

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد  
مهندسی سازه

# اثر فرضیات سخت‌شدگی چرخه‌ای فولاد بر رفتار چرخه‌ای اتصالات فولادی

سجاد صادقی دزکی

استاد راهنما

دکتر شریف شاه بیک

شهریور ۱۳۹۱



بسمه تعالی

## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای سجاد صادقی دزکی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان اثر فرضیات سخت شوندگی چرخه ای فولاد بر رفتار چرخه ای اتصالات فولادی در تاریخ

۱۳۹۱/۶/۲۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر شریف شاه بیگ	استادیار	
استاد ناظر	دکتر علی اکبر آقا کوچک	استاد	
استاد ناظر	دکتر ناصر خاجی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر همایون استکانچی	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر علی اکبر آقا کوچک	استاد	

## دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاستهای پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

- ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامهها / رسالههای مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامهها و دستورالعملهای مصوب دانشگاه باشد.
- ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.
- تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.
- ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.
- ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.
- ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی: سجاد صادقی دزکی

امضاء



## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی عمران سازه است که در سال ۱۳۹۱ در دانشکده مهندسی عمران کامپیوتریست دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر شیرین لاله بیلی، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر

و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده ۶: اینجانب سجاد مادی دانشجوی رشته مهندسی عمران سازه مقطع کارشناسی ارشد

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

سجاد مادی

تاریخ و امضا:

۹۱، ۴، ۲۷



## تقدیم به

آنان که قلم و زبانم از ستایش محبت‌هایشان

عاجز است،

پدر و مادر عزیزم

شاید بوسه‌ای باشد بر دست‌های پر مهرشان...

## مشکر و قدردانی

اکنون که با استعانت از نگاه ایزدیکتا این پایان نامه را به انجام رسانیده ام بر خود لازم می دانم از زحمات بی دریغ، تلاش های بی وقفه و راهنمایی های

ارزشمند استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر شاه یک مشکر و قدردانی نمایم. بی شک گذر از این مسیر دشوار بدون راهنمایی های دلسوزانه و عالمانه می

ایشان میسر نبود. همچنین از استاد گرامی جناب آقای دکتر آقا کوچک که با اعمال نظرهای ارزشمند خود نقش بسزایی در برابتر نمودن این پژوهش داشتند

صمیمانه سپاسگزاری می نمایم. در پایان از تمامی دوستان عزیز سازه ورودی ۸۹ که در این راه همواره پشتیبان بنده بودند مشکر می نمایم.

سجاد صادقی دکنی

شهریور ۱۳۹۱

## چکیده

امروزه به منظور بررسی رفتار چرخه‌های سازه‌های فولادی از فرضیه‌های مختلف سخت‌شدگی استفاده می‌شود که در این میان فرضیه‌های سخت‌شدگی خطی پویا و همسانگرد کاربرد بیشتری دارند. در حالی که نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، سخت‌شدگی فولاد ترکیبی غیر خطی از دو سخت‌شدگی پویا و همسانگرد است که خود این دو بخش نیز از ماهیتی غیر خطی برخوردارند. در این پژوهش سعی شده است تا میزان اثرگذاری فرضیات مختلف سخت‌شدگی چرخه‌ای فولاد، بر برآوردهای تحلیل‌های عددی در یک اتصال فولادی بررسی شود. برای این منظور برای یک اتصال فولادی خمشی اثر شش نوع فرضیه‌ی سخت‌شدگی مختلف در دو حالت بارگذاری نزدیک و دور از گسل بررسی شده است. این فرضیات شامل سه نوع فرضیه‌ی سخت‌شدگی همسانگرد دو نوع فرضیه‌ی سخت‌شدگی پویا و سخت‌شدگی ترکیبی می‌باشند. همچنین این تحلیل‌ها برای شش فولاد با ویژگی خمیری متفاوت انجام شده است که در تمامی تحلیل‌ها مدل سخت‌شدگی ترکیبی به عنوان مرجع مقایسه انتخاب شده است. در این پژوهش کمیت‌های مقاومت (نیرو)، ظرفیت جذب انرژی (انرژی اتلافی خمیری) و زمان شروع ترک (کرنش خمیری معادل بیشینه) به عنوان معیار مقایسه‌ی نتایج انتخاب شده است. به منظور محاسبه‌ی زمان شروع ترک و کرنش خمیری معادل نظیر آن از مدل رشد حفره چرخه‌ای، CVGM، و با فرض سخت‌شدگی ترکیبی استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که اثر فرضیات سخت‌شدگی مختلف در برآورد کمیت‌های مذکور قابل توجه می‌باشد اما نوع بارگذاری تقریباً در روند پیش‌بینی هر یک از فرضیات سخت‌شدگی تاثیر ندارد.

