بسم اللہ الرحمن الرحیم

تعهدنامه‌ی اصالت اثر و رعایت حقوق‌دانشگاه

تمامي حقوق مادّي و معنوي مترتب برنتايج، ابتكارات، اختراعات و نوآوري‌هاي ناشي از انجام اين پژوهش، متعلق به **دانشگاه محقق اردبيلي** مي‌باشد. نقل مطلب از اين اثر، با رعايت مقرّرات مربوطه و با ذكر نام دانشگاه محقق

اينجانب **وحيد رحمانی** دانش‌آموخته‌ي مقطع كارشناسي ارشد رشته‌ي **مكانيک** گرايش **ساخت و توليد** دانشكده **فني مهندسي** دانشگاه محقق اردبيلي به شماره‌ي دانشجويي **۹۰۴۴۶۰۳۱۰۵** كه در تاريخ **۹۲/۱۰/۲۵** از پايان‌نامه ي تحصيلي خود تحت عنوان: **مطالعه نرخ کرنش‌های جمع شونده در لوله‌های سه راهی تحت فشار از جنس فولاد ضد زنگ تحت اثر بار گذاری‌های سیکلیک** دفاع نموده‌ام، متعهد مي‌شوم كه:

۱) اين پايان‌نامه را قبلاً براي دريافت هيچ‌گونه مدرك تحصيلي يا به عنوان هرگونه فعاليت پژوهشي در ساير دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشي و پژوهشي داخل و خارج از كشور ارائه ننموده‌ام.
۲) مسئوليت صحّت و سقم تمامي مندرجات پايان‌نامه‌ي تحصيلي خود را برعهده مي‌گيرم.
۳) اين پايان‌نامه، حاصل پژوهش انجام شده توسط اينجانب مي‌باشد.
٤) در مواردي كه از دستاوردهاي علمي و پژوهشي ديگران استفاده نموده‌ام، مطابق ضوابط و مقرّرات مربوطه و با رعايت اصل امانت‌داري علمي، نام منبع مورد استفاده و ساير مشخصات آن را در متن و فهرست منابع و مآخذ ذكر نموده‌ام.
٥) چنانچه بعد از فراغت از تحصيل، قصد استفاده يا هر گونه بهره‌برداري اعم از نشر كتاب، ثبت اختراع و... از اين پايان‌نامه را داشته باشم، از حوزه‌ي معاونت پژوهشي و فنّاوري دانشگاه محقق اردبيلي، مجوزهاي لازم را اخذ نمايم.
٦) در صورت ارائه‌ي مقاله‌ي مستخرج از اين پايان‌نامه در همايش‌ها، كنفرانس‌ها، سمينارها، گردهمايي‌ها و انواع مجلات، نام دانشگاه محقق اردبيلي را در كنار نام نويسندگان (دانشجو و اساتيد راهنما و مشاور) ذكر نمايم.
۷) چنانچه در هر مقطع زماني، خلاف موارد فوق ثابت شود،

دانشگاه محقق اردبیلی

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-ساخت و تولید

عنوان

مطالعه نرخ کرنش‌های جمع شونده در لوله‌های سه راهی تحت فشار از جنس فولاد ضدزنگ تحت اثر بارگذاری‌های سیکلیک

استاد راهنما

دکتر سید جاوید زکوی

پژوهشگر

وحیدرحمانی

زمستان ۹۲

دانشگاه محقق اردبیلی

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-ساخت و تولید

عنوان

مطالعه نرخ کرنش‌های جمع شونده در لوله‌های سه راهی تحت فشار از جنس فولاد ضدزنگ تحت اثر بارگذاری‌های سیکلیک

پژوهشگر

وحید رحمانی

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

نام و نام خانوادگی	مرتبه‌ی علمی	سمت	امضاء
دکتر سید جاوید زکوی	استادیار	استاد راهنما و رییس کمیته‌ی داوران	
دکتر ابراهیم عبدی اقدم دکتر رضا پیل افکن	استادیار	داور	

زمستان ۹۲

تقدیم به

پدر و مادر مهربان و عزیزم که با نهایت عشق و دلبستگی زمینه های رشد و تعالی مرا فراهم نموده اند و به نوید برادر گرامی و دلبندم که بسیار دوستش می دارم.

