

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

## تعهدنامه‌ی اصالت اثر و رعایت حقوق دانشگاه

تمامی حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج، ابتکارات، اختراعات و نوآوری‌های ناشی از انجام این پژوهش، متعلق به دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد. نقل مطلب از این اثر، با رعایت مقررات مربوطه و با ذکر نام دانشگاه محقق اردبیلی، نام استاد راهنما و دانشجو بلامانع است.

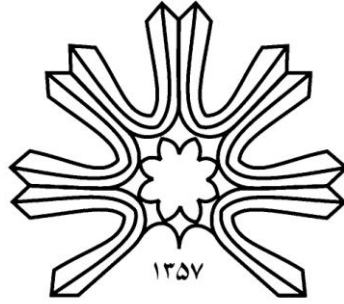
اینجانب **مریم اجری خامسلو** دانش‌آموخته‌ی مقطع کارشناسی ارشد رشته‌ی **مکانیک گرایش ساخت و تولید** دانشکده‌ی **فنی مهندسی** دانشگاه محقق اردبیلی به شماره‌ی دانشجویی **۹۰۴۴۶۵۳۱۰۹** که در تاریخ **۹۲/۶/۲۴** از پایان‌نامه‌ی تحصیلی خود تحت عنوان: **رفتار تغییرشکل‌های پیش‌رونده لوله‌های زانویی تحت فشار کربنی ساده تحت اثر ممان‌های مشابه اثرات زلزله دفاع نموده‌ام، متعهد می‌شوم که:**

- ۱) این پایان‌نامه را قبلاً برای دریافت هیچ‌گونه مدرک تحصیلی یا به‌عنوان هرگونه فعالیت پژوهشی در سایر دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشی و پژوهشی داخل و خارج از کشور ارائه ننموده‌ام.
- ۲) مسئولیت صحت و سقم تمامی مندرجات پایان‌نامه‌ی تحصیلی خود را بر عهده می‌گیرم.
- ۳) این پایان‌نامه، حاصل پژوهش انجام شده توسط اینجانب می‌باشد.
- ۴) در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران استفاده نموده‌ام، مطابق ضوابط و مقررات مربوطه و با رعایت اصل امانت‌داری علمی، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در متن و فهرست منابع و مأخذ ذکر نموده‌ام.
- ۵) چنانچه بعد از فراغت از تحصیل، قصد استفاده یا هرگونه بهره‌برداری اعم از نشر کتاب، ثبت اختراع و ... از این پایان‌نامه را داشته باشم، از حوزه‌ی معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی، مجوزهای لازم را اخذ نمایم.
- ۶) در صورت ارائه‌ی مقاله‌ی مستخرج از این پایان‌نامه در همایش‌ها، کنفرانس‌ها، سمینارها، گردهمایی‌ها و انواع مجلات، نام دانشگاه محقق اردبیلی را در کنار نام نویسندگان (دانشجو و اساتید راهنما و مشاور) ذکر نمایم.
- ۷) چنانچه در هر مقطع زمانی، خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشی از آن (منجمله ابطال مدرک تحصیلی، طرح شکایت توسط دانشگاه و ...) را می‌پذیرم و دانشگاه محقق اردبیلی را مجاز می‌دانم با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات مربوطه رفتار نماید.

نام و نام خانوادگی دانشجو: **مریم اجری خامسلو**

امضا

تاریخ



دانشگاه محقق اردبیلی

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

عنوان

رفتار تغییر شکل های پیش رونده لوله های زانویی تحت فشار کربنی

ساده تحت اثر ممان های مشابه اثرات زلزله

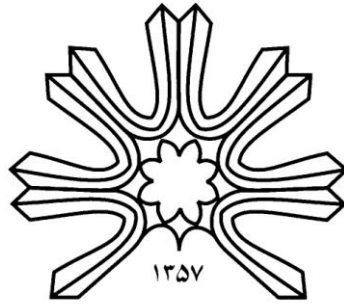
استاد راهنما

دکتر سید جاوید زکوی

پژوهشگر

مریم اجری خامسلو

تابستان ۹۲



دانشگاه محقق اردبیلی

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

عنوان

رفتار تغییر شکل های پیش رونده لوله های زانویی تحت فشار کربنی

ساده تحت اثر ممان های مشابه اثرات زلزله

پژوهشگر

مریم اجری خامسلو

ارزیابی و تصویب شده‌ی کمیته‌ی داوران پایان‌نامه با درجه‌ی .....