**کلید واژه:** مدل‌های خمیری فولاد، بارگذاری چرخه‌ای، سخت‌شدگی ترکیبی، سخت‌شدگی پویا،

سخت‌شدگی همسانگرد، کالیبراسیون مدل سخت‌شدگی.



# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵	فهرست جدول
۵	فهرست شکل
۱	پیشگفتار
۳	فصل ۱: مروری بر مدل‌های سخت‌شدگی چرخه‌ای
۴	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- مشاهدات رفتار فلزات در طول بارگذاری چرخه‌ای تک محوری
۵	۱-۲-۱- اثر پوشینگر
۵	۲-۲-۱- سخت‌شدگی، نرم‌شدگی چرخه‌ای
۷	۳-۲-۱- رچتینگ (خزش توسعه یافته)
۱۰	۴-۲-۱- آسودگی
۱۰	۵-۲-۱- تغییر شیب ملایم از حالت ارتجاعی به خمیری
۱۰	۶-۲-۱- ثابت ماندن طول ناحیه ارتجاعی در طول بارگذاری
۱۱	۷-۲-۱- وجود خطوط مرزی بارگذاری و باربرداری
۱۲	۳-۱- قوانین سخت‌شدگی ابتدایی
۱۲	۱-۳-۱- سخت‌شدگی همسانگرد
۱۳	۱-۱-۳-۱- سخت‌شدگی همسانگرد خطی
۱۴	۲-۳-۱- سخت‌شدگی پویا
۱۵	۱-۲-۳-۱- قانون سخت‌شدگی پراگر
۱۶	۲-۲-۳-۱- قانون سخت‌شدگی زیگزر
۱۶	۴-۱- قوانین سخت‌شدگی چرخه‌ای
۱۶	۱-۴-۱- مدل چند سطحی
۱۷	۱-۱-۴-۱- توصیف مدل در حالت تک محوری
۱۷	۲-۱-۴-۱- حالت کلی بارگذاری
۱۸	۲-۲-۱-۴-۱- توصیف هندسی مدل
۱۹	۳-۲-۱-۴-۱- بیان ریاضی مدل
۲۲	۴-۲-۱-۴-۱- ترکیب اثر سخت‌شدگی همسانگرد با پویا
۲۳	۳-۱-۴-۱- تعیین متغیرهای مدل

۲۴	..... مدل دو سطحی ۲-۴-۱
۲۴	..... توصیف مدل در حالت تک محوری ۱-۲-۴-۱
۲۷	..... توصیف مدل در حالت کلی ۲-۲-۴-۱
۲۹	..... مدل سخت‌شدگی پویای غیر خطی ۳-۴-۱
۳۰	..... مدل خمیری اندوکرونیک ۴-۴-۱
۳۲	..... فرمول بندی کلی مدل ۱-۴-۴-۱
۳۴	..... سخت‌شدگی همسانگرد غیر خطی ۵-۴-۱
۳۵	..... روش کالیبراسیون نرم‌افزار آباکوس برای مدل سخت‌شدگی همسانگرد ۱-۵-۴-۱