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

نام خانوادگی: رحمانی **نام:** وحید

عنوان پایان‌نامه: مطالعه نرخ کرنش‌های جمع شونده در لوله‌های سه راهی تحت فشار از جنس فولاد ضدزنگ تحت اثر بارگذاری-های سیکلیک

استاد راهنما: دکتر سید جاوید زکوی

استاد مشاور:

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** ساخت و تولید **دانشگاه:** محقق اردبیلی

دانشکده: فنی و مهندسی **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** ۹۲/۸/۲۵ **تعداد صفحه:** ۸۲

کلید واژه‌ها: سه راهی، فولاد ضد زنگ، کرنش پیش رونده، مدل سخت شوندگی، ممان دینامیکی

چکیده:

در این تحقیق، رفتار تغییرشکل‌های پیش رونده در یک لوله سه راهی از جنس فولاد ضدزنگ SS304 تحت فشار داخلی و ممان های دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل سخت شوندگی سینماتیکی غیرخطی برای بررسی رفتار پلاستیک لوله سه راهی بکار برده شده است. پارامترهای ثابت مدل سخت شوندگی از روی سیکل‌های پایدار شده منحنی های تنش-کرنش تحت کنترل کرنش های مختلف بدست آمده اند. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر مقدار کرنش پیش رونده در محل اتصال سه راهی و تحت زاویه صفر درجه اتفاق می‌افتد. نرخ کرنش‌های پیش رونده با افزایش مقدار گشتاورها و مقدار فشار داخلی لوله، افزایش می-یابند. نتایج نشان می‌دهد که نرخ رشد اولیه کرنش پیش رونده زیاد بوده و با افزایش تعداد سیکل‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. نرخ تغییرشکل‌های پیش رونده با افزایش سطح بارگذاری خمشی در فشار داخلی ثابت افزایش می‌یابدکه نتایج عددی نیز همین مورد را به وضوح نشان می‌دهد. نرخ تغییرشکل‌های پیش‌رونده پیش بینی شده توسط روش عددی در محدوده ممان‌های دینامیکی توافق خوب و قابل توجهی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد، در ممانهای دینامیکی بالا $\frac{M}{M_l} > 1$ اختلاف در نتایج تجربی و عددی بیشتر دیده می‌شود.

فهرست مطالب

شماره و عنوان مطالب صفحه

فصل اول: مفاهیم اساسی

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ محدوده الاستیک، پلاستیک شیک‌دان و کرنش‌های پیش رونده ۳