امضاء	سمت	مرتبه‌ی علمی	نام و نام خانوادگی
	استاد راهنما و رئیس کمیته‌ی داوران	استادیار	دکتر سید جاوید زکوی
	داور	استادیار دانشیار	دکتر ابراهیم عبدی اقدم دکتر مصطفی رحیمی

تابستان ۹۲

تقدیم ہے

روح پاک سرشت پرووستان زحمکش ماد

سپاس و قدردانی فراوان از همراهی و راهنمایی های ارزنده اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر سید جاوید زکوی

نام خانوادگی: اجری خامسلو	نام: مریم
عنوان پایان نامه: رفتار تغییرشکل های پیش رونده لوله های زانویی تحت فشار فولاد کربنی ساده تحت اثر ممان های مشابه اثرات زلزله	
استاد راهنما: دکتر سید جاوید زکوی استاد مشاور:	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی مکانیک گرایش: ساخت و تولید دانشگاه: محقق اردبیلی
تاریخ فارغ التحصیلی: ۹۲/۶/۲۴	تعداد صفحه: ۶۳
<p><b>چکیده:</b></p> <p>در این پایان نامه، با استفاده از مدل سخت شوندگی سینماتیکی غیرخطی رفتار تغییرشکل های پیش رونده در لوله های زانویی تحت فشار و تحت اثر ممان های تناوبی مشابه اثرات زلزله از جنس فولاد Carbon steel مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل عددی با استفاده از کد کامپیوتری ABAQUS انجام گرفته و داده های تنش- کرنش و پارامترهای ماده و ضرایب مدل سختی با استفاده از سیکل های پایدار شده نمونه های تحت آزمون کرنش متقارن به دست آمده است. مقایسه نتایج در دو حالت تجربی و عددی نشان می دهد که با افزایش تنش میانگین و بالا رفتن دامنه تنش، میزان کرنش های پیش رونده بیشتر می شود. در ابتدای بارگذاری ها نرخ کرنش های پیش رونده بیشتر بوده و با افزایش تعداد سیکل ها نرخ کرنش های پیش رونده کاهش پیدا می کند. با افزایش میزان بارگذاری ها نرخ تغییرشکل های پیش رونده افزایش می یابد. به صورتی که طبق نتایج به دست آمده حداکثر میزان کرنش های پیش رونده در قسمت پهلویی زانویی مشاهده شده است. در روش عددی نرخ تغییرشکل های پیش رونده در نسبت ممان های دینامیکی کم، توافق خوبی با نتایج تجربی دارد، ولی در نسبت ممان های دینامیکی بالا بیشتر از حالت تجربی می باشند.</p>	
کلید واژه ها: فولاد کربنی ساده، کرنش پیش رونده، لوله زانویی، مدل سخت شوندگی، ممان دینامیکی	

# فهرست مطالب

شماره و عنوان مطالب

صفحه

## فصل اول: مفاهیم اساسی

- ۱-۱- مقدمه ..... ۱
- ۲-۱- پدیده تغییر شکل های پیش‌رونده ..... ۲
- ۳-۱- الاستیک شیک دان ..... ۲
- ۴-۱- پلاستیک شیک دان ..... ۳