۳۷

## فصل ۲: مدل‌های سخت‌شدگی پویای غیر خطی

۳۸	..... مقدمه ۱-۲
۳۸	..... مدل‌های سخت‌شدگی غیر خطی پویا ۲-۲
۳۸	..... مدل فردریک-آرمسترانگ ۱-۲-۲
۴۳	..... مدل تعمیم یافته‌ی چابوچی ۲-۲-۲
۴۵	..... مدل اوهنو-وانگ ۳-۲-۲
۴۵	..... مدل اوهنو-وانگ I ۱-۳-۲-۲
۴۵	..... مدل اوهنو-وانگ II ۲-۳-۲-۲
۴۶	..... روش‌های کالیبراسیون مدل چابوچی ۳-۲
۴۷	..... روش باری-حسن برای مدل چابوچی با سه متغیر سخت‌شدگی پویا ۱-۳-۲
۵۰	..... روش سینایی-پژند برای مدل چابوچی با یک متغیر خطی و یک متغیر غیر خطی ۲-۳-۲
۵۳	..... روش‌های پیشنهادی نرم‌افزار آباکوس ۳-۳-۲
۵۳	..... روش نیم‌چرخه ۱-۳-۳-۲
۵۴	..... روش چرخه‌ی پایدار شده ۲-۳-۳-۲

۵۶

## فصل ۳: شبیه‌سازی و تحلیل اتصال

۵۷	..... مقدمه ۱-۳
۵۷	..... مشخصات هندسی اتصال مورد مطالعه ۲-۳
۵۸	..... مراحل شبیه‌سازی اتصال فولادی در نرم‌افزار ABAQUS/CAE ۳-۳
۵۸	..... تعریف هندسه مدل ۱-۳-۳
۶۰	..... بارگذاری ۲-۳-۳
۶۰	..... تعریف مشخصات مکانیکی فولاد ۳-۳-۳
۶۱	..... تعریف مدل سخت‌شدگی خمیری فولاد ۱-۳-۳-۳
۶۳	..... روش تحلیل و خروجی‌های برنامه ۴-۳-۳

۶۳	۴-۳- صحت سنجی نتایج .....
۶۴	۵-۳- مروری بر نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزای محدود .....
۶۵	۶-۳- محاسبه‌ی زمان شروع ترک در اتصال .....
۶۵	۱-۶-۳- مدل CVGM .....
۶۶	۲-۶-۳- محاسبه‌ی زمان شروع ترک بر اساس مدل CVGM .....

۸۰

#### فصل ۴ : نتیجه گیری و پیشنهادها

۸۱	۱-۴- مقدمه .....
۸۱	۲-۴- بحث و بررسی نتایج .....
۸۱	۱-۲-۴- معیار مقاوت .....
۸۲	۲-۲-۴- معیار ظرفیت جذب انرژی .....
۸۴	۳-۲-۴- معیار زمان شروع ترک .....
۸۴	۳-۴- نتیجه گیری .....
۸۵	۴-۴- پیشنهادها .....

۸۶

#### فهرست مراجع

پیوست الف: مشخصات مکانیکی فولادها

پیوست ب: نتایج تحلیل اتصال فولادی

# فهرست جدول

صفحه	عنوان
۵۸	جدول ۱-۳ - مشخصات اجزای اتصال .....
۶۰	جدول ۲-۳ - مشخصات خمیری فولادهای مصرفی. ....
۶۵	جدول ۳-۳ - راهنمای علائم اختصاری نتایج گزارش شده در پایان نامه. ....
۶۶	جدول ۴-۳ - ضرایب مدل CVGM فولادهای مورد مطالعه. ....
۶۷	جدول ۵-۳ - کرنش خمیری معادل بحرانی و شماره‌ی چرخه‌ی شروع ترک با فرض سخت‌شدگی ترکیبی. ....
۸۲	جدول ۱-۴ - مقایسه‌ی نیروی پیش‌بینی شده (بر حسب KN) نظیر جابجایی بیشینه قبل از شروع ترک با مدل CH. ....
۸۳	جدول ۲-۴ - مقایسه‌ی مقادیر نیرو، انرژی اتلافی خمیری و کرنش خمیری معادل در زمان شروع ترک با مدل CH. ....
۸۴	جدول ۳-۴ - شماره چرخه‌ی شروع ترک با فرض سطح شروع ترک در مدل CH. ....