۱-۳ عکس العمل لوله‌های سه راهی تحت فشار در بارگذاری سیکلیک ۵

۱-۴ پدیده تغییرشکل‌های پیش‌رونده مکانیکی ۶

فصل دوم: پیشینه تحقیق

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ مروری برمطالعات گذشته ۸

۲-۲-۱ تحقیقات جیانکاهو و وناه لی ۸

۲-۲-۲ تحقیقات وید مارک و همکارانش ۹

۲-۲-۳ تحقیقات گوان ژنگ کوگ و همکارانش ۹

۲-۲-۴ تحقیقات موروتن و موفات و یاهیهوای ۱۰

۲-۲-۵ تحقیقات آزمایشگاهی ORNL و EPRI ۱۲

۲-۲-۶ تحقیقات کیرک وود و همکارانش ۱۳

فصل سوم: قوانین سختی

۳-۱ مقدمه ۱۴

۳-۲ معیارهای تسلیم ۱۵

۳-۲-۱ معیار حداکثر تنش برشی (ترسکا) ۱۶

۳-۲-۲ معیار حداکثر انرژی واپیچشی (ون میسز) ۱۷

۳-۳ معادلات تنش-کرنش پلاستیک ۱۹

۳-۴ قانون جریان ۲۰
۳-۵ نظریه‌های سخت شوندگی ۲۲
۳-۵-۱ نظریه سخت شوندگی ایزوتروپیک ۲۲
۳-۵-۲ نظریه سخت شوندگی سینماتیک ۲۴
۳-۵-۳ نظریه سخت شوندگی ایزوتروپیک، سینماتیکی غیرخطی (مدل ترکیبی) ۲۶
۳-۶ مدل‌های پلاستیسیته ۲۷
۳-۶-۱ مدل دراکر پالگن ۲۸
۳-۶-۲ مدل دافالیاس پوپو ۲۸
۳-۶-۳ مدل تییسنق لی ۲۹
۳-۶-۴ قانون ارائه شده توسط آرمسترانگ-فردریک ۲۹
۳-۶-۵ کد ASMEIII ۳۰
۳-۶-۶ مدل شاباش ۳۵
۳-۶-۷ مدل یوشیدا ۳۵
۳-۶-۸ مدل چان ۳۶
۳-۷ انتقال کرنش‌های جمع شونده تک محوره و چند محوره ۳۷
۳-۸ تأثیر مقدار تنش اعمالی بر تغییرشکل‌های پیش رونده ۳۹

فصل چهارم: مواد و روش آزمون

۴-۱ مقدمه ۴۱
۴-۲ روش انجام تست‌های تجربی ۴۲
۴-۳ آزمون‌های سیکلیک برای ایجاد سیکل‌های پایدار ۴۸
۴-۴ نرمالیزه کردن ممان‌های دینامیکی ۴۹
۴-۵ آنالیز خطی و غیرخطی در المان محدود ۵۰
۴-۶ نرم افزارهای اجزا محدود ۵۱
۴-۷ مدل سازی نمونه‌های تحت آزمون ۵۲
۴-۸ به‌دست آوردن ضرایب سخت شوندگی نمونه‌های تست شونده ۵۴

۴-۹ تعیین ضرایب ثابت ماده با استفاده از روش سیکل پایدار ۵۴
۴-۱۰ اندازه گیری گشتاورها ۵۶
۴-۱۱ بارگذاری ۵۷
۴-۱۲ فرآیند تست لیورپول ۵۸
۴-۱۳ شتاب ورودی اعمال بار ۵۸
۴-۱۴ قطعه استاندارد سه راهی ۵۹

فصل پنجم: نتیجه گیری و بحث در نتایج

۵-۱ بررسی نتایج تجربی و عددی ۶۰
۵-۲ نتیجه گیری ۶۹
۵-۳ پیشنهادات برای ادامه انجام کار ۷۰
منابع و مآخذ ۷۱

فهرست جدول‌ها

شماره و عنوان جدول	صفحه
جدول ۳-۱ خواص مواد به دست آمده از تست کشش	۳۱
جدول ۳-۲ اندیس‌های تنش کد ASME	۳۲
جدول ۳-۳ مقادیر کد برای چهار نمونه قطعات	۳۳
جدول ۳-۴ اندیس‌های تجربی و به دست آمده از المان محدود	۳۳
جدول ۴-۱ حداقل و حداکثر تنش تسلیم و نهایی برای فولاد ضد زنگ	۴۶
جدول ۴-۲ تنش نهایی و تنش حد الاستیک میانگین	۴۶
جدول ۴-۳ جزئیات شرایط بارگذاری در تست‌های تجربی	۴۷
جدول ۵-۱ نتایج شبیه سازی BSS1 در آباکوس	۶۳
جدول ۵-۲ نتایج شبیه سازی BSS2 در آباکوس	۶۳
جدول ۵-۳ نتایج شبیه سازی BSS3 در آباکوس	۶۴

فهرست شکل‌ها

شماره و عنوان شکل	صفحه

شکل۱-۱ مرز بین رفتار الاستیک، الاستیک شیک‌دان، پلاستیک شیک‌دان و تغییرشکل پیش رونده ۴