## فصل دوم: پیشینه تحقیق

- ۱-۲- مقدمه ..... ۴
- ۲-۲- مروری بر مطالعات گذشته ..... ۵
- ۱-۲-۲- تحقیقات تسنیم و اسلتیوس ..... ۵
- ۲-۲-۲- تحقیقات باری و تسنیم ..... ۷
- ۳-۲-۲- تحقیقات موروتن ..... ۷
- ۴-۲-۲- تحقیقات یوشیدا ..... ۸
- ۵-۲-۲- تحقیقات چن و همکارانش ..... ۸
- ۶-۲-۲- تحقیقات جیائو و چن ..... ۹
- ۷-۲-۲- تحقیقات کنگ و همکارانش ..... ۹

## فصل سوم: قوانین سختی

- ۱-۳- معادلات ارتجاعی ..... ۱۰
- ۲-۳- توابع ارتجاعی کرنش ..... ۱۲



- ۳-۳- معیارهای تسلیم و رفتار تنش- کرنش مواد ..... ۱۳
- ۳-۳-۱- معیار ترسکا ..... ۳۱
- ۳-۳-۲- معیار ون میسز ..... ۱۴
- ۳-۳-۳- مدل های رفتاری تنش- کرنش مواد ..... ۱۶
- ۳-۴- قانون جریان ..... ۷۱
- ۳-۵- قانون سخت شوندگی ..... ۹۱
- ۳-۵-۱- سخت شوندگی ایزوتروپیک ناشی از کرنش پلاستیک ..... ۲۰
- ۳-۵-۲- سخت شوندگی ایزوتروپیک ناشی از کار ..... ۲۰
- ۳-۵-۳- سخت شوندگی سینماتیک ..... ۲۱
- ۳-۵-۴- سخت شوندگی ترکیبی ..... ۲۱
- ۳-۵-۵- پلاستیسیته با سخت شوندگی ایزوتروپیک در فضای انحرافی ..... ۲۲
- ۳-۶- مدل های شکل پذیری ..... ۳۲
- ۳-۶-۱- مدل های سخت شونده کوپل شده ..... ۲۴
- ۳-۶-۱-۱- مدل سخت شوندگی خطی ..... ۲۵
- ۳-۶-۱-۲- مدل سخت شوندگی غیرخطی ..... ۲۶
- ۳-۶-۱-۳- مدل شابوشی ..... ۷۲
- ۳-۶-۱-۴- مدل اهنو و ونگ ..... ۷۲
- ۳-۶-۱-۵- مدل باری و حسن ..... ۸۲
- ۳-۶-۱-۶- مدل چن و همکارانش ..... ۹۲
- ۳-۶-۱-۷- مدل عبدالکریم و اهنو ..... ۲۹

### فصل چهارم: مواد و روش آزمون

- ۴-۱- مقدمه ..... ۰۳
- ۴-۲- بیان آزمایش های تجربی ..... ۰۳

۶۳.....	۳-۴ مقدار فشار داخلی.....
۷۳.....	۴-۴ نرمالیزه کردن ممان دینامیکی.....
۸۳.....	۵-۴ روش المان محدود.....
۸۳.....	۶-۴ معرفی نرم افزار ABAQUS.....
۳۹.....	۷-۴ المان استفاده شده در تحلیل مدل.....
۳۹.....	۸-۴ مدل سازی نمونه های تحت آزمون و مراحل عملیات در نرم افزار ABAQUS.....
۴۱.....	۹-۴ آزمون های سیکلیک برای ایجاد سیکل های پایدار.....
۴۲.....	۱۰-۴ به دست آوردن ضرایب سخت شوندگی نمونه های تحت آزمون.....
۴۲.....	۱۱-۴ روش های به دست آوردن ثوابت سخت شوندگی.....
۴۲.....	۱-۱۱-۴ استفاده از نیم سیکل آزمون یک بعدی کشش و یا فشار.....
۴۳.....	۲-۱۱-۴ استفاده از یک سیکل پایدار آزمون یک بعدی کشش و فشار.....
۴۴.....	۳-۱۱-۴ استفاده از چندین سیکل پایدار آزمون یک بعدی کشش و فشار.....
۴۴.....	۱۲-۴ تعیین ضرایب ثابت ماده با استفاده از روش سیکل پایدار.....