# فهرست شکل

عنوان

صفحه

- شکل ۱-۱ - اثر پوشینگر و نمایش انتقال سطح تسلیم در صفحه انحرافی. ۵
- شکل ۲-۱ - رفتار سخت شدگی و نرم شدگی چرخه‌ای تحت بارگذاری کرنش کنترل متقارن. ۶
- شکل ۳-۱ - رفتار سخت شدگی و نرم شدگی چرخه‌ای تحت بارگذاری تنش کنترل متقارن. ۶
- شکل ۴-۱ - منحنی بزرگای تنش-تعداد چرخه‌ای بارگذاری فولاد SS304، برای آزمایش تک‌محوری کرنش کنترل متقارن با دامنه‌ی کرنش:  $\pm 0.5\% \leftarrow \pm 0.8\% \leftarrow \pm 0.5\%$ . ۷
- شکل ۵-۱ - منحنی بزرگای تنش-تعداد چرخه‌ای بارگذاری فولاد FE510، برای آزمایش تک‌محوری کرنش کنترل متقارن با دامنه‌ی کرنش:  $\pm 0.2\% \leftarrow \pm 1.2\% \leftarrow \pm 0.2\%$ . ۷
- شکل ۶-۱ - وقوع کرنش رچتینگ تحت اثر بارگذاری تنش کنترل نامتقارن. ۸
- شکل ۷-۱ - اثر رچتینگ برای فولاد SS304. ۸
- شکل ۸-۱ - اثر رچتینگ برای فولاد CS1020. ۸
- شکل ۹-۱ - اثر رچتینگ برای فولاد SS304 به ازای دامنه‌ی تنش ثابت  $\pm 300$  MPA و تنش‌های میانگین مختلف. ۹
- شکل ۱۰-۱ - اثر رچتینگ برای فولاد SS304 به ازای تنش میانگین ثابت ۱۰ MPA و دامنه‌ی تنش‌های متفاوت مختلف. ۱۰
- شکل ۱۱-۱ - آسودگی تنش میانگین تحت اثر بارگذاری کرنش کنترل نامتقارن. ۱۱
- شکل ۱۲-۱ - آسودگی تنش میانگین فولاد CS1080 تحت کرنش میانگین ۲٪ و دامنه‌ی کرنش ۰.۶۵٪. ۱۱
- شکل ۱۳-۱ - نتایج آزمایش بارگذاری چرخه‌ای کلی تک محوری برای فولاد رده ۶۰. ۱۱
- شکل ۱۴-۱ - سخت‌شدگی همسانگرد، نمایش تغییر سطح تسلیم با افزایش کرنش خمیری در بارگذاری تک محوری. ۱۳
- شکل ۱۵-۱ - منحنی تنش-کرنش تک محوری با فرض کرنش سختی خطی. ۱۴
- شکل ۱۶-۱ - بزرگ شدن سطح تسلیم در حالت سخت‌شدگی همسانگرد. ۱۴
- شکل ۱۷-۱ - انتقال سطح تسلیم در حالت سخت‌شدگی پویا. ۱۵
- شکل ۱۸-۱ - توصیف گرافیکی مدل چند سطحی مروز. ۱۸
- شکل ۱۹-۱ - قانون حرکت سطح ایوان. ۲۰
- شکل ۲۰-۱ - قانون حرکت سطح مروز. ۲۱
- شکل ۲۱-۱ - نتایج آزمایش بارگذاری چرخه‌ای کلی تک محوری برای فولاد رده ۶۰. ۲۵
- شکل ۲۲-۱ - خطوط مرزی و متغیرهای مدل دو سطحی. ۲۶
- شکل ۲۳-۱ - تعاریف متفاوت برای تنش تسلیم. ۳۱
- شکل ۲۴-۱ - آزمایش چرخه‌ای تک‌محوری کرنش متقارن. ۳۵
- شکل ۱-۲ - دو مسیر کرنش خمیری برای حصول به یک کرنش خمیری یکسان. ۳۹
- شکل ۲-۲ - توصیف هندسی ضرایب سخت‌شدگی برای بارگذاری کششی و فشاری. ۴۱
- شکل ۳-۲ - توصیف هندسی سطوح تسلیم و مرزی. ۴۳
- شکل ۴-۲ - مدل سخت‌شدگی پویا با سه متغیر سخت‌شدگی پویا. ۴۴
- شکل ۵-۲ - تغییرات اندازه‌ی متغیر سخت‌شدگی پویا در بارگذاری تک‌محوری کششی. ۴۶
- شکل ۶-۲ - افزایش چرخه‌ی هیسترسیس به سه ناحیه برای فولاد CS1026. ۴۸
- شکل ۷-۲ - کالیبراسیون مدل چابوچی با سه متغیر سخت‌شدگی پویا برای فولاد CS1026. ۵۰