شکل ۲-۱ شکل شماتیک نحوه آزمایش سه راهی با قطر بزرگ ۱۳

شکل ۳-۱ سطح تسلیم در نظریه ترسکا ۱۷

شکل۳-۲ سطح تسلیم در نظریه ون میسز ۱۸

شکل۳-۳ سخت شوندگی ایزوترپیک در فضای تنش ۲۴

شکل ۳-۴ سخت شوندگی سینماتیک در فضای تنش ۲۶

شکل۳-۵ جریان پلاستیک مواد ۲۷

شکل ۳-۶ منحنی‌های تجربی و پیش بینی شده مدل پراگر ۲۸

شکل ۳-۷ پارامترهای مدل دافالیاس پوپو ۲۹

شکل ۳-۸ پارامترهای مدل تسینق لی ۲۹

شکل ۳-۹ منحنی‌های طراحی خستگی آلیاژ کم کربن ۳۵

شکل ۳-۱۰ حلقه‌های تنش-کرنش تحت بارگذاری کرنش ثابت و تنش متغیر ۳۷

شکل ۳-۱۱ حلقه‌های تنش-کرنش تحت بارگذاری تنش ثابت و کرنش متغیر ۳۷

شکل ۳-۱۲ حلقه‌های تنش-کرنش تحت بارگذاری چند محوره سیکلیک کرنش ثابت و فشار داخلی ۳۸

شکل ۳-۱۳ منحنی تنش-کرنش تحت بارگذاری چند محوره سیکلیک تنش ثابت و فشار داخلی ثابت ۳۹

شکل ۳-۱۴ تأثیر مقدار دامنه تنش اعمالی بر تغییرشکل‌های پیش رونده ۴۰

شکل ۴-۱ نحوه انجام تست سه راهی ۴۲

شکل ۴-۲ محل اتصال وزنه های اعمال گشتاوز و گیج‌های اندازه گیری ۴۳

شکل ۴-۳ محل‌های گیج‌های کرنش برای انداره گیری گشتاور ۴۴

شکل ۴-۴ نحوه اندازه گیری گشتاورخمشی با برون یابی ۴۴

شکل ۴-۵ دو نمونه گشتاور اعمالی در تست سه راهی ۴۵
شکل ۴-۶ نمونه ای از نتایج به‌دست آمده از تست کشش ساده فولاد ضد زنگ ۴۶
شکل ۴-۷ نمونه‌های کشش با درجات سختی متغیر جهت رسیدن به خواص مکانیکی ایده آل ۴۷
شکل ۴-۸ نمودار تنش کرنش (نمونه منطبق بر نمونه‌های حاصل از نتایج تجربی) ۴۸
شکل ۴-۹ دستگاه Santam 150 ۴۹
شکل ۴-۱۰ نمونه ای از سیکل‌های پایدار شده ۴۹
شکل ۴-۱۱ مدل سازی لوله سه راهی براساس تار خنثی ۵۲
شکل ۴-۱۲ مدل لوله سه راهی با مقطع لوله داده شده ۵۲
شکل ۴-۱۳ مدل سه بعدی لوله سه راهی در آباکوس ۵۳
شکل ۴-۱۴ ۵ نمونه تست شونده جهت استخراج ثوابت ماده با دامنه کنترل کرنش ۵۵
شکل ۴-۱۵ فیکسچر ساخته شده برای جلوگیری از لیز خوردن نمونه‌های تست شونده ۵۶
شکل ۴-۱۶ نمونه ای از نتایج پایدار شده حلقه‌های تنش-کرنش(با کنترل کرنش) ۵۶
شکل ۴-۱۷ نمونه ای از گشتاور ایجاد شده در کار تجربی ۵۷
شکل ۴-۱۸ نمودارشتاب اعمالی به زمان ۵۸
شکل ۴-۱۹ نمونه استاندارد سه راهی ASME ۵۹
شکل ۵-۱ کرنش‌های پیش‌رونده بدست آمده از نتایج تجربی برحسب گشتاور ۶۲
شکل ۵-۲ کرنش‌های پیش‌رونده بدست آمده از روش عددی برحسب گشتاور ۶۴
شکل ۵-۳ کرنش‌های پیش رونده بدست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS1 ۶۵
شکل ۵-۴ کرنش‌های پیش رونده بدست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS2 ۶۵
شکل ۵-۵ کرنش‌های پیش رونده بدست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS3 ۶۶
شکل ۵-۶ کرنش‌های پیش رونده بدست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS1 برحسب $\frac{M}{M_1}$ ۶۶
شکل ۵-۷ کرنش‌های پیش رونده بدست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS2 برحسب $\frac{M}{M_1}$ ۶۷
شکل ۵-۸ کرنش‌های پیش رونده بدست آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS3 برحسب $\frac{M}{M_1}$ ۶۷
شکل ۵-۹کرنش‌های پیش رونده بدست آمده از نتایج تجربی برای نمونه‌ها برحسب $\frac{M}{M_1}$ ۶۸