### فصل پنجم: نتیجه گیری و بحث در نتایج

۵۰.....	۱-۵ مقدمه.....
۵۱.....	۲-۵ بررسی نتایج تجربی و عددی.....
۶۰.....	۳-۵ نتیجه گیری.....
۶۱.....	۴-۵ پیشنهادات.....
۶۲.....	منابع و مآخذ.....

# فهرست جدول ها

شماره و عنوان جدول	صفحه
جدول ۴-۱: ابعاد زانویی‌های تحت آزمون .....	۳۳
جدول ۴-۲: جزئیات شرایط بارگذاری در آزمون های تجربی .....	۳۳
جدول ۴-۳: حداقل و حداکثر تنش تسلیم و نهایی برای لوله زانویی .....	۳۴
جدول ۴-۴: نتایج به دست آمده از کلیه آزمون های حاصل از کشش ساده .....	۳۴
جدول ۴-۵: میانگین تنش نهایی و تنش حد الاستیک .....	۳۵
جدول ۴-۶: ابعاد مقطع مدل سازی شده با توجه به آزمون های تجربی .....	۴۰
جدول ۵-۱: داده های مربوط به نمونه های تحت آزمون .....	۵۱
جدول ۵-۲: نتایج حاصل نمونه های تحت آزمون CLSI .....	۵۸
جدول ۵-۳: نتایج حاصل نمونه های تحت آزمون CLXI .....	۵۸
جدول ۵-۴: نتایج حاصل نمونه های تحت آزمون CSSI .....	۵۹
جدول ۵-۵: نتایج حاصل نمونه های تحت آزمون CSXI .....	۵۹
جدول ۵-۶: نسبت $M/M_L$ لازم برای شروع کرنش‌های پیش‌رونده محیطی .....	۶۰

# فهرست شکل ها

## شماره و عنوان شکل

## صفحه

- شکل ۱-۱: نمایش مرز بین رفتار الاستیک شیک‌دان، پلاستیک شیک‌دان، و تغییرشکل پیش رونده..... ۳
- شکل ۱-۳: نمایی از معیار تسلیم دو بعدی ترسکا ..... ۱۴
- شکل ۲-۳: نمایی از معیار تسلیم دو بعدی ون میسز در حالت دو بعدی ..... ۱۵
- شکل ۳-۳: نمایی از معیار تسلیم ترسکا و ون میسز در فضای سه بعدی ..... ۱۵
- شکل ۴-۳: نمایش هندسی سطح تسلیم و معیارهای بارگذاری و باربرداری ..... ۱۶
- شکل ۵-۳: نمایش رفتار تنش- کرنش مواد بعد تسلیم ..... ۱۷
- شکل ۶-۳: نمودار تنش-کرنش الاستیک- پلاستیک کامل مواد ..... ۱۷
- شکل ۷-۳: نمایی از جریان پلاستیک حاصله از معیار تسلیم ون میسز ..... ۱۸
- شکل ۸-۳: نمایی از سخت شوندگی سینماتیک ..... ۱۹
- شکل ۹-۳: نمایی از سخت شوندگی ایزوتروپیک ..... ۱۹
- شکل ۱۰-۳: نمایش سخت شوندگی سینماتیک تک محوره ..... ۲۱
- شکل ۱۱-۳: نمایش سخت شوندگی ترکیبی در صفحه انحرافی ..... ۲۱
- شکل ۱۲-۳: رابطه تنش-کرنش تک محوره در مدل سخت شوندگی پراگر ..... ۲۶
- شکل ۱-۴: دستگاه انجام آزمون تجربی لوله زانویی در شرایط خمش صفحه ای ..... ۳۲
- شکل ۲-۴: مشخصات و هندسه زانویی تحت آزمون ..... ۳۲
- شکل ۳-۴: محل نصب اکستنسیومترها بر روی زانویی های تحت آزمون ..... ۳۲
- شکل ۴-۴: نمونه ای از نتایج به دست آمده از آزمون کشش ساده ..... ۳۴
- شکل ۵-۴: نمودار تنش-کرنش ..... ۳۶
- شکل ۶-۴: مقاطع مدل سازی شده برای همه نمونه ها با توجه به آزمون های تجربی ..... ۳۹
- شکل ۷-۴: دستگاه Santam 150 ..... ۴۱

