایج حاصل از اعمال این معیار در پیش‌بینی محل شکست و زمان آن با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه گردیده است.

روند مطالب ارائه شده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

در فصل دوم مفهوم کلی آسیب و انواع آن توضیح داده شده و معیارهای پرکاربرد پیش‌بینی شکست معرفی گردیده است. همچنین اثرات آسیب و روش‌های اندازه‌گیری آن نیز توضیح داده شده است.

در فصل سوم آسیب نرم توضیح داده شده و مدل‌های ارائه شده جهت بررسی این نوع آسیب معرفی گردیده است. در این فصل مدل آسیب هوپوترا که مدل استفاده شده در این تحقیق است توضیح داده شده و پارامترهای ورودی لازم برای اعمال معیار آسیب نرم در یک شبیه‌سازی معرفی شده است.

در فصل چهارم ابتدا با انجام آزمایش کشش ساده برای نمونه استاندارد فولاد St12 خواص مکانیکی این فولاد بدست آمده و سپس با انجام آزمایش‌هایی پارامترهای مدل آسیب نرم هوپوترا بدست خواهد آمد. این پارامترها در دو قسمت مختلف و برای محدوده‌ی مختلف تنش سه محوره استخراج گردیده است. در ادامه این فصل مدل کالیبره شده‌ی آسیب نرم هوپوترا ارائه گردیده است. در پایان این فصل به اعتبارسنجی مدل کالیبره شده‌ی آسیب نرم هوپوترا پرداخته شده و با استفاده از اطلاعات بدست آمده، معیار آسیب نرم در شبیه‌سازی دو نمونه از فولاد St12 اعمال شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شده است.

در فصل پنجم و آخرین فصل این پایان‌نامه نتایج بدست آمده در قسمت‌های قبل مورد بررسی قرار گرفته است. و پیشنهاداتی برای ادامه‌ی تحقیق در زمینه‌ی آسیب نرم و پیش‌بینی شکست ارائه گردیده است.

## فصل دوم

### آسیب

#### ۱-۲ مقدمه

مقدار نیروی قابل تحمل اجزای مکانیکی و آستانه‌ی از هم گسیختگی آنها و همچنین میزان تنش‌ی که در یک فرایند تغییر شکل ماده می‌تواند تحمل نماید بدون آنکه شکست یا پارگی در آن رخ دهد یکی از چالش‌های همیشگی فراروی مهندسی مکانیک در زمینه‌ی طراحی جامدات و زمینه‌ی شکل‌دهی فلزات بوده است. استفاده از نرم افزارهای شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رفتار ماده در این زمینه اهمیت فراوانی دارد و می‌تواند با کاهش آزمایش‌های تجربی منجر به کاهش در زمان و هزینه‌های طراحی گردد. بنابراین مفهوم مکانیک آسیب برای بررسی نحوه‌ی شروع از هم گسیختگی ماده به کار گرفته شده است. مکانیک آسیب و مکانیک شکست دو شاخه از مکانیک جامدات هستند که مکمل یکدیگر بوده و هر کدام در مقیاسی جداگانه به بررسی رفتار ماده می‌پردازند. در این فصل ابتدا مفهوم آسیب از نظر مکانیکی ارائه خواهد شد و پس از آن انواع آسیب توضیح داده خواهد شد. سپس مفاهیم فیزیکی و مکانیکی آسیب نرم مانند پارامتر آسیب و مفهوم تنش موثر ارائه می‌گردد. در ادامه به معیارهایی که در نرم‌افزارهای معتبر المان محدود برای پیش‌بینی شکست مواد به کار رفته است اشاره شده است.

#### ۲-۲ آسیب

مکانیک آسیب زمینه‌ی تحقیقاتی جدیدی است که رفتار و پاسخ مواد تضعیف شده را بررسی می‌کند. تضعیف ماده، حاصل ترک‌های ریزی به شکل‌های نامنظم و جهات تصادفی است که به صورت اتفاقی در سراسر ماده پراکنده شده است.