- شکل ۲-۸ - تعریف چرخه‌ی اول در روش کالیبراسیون سینایی-پژند. ۵۰.....
- شکل ۲-۹ - کالیبراسیون مدل چابوچی با یک متغیر خطی و یک متغیر غیر خطی به روش سینایی-پژند. ۵۲.....
- شکل ۲-۱۰ - کالیبراسیون مدل چابوچی با سه متغیر سخت‌شدگی پویا برای فولاد ساختمانی ایران. ۵۴.....
- شکل ۲-۱۱ - داده‌های تنش-کرنش برای روش چرخه‌ی پایدار شده. ۵۵.....
- شکل ۳-۱ - هندسه‌ی اتصال فولادی. ۵۷.....
- شکل ۳-۲ - هندسه‌ی اتصال فولادی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار. ۵۸.....
- شکل ۳-۳ - شرایط مرزی اتصال فولادی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار. ۵۹.....
- شکل ۳-۴ - المان‌بندی اتصال فولادی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار. ۵۹.....
- شکل ۳-۵ - تاریخچه‌ی بارگذاری نمونه. ۶۰.....
- شکل ۳-۶ - صحت‌سنجی منحنی چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان مدل با نتایج آزمایشگاهی. ۶۳.....
- شکل ۳-۷ - صحت‌سنجی پوش نیرو-تغییر مکان مدل با نتایج آزمایشگاهی. ۶۴.....
- شکل ۳-۸ - محاسبه‌ی زمان شروع ترک برای فولاد IR-ST37. ۶۶.....
- شکل ۳-۹ - نمودار پوش چرخه‌ی هیسترسیس نیرو-تغییر مکان در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد IR-ST37. ۶۸.....
- شکل ۳-۱۰ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد IR-ST37. ۶۸.....
- شکل ۳-۱۱ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد IR-ST37. ۶۸.....
- شکل ۳-۱۲ - نمودار نیرو-تاریخچه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد IR-ST37. ۶۹.....
- شکل ۳-۱۳ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد IR-ST37. ۶۹.....
- شکل ۳-۱۴ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد IR-ST37. ۶۹.....
- شکل ۳-۱۵ - نمودار پوش چرخه‌ی هیسترسیس نیرو-تغییر مکان در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد AW50. ۷۰.....
- شکل ۳-۱۶ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد AW50. ۷۰.....
- شکل ۳-۱۷ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد AW50. ۷۰.....
- شکل ۳-۱۸ - نمودار نیرو-تاریخچه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد AW50. ۷۱.....
- شکل ۳-۱۹ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد AW50. ۷۱.....
- شکل ۳-۲۰ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد AW50. ۷۱.....
- شکل ۳-۲۱ - نمودار پوش چرخه‌ی هیسترسیس نیرو-تغییر مکان در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد AP50. ۷۲.....
- شکل ۳-۲۲ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد AP50. ۷۲.....
- شکل ۳-۲۳ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد AP50. ۷۲.....
- شکل ۳-۲۴ - نمودار نیرو-تاریخچه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد AP50. ۷۳.....
- شکل ۳-۲۵ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد AP50. ۷۳.....
- شکل ۳-۲۶ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد AP50. ۷۳.....
- شکل ۳-۲۷ - نمودار پوش چرخه‌ی هیسترسیس نیرو-تغییر مکان در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد AP110. ۷۴.....
- شکل ۳-۲۸ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد AP110. ۷۴.....
- شکل ۳-۲۹ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد AP110. ۷۴.....
- شکل ۳-۳۰ - نمودار نیرو-تاریخچه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد AP110. ۷۵.....
- شکل ۳-۳۱ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد AP110. ۷۵.....
- شکل ۳-۳۲ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد AP110. ۷۵.....
- شکل ۳-۳۳ - نمودار پوش چرخه‌ی هیسترسیس نیرو-تغییر مکان در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد JP50. ۷۶.....
- شکل ۳-۳۴ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد JP50. ۷۶.....
- شکل ۳-۳۵ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد JP50. ۷۶.....