- شکل ۴-۸: نمونه ای از سیکل های پایدار شده..... ۴۱.....
- شکل ۴-۹: نیم سیکل آزمون کشش..... ۴۲.....
- شکل ۴-۱۰: منحنی تنش- کرنش برای یک سیکل پایدار..... ۴۳.....
- شکل ۴-۱۱: چهار نمونه تحت آزمون جهت استخراج ثوابت ماده با دامنه کرنش کنترل شده..... ۴۵.....
- شکل ۴-۱۲: فیکسچر ساخته شده برای جلوگیری از لیز خوردن نمونه های تحت آزمون..... ۴۶.....
- شکل ۴-۱۳: نمونه ای از نتایج پایدار شده حلقه های تنش-کرنش (با کنترل کرنش متقارن)..... ۴۶.....
- شکل ۴-۱۴: ممان به دست آمده از روش عددی برای ممان (N.m) ۳۶۷۹/۷۷ از نمونه های CLSI..... ۴۸.....
- شکل ۴-۱۵: ممان به دست آمده از روش عددی برای ممان (N.m) ۵۹۹۸/۱۲ از نمونه های CLXI..... ۴۸.....
- شکل ۴-۱۶: ممان به دست آمده از روش عددی برای ممان (N.m) ۴۴۳۹/۱۱ از نمونه های CSSI..... ۴۸.....
- شکل ۴-۱۷: ممان به دست آمده از روش عددی برای ممان (N.m) ۵۷۲۰/۲۵ از نمونه های CSXI..... ۴۹.....
- شکل ۵-۱: کرنش های پیش رونده به دست آمده از نتایج تجربی بر حسب گشتاور..... ۵۲.....
- شکل ۵-۲: کرنش های پیش رونده به دست آمده از روش عددی بر حسب گشتاور..... ۵۲.....
- شکل ۵-۳: کرنش های پیش رونده به دست آمده از نتایج تجربی بر حسب  $M/M_L$ ..... ۵۳.....
- شکل ۵-۴: کرنش های پیش رونده به دست آمده از روش عددی بر حسب  $M/M_L$ ..... ۵۳.....
- شکل ۵-۵: کرنش های پیش رونده به دست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه CLSI..... ۵۴.....
- شکل ۵-۶: کرنش های پیش رونده به دست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه CLXI..... ۵۴.....
- شکل ۵-۷: کرنش های پیش رونده به دست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه CSSI..... ۵۵.....
- شکل ۵-۸: کرنش های پیش رونده به دست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه CSXI..... ۵۵.....
- شکل ۵-۹: کرنش های پیش رونده تحت ممان (N.m) ۵۳۱۳/۰۲ در نمونه های CLSI بر حسب زمان..... ۵۶.....
- شکل ۵-۱۰: کرنش های پیش رونده تحت ممان (N.m) ۵۹۹۸/۱۲ در نمونه های CLXI بر حسب زمان..... ۵۶.....
- شکل ۵-۱۱: کرنش های پیش رونده تحت ممان (N.m) ۴۵۰۸/۳۴ در نمونه های CSSI بر حسب زمان..... ۵۷.....
- شکل ۵-۱۲: کرنش های پیش رونده تحت ممان (N.m) ۶۱۴۰/۱۵ در نمونه های CSXI بر حسب زمان..... ۵۷.....