شکل ۵-۱۰ کرنش‌های پیش رونده بدست آمده از نتایج عددی برای نمونه‌ها برحسب $\frac{M}{M_1}$ ۶۸
شکل ۵-۱۱ کرنش‌های پیش رونده در ممان ۳۴۹۵ از نمونه BSS1 برحسب کرنش‌های پیش رونده ۶۹

فهرست علائم اختصاری

مفهوم یا توضیح	علامت اختصاری
ممان ناشی از وزن	M_g
تنش	σ
کرنش	ε
ممان‌های اعمال شده	M
کرنش پیش رونده طی یک سیکل در جهت محیطی	ε_θ^R
تنش محیطی ناشی از فشار	σ_θ
دامنه کرنش دینامیکی وارد شده	ε_θ
تنش تسلیم	σ_y
مدول الاستیسیته	E
قطر متوسط سه راهی	d_m
قطر متوسط ساقه لوله	D_m
ضرایب تنش اولیه	B_1, B_2
شدت تنش طراحی کد ASME	S_m
شدت تنش مجاز در دمای طراحی	S_h
ضرایب تنش	α, γ
ضخامت لوله	t
مدول برشی ارتجاعی	G
ضریب پواسون	ν
ضریب لامه	λ
کرنش متوسط	ε_m

تنش متوسط	σ_m
تانسور با اثر کرنش	e_{ij}
تانسور با اثر تنش	S_{ij}
شیب منحنی کرنش پلاستیک	h
ضریب افزایش	$d\lambda$
اندازه سطح تسلیم اولیه	K
پارامتر سخت شوندگی ایزوتروپیک	R
فاصله ون میسز در فضای تنش انحرافی	j_2
تنش برگشتی (بک استرس)	X
ضرایب سخت شوندگی ماده در مدل سخت شوندگی سینماتیکی	C, γ
تابع پله وزنی (ماژول ماده)	H
حداکثر اندازه سطح تسلیم	Q
نرخ تغییر سطح تسلیم	b
قطر خارجی ساقه لوله	D
قطر خارجی سه راهی	d
مدول انتخابی لوله	Z
مقدار استحکام تسلیم در دمای محیط	S_y
مقدار استحکام نهایی ماده	S_{ut}
اندیس های تنش	B_{2r}, C_{2r}, K_{2r}
تنش اسمی	S
نرخ شدت کرنش پلاستیک	$\varepsilon^{\bullet p}$
فرکانس	f
تنش نهایی در سخت شوندگی ایزوتروپیک	R_{sat}
مشخصه ماده در نرخ سخت شوندگی	m
تنش محوری	σ_ϕ

فشار طراحی	P_d
فشار داخلی	P
فشار تسلیم	P_y
ممان تسلیم	M_y
ماتریس سختی المان	$[K]$
بردار جابجایی گرهی	$\{U\}$
بردار نیروهای خارجی وارده بر المان	$\{R\}$
سطح تسلیم پایدار شده	σ^s
محدوده کرنش پلاستیک	$\Delta\varepsilon^{pl}$
چگالی	ρ
قطر خارجی	D_o
قطر داخلی	D_{in}
ارتفاع سه راهی	h
شعاع جوش سه راهی	r
طول ساقه لوله	l