- شکل ۳-۳۶ - نمودار نیرو-تاریخچه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد JP50 ..... ۷۷
- شکل ۳-۳۷ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد JP50 ..... ۷۷
- شکل ۳-۳۸ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد JP50 ..... ۷۷
- شکل ۳-۳۹ - نمودار پوش چرخه‌ی هیسترسیس نیرو-تغییر مکان در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد JW50 ..... ۷۸
- شکل ۳-۴۰ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد JW50 ..... ۷۸
- شکل ۳-۴۱ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری دور از گسل برای فولاد JW50 ..... ۷۸
- شکل ۳-۴۲ - نمودار نیرو-تاریخچه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد JW50 ..... ۷۹
- شکل ۳-۴۳ - نمودار انرژی اتلافی خمیری-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد JW50 ..... ۷۹
- شکل ۳-۴۴ - نمودار کرنش خمیری معادل بیشینه-چرخه‌ی بارگذاری در حالت بارگذاری نزدیک گسل برای فولاد JW50 ..... ۷۹

## پیشگفتار

شناخت نوع بارگذاری وارد بر سازه و نحوه عملکرد مصالح تشکیل‌دهنده‌ی آن تحت بارگذاری، گامی موثر در جهت نیل به طراحی ایمن است. از انواع بارهای وارد بر سازه می‌توان به بار زلزله، باد و ماشین‌آلات مکانیکی اشاره نمود. در اغلب موارد این بارها دارای ماهیت چرخه‌ای<sup>۱</sup> هستند. همچنین آیین‌نامه‌های طراحی سازه این اجازه را به سازه می‌دهند، تا با انجام تغییر شکل‌های خمیری و برگشت ناپذیر ظرفیت شکل‌پذیری مورد نیاز را تامین کند. بنابراین شناخت دقیق رفتار مواد مورد استفاده در اجزای سازه تحت بارگذاری چرخه‌ای در حالتی که تغییر شکل خمیری اتفاق می‌افتد، امری ضروری در ارائه تحلیلی دقیق می‌باشد.

با توجه به اهمیت فولاد به عنوان ماده‌ای پرکاربرد در اجزای سازه‌ای، هدف اصلی پژوهش پیش رو مطالعه رفتار خمیری فولاد شکل‌پذیر ساختمانی تحت بارگذاری چرخه‌ای است. تحت اثر بارگذاری رفت و برگشتی و در ناحیه خمیری ماده می‌تواند به دو صورت پویا<sup>۲</sup> و همسانگرد<sup>۳</sup>، سخت شود. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که توابع سخت‌شدگی پویا و همسانگرد شکلی غیرخطی دارند، همچنین سخت‌شدگی ماده ترکیبی غیرخطی از سخت‌شدگی همسانگرد و پویا می‌باشد. مدل‌هایی مانند مدل چندسطحی<sup>۴</sup>، مدل دوسطحی<sup>۵</sup>، مدل ترکیب غیرخطی سخت‌شدگی پویا و همسانگرد و مدل اندوکرونیک<sup>۶</sup> برای توصیف رفتار خمیری ماده در بارگذاری چرخه‌ای ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است در تمامی مدل‌های مذکور می‌توان اثر سخت‌شدگی همسانگرد را به صورت مستقل در محاسبات لحاظ نمود. اغلب این مدل‌ها دارای نقاط قوت و ضعفی می‌باشند و باید با توجه به مورد کاربرد آن‌ها توسط آزمایش‌های تک‌محوری کالیبره گردند. نحوه‌ی کالیبراسیون متغیرهای مدل فولاد تاثیر مستقیم در صحت نتایج شبیه‌سازی اجزای سازه‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای دارد. از میان مدل‌های فوق مدل ترکیب غیرخطی سخت‌شدگی پویا و همسانگرد دارای کاربرد بیشتری در مسائل عملی و همچنین نرم‌افزارهای تجاری همچون آباکوس می‌باشد.