# فهرست علائم اختصاری

علامت اختصاری	مفهوم یا توضیح
$\sigma_{mean}$	تنش میانی
$\sigma_a$	دامنه تنش
$\sigma_y$	تنش تسلیم
$\sigma_m$	تنش متوسط
$\sigma_e$	تنش معادل
$\sigma_0$	تنش تسلیم کشش ساده
$S_{ij}$	تانسور با اثر تنش
$e_{ij}$	تانسور با اثر کرنش
$\varepsilon_m$	کرنش متوسط
$\varepsilon$	کرنش کل
$\varepsilon_{ps}$	کرنش پلاستیک
$\varepsilon^p$	تانسور کرنش پلاستیک
$E$	مدول الاستیک
$G$	مدول ارتجاعی برشی
$T$	دما

$v$	ضریب پواسون
$\rho$	چگالی جرمی
$u_d$	انرژی برشی
$\lambda$	نرخ کرنش پلاستیک
$W_P$	کار پلاستیک
$a$	مرکز سطح تسلیم در فضای انحرافی
$\alpha$	مرکز سطح تسلیم در فضای اصلی
$t$	ضخامت
$C$	ثابت سخت شوندگی ماده در مدل سینماتیکی
$\gamma$	ضریب مشخصه مواد در مدل سینماتیکی
$D_0$	قطر خارجی لوله
$D_i$	قطر داخلی لوله
$\Delta \varepsilon^P$	محدوده کرنش پلاستیک
$\Delta \varepsilon_i^P$	محدوده کرنش پلاستیک طولی
$M_L$	حداقل ممان دینامیکی
$\lambda$	ضریب لامه
$M_{ye}$	ممان تسلیم اولیه زانویی
$M_{yp}$	ممان تسلیم صفحه ای لوله

## فصل اول

# مفاهیم اساسی

### ۱-۱ مقدمه

انواع بسیار مختلفی از سازه‌ها وجود دارد که تحت بارگذاری سیکلی، حالت تنش آنها از حد الاستیک مواد، تجاوز می‌کند. برای طراحی و تحلیل چنین سازه‌هایی پیش‌بینی دقیق پاسخ رفتار تغییرشکل‌های پیش‌رونده امری ضروری است، چنان‌که پدیده تغییرشکل‌های پیش‌رونده می‌تواند منجر به خرابی ناگهانی سازه‌ها شود. حتی برای سازه‌هایی که برای کارکرد در محدوده الاستیک طراحی شده‌اند، ناحیه‌های پلاستیک ممکن است در ناپیوستگی‌ها و یا در نوک ترک‌ها ایجاد شود. ترک‌های خستگی می‌توانند در چنین نواحی پلاستیک ایجاد شوند و منجر به خرابی قطعه گردند. به دلیل اینکه اغلب سازه‌های مورد استفاده در خطوط انتقال نفت، گاز و مواد رادیواکتیوی به صورت سازه‌هایی لوله‌ای شکل و با فشار داخلی معمولاً ثابت هستند، بنابراین شناسایی رفتار سینماتیکی غیرخطی موادی که در ساخت این گونه سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسیار حائز اهمیت است. با توجه به گسترش روزافزون استفاده از سازه‌های انتقال سیال ضرورت برای بررسی رفتار تغییرشکل‌های پیش‌رونده کاملاً آشکار است، به صورتی که با به وجود آمدن مشکلی در این خطوط خسارات و



زیان های جبران ناپذیری ایجاد خواهد شد. بنابراین شناسایی رفتار ماده در بارگذاری های سیکلی نکته مهمی است که باید در طراحی و ساخت لوله های تحت فشار مورد توجه قرار گیرد.

بارگذاری بر روی سازه ها به دو قسمت بارگذاری یکنواخت<sup>۱</sup> و سیکلی<sup>۲</sup> تقسیم می شود. اساس کار بارگذاری یکنواخت به این صورت است که در آن بار وارده بر روی سازه به صورت تدریجی افزایش یافته و بار از روی سازه برداشته نمی شود. در بارگذاری سیکلی بارگذاری و باربرداری بر روی سازه اعمال و این عمل مرتباً تکرار می شود. تاثیر بارگذاری های سیکلی بر روی سازه ها منجر به رفتار شیک دان و یا پدیده تغییرشکل های پیش رونده می گردد. داشتن اطلاعات کاملی از محدوده شیک دان جهت جلوگیری از پدیده تغییرشکل های پیش رونده، امری بسیار مهم می باشد.