فصل اول

مفاهیم اساسی

۱-۱ مقدمه

سازه‌های زیادی در معرض بارهای سیکلی پیچیده ای قرار دارند. در یک بارگـذاری سـیکلیک بـا کنترل تنش، یک انباشتگی سیکلیک پلاستیک رخ می دهد که این پدیده اثری کـاملا طبیعـی اسـت و کرنش پلاستیکی جمع شونده در طی این شرایط و تغییرشکل سیکلیک آن، تغییرشکل‌های پیش رونده[۱] نامیده می شود. تغییرشکل‌های پیش رونده یک رفتار تحت اثر بارهای سیکلیک تحت تنش بوده و برای طراحی اجزای سازه ای مهم است. تعدادی نتایج تجربی برای تغییرشکل‌های پیش رونده تـک محـوره و چند محوره برای SS304، SS316 و SS316L گزارش شده است که در این مطالعه برروی لوله‌های سـه راهی از جنس SS304 تحقیق بعمل آمده است. اگر چه برای فهم رفتار تغییرشکل‌های پیش رونده مواد، قوانین سختی زیادی ارائه شده است لکن هنوز مقدار زیادی تحقیقات تجربی بـرای پـیش بینـی رفتـار تغییرشکل‌های پیش رونده و تطابق آنها با نتایج مدل‌ها ضروری می‌باشد. اثرات بعضـی فاکتورهـا، مثـل غیرمتقارن بودن شیوه بارگذاری، سابقه بارگذاری و غیره باعث شده است کـه بـرای پـیش بینـی رفتـار

---

[۱] Ratchting

تغییرشکل‌های پیش رونده مواد ارائه روش‌های تجربی ضروری می‌باشد. رفتار کرنش سیکلیک مواد نیـز برای قطعه در معرض بارگذاری سیکلیک مهم است.

رفتار کرنش‌های سیکلیک ناشی از سختی سیکلیک و یا نرمی سیکلیک در ارتباط با رفتار تغییرشکل-های پیش رونده مواد می‌باشند. به همان اندازه ای که تغییرشکل‌های پیش رونده مطالعه می شود آزمایش‌های کمکی تحت بارگذاری سیکلیک با کنترل کرنش ثابت بعلت تعیین ضرایب سختی مواد لازم است. ثابت‌های معادله سختی، برای اکثر مواد بوسیله آزمایش به‌دست می‌آید و به وسیله معادلات ساختاری می‌توان انها را محاسبه کرد. مواد مورد بحث در این تحقیق پروفیل‌های لوله ای هستند که می توان از آن به سه نوع لوله ساده، لوله زانویی و لوله سه راهی اشاره نمود که در بحث لوله ساده و لوله ی زانویی کارهای زیادی انجام شده است. در این مطالعه هدف بررسی رفتار تغییرشکل‌های پیش رونده در لوله سه راهی تحت بارهای سیکلیک می‌باشد. این لوله‌های سه راهی در اجزا سیستم‌های تاسیسات نیرو گاه‌های هسته ای کاربرد فراوانی دارد. این اجزا به هنگام زمین لرزه در معرض بارگذاری سیکلیک قرار گرفته و بررسی رفتار آنها امری مهم بوده و ما را به تحقیق در این مورد علاقه مند نموده است. معادلات مربوط به مدل‌های ساختاری برای پدیده تغییرشکل‌های پیش رونده تک محوره و چند محوره پیشرفت-های مهمی در دو دهه اخیر داشته است. مدل سینماتیکی سختی غیرخطی آرمسترانگ-فردریک[۱] به عنوان یکی از مدل‌های پایه است که جهت بررسی رفتار تغییرشکل‌های پیش رونده مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته این مدل کرنش‌های پیش رونده ثابتی را برای دامنه بارگذاری‌های سیکلیک ثابت ارائه می-دهد، این مدل کرنش پیش رونده را با خطای زیادی تخمین می‌زند. به همین دلیل مدل‌های اصلاح شده زیادی ابداع و توسعه یافته اند تا دقت بیش تری برای شبیه سازی تغییرشکل‌های پیش رونده حاصل آید. اصلاحات عمدتاً روی قسمت غیرخطی معادلات سختی سینماتیکی[۲] متمرکز می‌باشد. رفتار تغییرشکل-های پیش رونده در طی بارهای سیکلیک اتفاق می‌افتد، شبیه سازی این رفتار تغییرشکل‌های پیش رونده با دقت کامل، بویژه در تغییرشکل‌های پیش رونده حاصل از بارگذاری‌های چند محوره غیرمتقارنی کارآسانی نمی‌باشد. تلاش‌های زیادی براساس آزمایشهای تجربی جهت بهبود بخشیدن در دقت مدل‌های ساختاری ضروری می‌باشد تا با شبیه سازی‌های دقیق تحلیل‌های لازم صورت پذیرد. اولین مدلی که