امروزه، در بسیاری از تحلیل‌های عملی (به خصوص در ایران) برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای ماده، از اثر سخت‌شدگی ماده صرف‌نظر می‌گردد و یا تنها یکی از انواع سخت‌شدگی برای ماده فرض می‌شود، حال این سوال مطرح است که در صورت انجام تحلیلی مبتنی بر واقعیت چه میزان اختلاف در

<sup>1</sup> Cyclic

<sup>2</sup> Kinematic

<sup>3</sup> Isotropic

<sup>4</sup> Multi-surface model

<sup>5</sup> Two-surface model

<sup>6</sup> Endochronic model



نتایج حاصل می‌گردد. در این پایان‌نامه سعی می‌گردد، این پرسش در چارچوب مراحل زیر پاسخ داده شود.

- بررسی پدیده‌های فیزیکی مرتبط با بارگذاری چرخه‌ای غیر ارتجاعی فولاد.
- بررسی مدل‌های خمیری موجود برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای.
- بررسی مدل سخت‌شدگی غیر خطی پویا و همسانگرد و ارائه‌ی روش‌های کالیبراسیون آن‌ها.
- شبیه‌سازی یک اتصال فولادی با شش مدل مختلف سخت‌شدگی، شامل سخت‌شدگی غیر خطی ترکیبی، سخت‌شدگی خطی پویا، سخت‌شدگی غیر خطی پویا، سخت‌شدگی خطی همسانگرد و سخت‌شدگی غیر خطی همسانگرد (در دو حالت مختلف). همچنین به منظور ارائه‌ی تحقیقی جامع، هر یک از مدل‌های مذکور برای شش فولاد با مشخصات خمیری متفاوت و در دو حالت بارگذاری دور و نزدیک گسل بررسی می‌گردند.

# فصل ۱

---

مروری بر مدل های سخت شکی چرخه ای

## ۱-۱- مقدمه

مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که معمولاً پاسخ چرخه‌ای فلزات در یک چرخه نسبت به چرخه‌ی دیگر متفاوت است. به عبارت دیگر اغلب فلزات رفتاری وابسته به چرخه بارگذاری<sup>۱</sup> دارند. شناخت رفتار فلزات تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای بسیار حائز اهمیت است. در این راستا تلاش‌های گسترده‌ای برای تعیین معادلات رفتاری حاکم بر ماده صورت گرفته است. الگوی کلی برای تعیین معادلات رفتاری مواد تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای به شرح زیر می‌باشد [۱].

- مشاهده پاسخ ماده در حالت بارگذاری رفت و برگشتی تک‌محوری و رسم منحنی تنش- کرنش.
  - فرمول‌بندی معادلات رفتاری که در برگیرنده‌ی اجزای اساسی پاسخ تک‌محوری باشد.
  - تعیین متغیرهای مدل از نتایج آزمایش‌های تک‌محوری.
  - تعمیم مدل به حالت بارگذاری چندمحوری با توجه به مفهوم تنش و کرنش موثر.
- بنابراین در ابتدا مشاهدات فیزیکی مربوط به این نوع از بارگذاری ارائه می‌گردد.

## ۱-۲- مشاهدات رفتار فلزات در طول بارگذاری چرخه‌ای تک‌محوری

آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای تک‌محوری را می‌توان در حالت کلی به سه دسته زیر تقسیم بندی نمود [۲].