## ۱-۲ پدیده تغییرشکل های پیش رونده

اگر در نقطه ای از یک جسم که تحت بارهای سیکلیک قرار گرفته است تنش ها به اندازه ای باشند که باعث تسلیم ماده شود، بسته به اندازه تنش های حداکثر و حداقل (یا مقادیر متوسط و دامنه تنش ها) کرنش های پلاستیک ایجاد شده و به تدریج با افزایش تعداد سیکل های بار ممکن است تا فروپاشی جسم افزایش یابند. این وضعیت به نام فروپاشی افزایشی<sup>۳</sup> یا تغییرشکل های پیش رونده نامیده می شود (Tasnim & Stelios, 1992; Kang et al, 2002; Kulkarni et al, 2003).

## ۱-۳ الاستیک شیک دان

در این حالت جسم در نقطه الاستیک قرار گرفته است. بنابراین کرنش پلاستیک صفر می باشد. در این حالت کرنش ها هرگز رشد نمی کنند. این وضعیت را الاستیک شیک دان<sup>۴</sup> می نامند (Tasnim & Stelios, 1992; Johnson & Jefferis, 1963; Ponter et al, 1985).

<sup>۱</sup> Monotonic loading

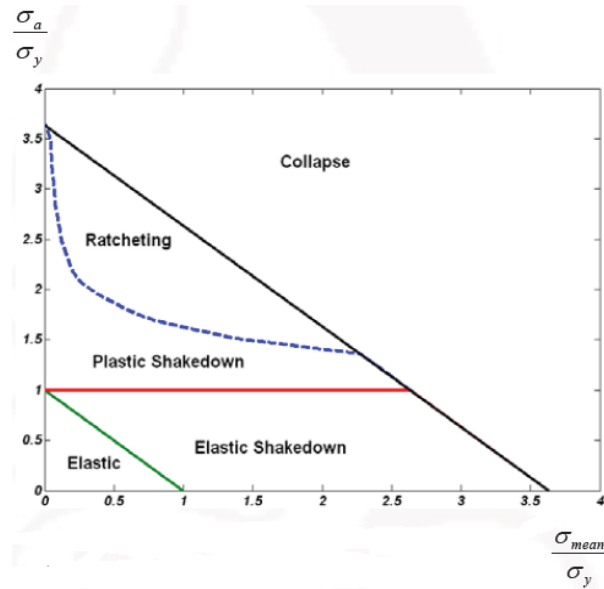
<sup>۲</sup> Cyclic loading

<sup>۳</sup> Ratchetting

<sup>۴</sup> Elastically shakedown

## ۴-۱ پلاستیک شیک دان

در این حالت پس از آنکه جریان پلاستیک رخ داد، پس از چند سیکل  $\Delta \varepsilon^p$  صفر گشته و در حقیقت در یک سیکل میزان کرنش پلاستیک افزوده شده با میزان کرنش کاهش یافته، خنثی می‌شود. در این حالت، مجموع کرنش‌ها ثابت می‌ماند. این وضعیت را پلاستیسیتیته متناوب یا پلاستیک شیک دان<sup>۱</sup> می‌نامند (Tasnim & Stelios, 1992; Johnson & Jefferis, 1963; Ponter et al, 1985).