---

[۱] Armstrong and Fredrick

[۲] Kinematic hardening equation

دارای پدیده سخت شوندگی مواد بوده است توسط بایستو[۱] در سال ۱۹۱۱ ارائه شد که وی در آن اشاره کرد که مواد در طی شرایط بارگذاری سیکلیک سخت و یا نرم می شوند که به دلیل عدم همخوانی در بسیاری موارد، مدل‌های جدید و اصلاحات جدیدتری به‌وجود آمدند. این تحقیقات برای طراحی اجزاء تاسیسات نیروگاه‌های اتمی که در معرض زمین لرزه‌های شدید می توانند قرار بگیرند حائز اهمیت است. تحقیق‌های گسترده در زمینه تغییرشکل‌های پیش رونده نشانگر کامل نبودن هیچ کدام از قانون‌های سخت شوندگی مواد برای توصیف این رفتار می‌باشد و نشان می دهد که هنوز جای کار وجود دارد. با توجه به این که تاسیسات نیروگاه‌های اتمی ۵۰ تا ۷۵ درصد تمام هزینه کارخانه به حساب می آیند، می-توان صرفه جویی قابل توجهی در هزینه‌ها و امکانات زیست محیطی در اثر برآورد زمان شکست در لوله‌ها و پیش بینی عمر مفید آنها به‌دست آورد. یکی از مسائل مهم در کاربردهای قطعات، مقاومت آن‌ها در برابربارهای سیکلی می‌باشد که در این تحقیق لوله‌های سه راهی در برابر بارهای سیلکیک قرار گرفته و رفتار آنها را در برابر ممان‌های تناوبی بررسی می‌شود.

۱-۲ محدوده الاستیک، پلاستیک شیک‌دان و کرنش‌های پیشرونده

سه نوع رفتار متفاوت از نمودار تنش و کرنش در لوله‌های تحت فشار جدار نازک با ممان‌های دینامیکی می‌توان مشاهده کرد[گردن[۲] و همکارانش، ۱۹۹۰] . این مناطق عبارت است از: منطقه کاملا الاستیک، محدوده‌هایی که در آن هیچ ترکیبی از بارها باعث تسلیم در ماده نمی‌شود. منطقه پلاستیک شیک‌دان که در آن تمامی بارها باعث ایجاد رفتار پلاستیک در جسم می‌شود. این محدوده را با معادلات زیر می‌توان بیان کرد که در آن M_g ممان ناشی از وزن و M ممان‌های اعمال شده می‌باشد. محدوده تسلیم با معادله زیر بیان می‌شود [گردن و همکارانش، ۱۹۹۰] :

$$\frac{3}{4}\left[\frac{p}{p_{y_o}}\right]^2+\left[\left(M+M_g\right)/M_{y_o}\right]^2=1 \qquad (۱-۱)$$

محدوده شیک‌دان نیز به‌صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود [گردن و همکارانش، ۱۹۹۰] :

$$\frac{3}{4}\left[\frac{p}{p_{y_o}}\right]^2+\left[M/M_{y_o}\right]^2=1 \qquad (۱-۲)$$

همچنین محدوده کرنش‌های پیش رونده نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [گردن و همکارانش، ۱۹۹۰] :

---

[۱] Baistow
[۲] Gorden