شکل ۱-۱ نمایش مرز بین رفتار الاستیک، الاستیک شیک دان، پلاستیک شیک دان و تغییرشکل پیش رونده  
(Reference: Johnson & Jefferis, 1963:55)

<sup>۱</sup> Plastic shakedown

## فصل دوم

# پیشینه تحقیق

### ۱-۲ مقدمه

حل مسائل پلاستیسیته در علم مکانیک یکی از چالش های مهم در مکانیک جامدات پیش از سال ۱۹۴۰ بوده است. این علم در مواردی مثل تولید قطعات فلزی از طریق شکل دادن آن ها مثل کشش عمیق، اکستروژن، آهنگری، خمش قطعات و کاربرد زیادی دارد. حل مسایلی که در آن قطعه و یا سازه در اثر بارگذاری از ناحیه الاستیک عبور کرده و به حالت خمیری در می آید، به خاطر ماهیت غیرخطی امری پیچیده می باشد. بررسی این امر در صنایع شیمیایی و هوافضا که تحت اثر بارگذاری سیکلیک بوده حائز اهمیت می باشد. برای حل مسائل پلاستیسیته، معمولاً از آنالیز ریاضی و یا آنالیزهای عددی همچون FEM و FDM استفاده می گردد. البته آنالیز ریاضی اغلب در مسایلی که مرز قطعه منظم بوده و رفتار ماده الاستیک-پلاستیک کامل فرض شده، مورد استفاده قرار می گیرد. برای مرزهای پیچیده و بررسی رفتار واقعی مواد عمدتاً از روش های عددی استفاده می شود.

در چند دهه اخیر، توسعه روش های عددی و کامپیوترهای پیشرفته، زمینه مناسب برای تحلیل عددی فراهم ساخته است از این رو استفاده از روش اجزا محدود ابزار مهمی برای محققان و مهندسان

فراهم نموده است. پیشرفت های اخیر در سخت افزارهای محاسباتی، حل مسائل غیرخطی را ممکن ساخته است. بسیاری از مواد کاربردی نظیر فلزات، در تنش های زیاد، رفتار فرا الاستیک از خود نشان می دهند. غیرارتجاعی بودن این مواد به این معنی است که هنگامی که جسم از تنش آزاد می شود، به حالت اولیه خود باز نمی گردد و تغییرشکل های دائمی در آن دیده می شود. مدل ها و نظریه های رفتاری متفاوتی مانند پلاستیسیته، ویسکوپلاستیسیته و غیره به طور معمول برای در نظر گرفتن بارگذاری ها مورد استفاده قرار می گیرند.

ادموند و بیر<sup>۱</sup> (۱۹۶۱) برای اولین بار با لحاظ کرنش های تکراری معکوس شونده، کرنش پیش رونده پلاستیک محدودی را مشاهده کردند. آن ها با استفاده از نظریه ترسکا و با صرف نظر نمودن از پارامترهای سخت شوندگی و اثر بوشینگر، به این نتیجه رسیدند که اگر تنش ها مقدار مناسبی داشته باشند در نتیجه این امکان پیش می آید که برای هر سیکل بارگذاری، یک افزایش غیرقابل برگشت در تغییرشکل ایجاد می شود که سیکل به سیکل این تغییرشکل بیشتر می شود.

پدیده تغییرشکل های پیش رونده در لوله های جدار ضخیم تحت فشار داخلی و خمش تکراری معکوس شونده توسط بنی<sup>۲</sup> (۱۹۶۸) بررسی شده است. بر اساس این نظریه، پدیده تغییرشکل های پیش رونده در این لوله ها زمانی رخ می دهد که سازه تحت بارگذاری سیکلی و فشار استاتیک بوده و در نیم سیکل اول یک طرف لوله در محدوده پلاستیک و طرف دیگر در محدوده الاستیک باشد.

## ۲-۲ مروری بر مطالعات گذشته

در ادامه به مطالعات بر روی پدیده تغییرشکل های پیش رونده توسط چند تن از محققان می پردازیم.

### ۱-۲-۲ تحقیقات تسنیم و استلیوس

کرنش های پیش رونده روی فولاد معمولی در حالت تک محوره و چند محوره توسط تسنیم و استلیوس<sup>۳</sup> (۱۹۹۲) مورد بررسی قرار گرفت و در دو قسمت ارائه شد.

<sup>۱</sup> Edmund & Beer

<sup>۲</sup> Beaney

<sup>۳</sup> Tasnim & Stelios