- بارگذاری کرنش کنترل<sup>۲</sup>: در این حالت همواره مقدار کرنش در یک بازه معین قرار دارد. حال اگر میزان کرنش میانگین برابر صفر شود در اصطلاح گفته می‌شود که آزمایش کرنش کنترل متقارن است (شکل ۱-۲). در غیر این صورت آزمایش غیر متقارن محسوب می‌گردد (شکل ۱-۱۱).
- بارگذاری تنش کنترل<sup>۳</sup>: در این حالت همواره مقدار تنش در یک بازه معین تغییر می‌کند. مطابق حالت کرنش کنترل، در این حالت نیز در صورتی که تنش میانگین صفر باشد، آزمایش، تنش کنترل متقارن (شکل ۱-۳) و در غیر این صورت تنش کنترل نامتقارن (شکل ۱-۶) نامیده می‌شود.
- بارگذاری تصادفی<sup>۴</sup>: در این حالت، بارگذاری در هر مسیر دلخواه و با هر الگویی مجاز است. به عبارت دیگر بارگذاری می‌تواند ترکیبی متنوع از بارگذاری‌های کرنش کنترل و تنش کنترل باشد. در ادامه چند خاصیت رفتاری اساسی فلز توپر تحت بارگذاری چرخه‌ای ذکر می‌گردد.

<sup>1</sup> Cyclic-dependent behaviour

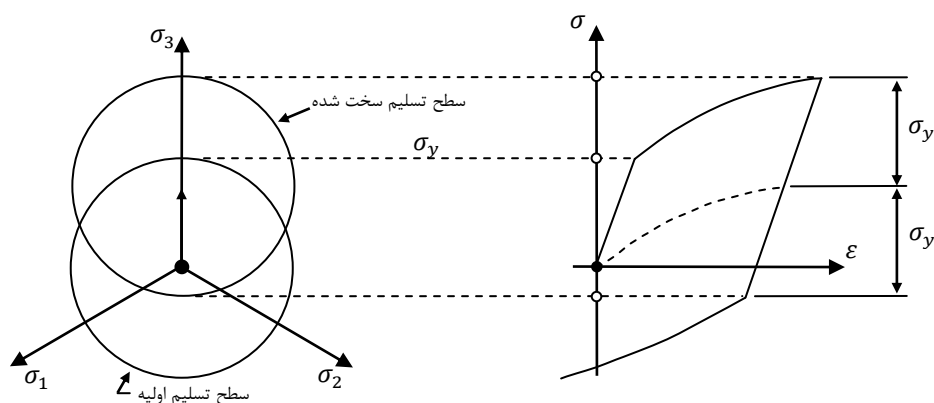
<sup>2</sup> Fixed strain loading

<sup>3</sup> Fixed stress loading

<sup>4</sup> Random loading

## ۱-۲-۱- اثر بوشینگر

بسیاری از فلزات دارای تنش تسلیمی یکسان در بارگذاری فشاری و کششی هستند [۳]. اگر نمونه‌ای از این‌گونه مواد، تحت اثر بارگذاری تک محوری قرار گیرد و بارگذاری تا نقطه‌ی تسلیم ادامه یابد، سپس نمونه در جهت معکوس تا رسیدن به تسلیم مجدد بارگذاری گردد، مشاهده می‌شود که قدر مطلق تنش تسلیم در این حالت، از تنش تسلیم اولیه کمتر خواهد بود (شکل ۱-۱)؛ به این پدیده اثر بوشینگر<sup>۱</sup> می‌گویند [۴]. لازم به ذکر است آنچه که در بارگذاری چرخه‌ای از آن به عنوان انتقال سطح تسلیم یاد می‌شود؛ به دلیل وجود اثر بوشینگر می‌باشد. همچنین براساس مشاهدات آزمایشگاهی، با تکرار چرخه‌های باربرداری و بارگذاری اثر بوشینگر کاهش می‌یابد [۵].



شکل ۱-۱-۱ اثر بوشینگر و نمایش انتقال سطح تسلیم در صفحه انحرافی [۶].

## ۱-۲-۲- سخت‌شدگی، نرم‌شدگی چرخه‌ای

بسیاری از مواد تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای رفتاری سخت‌شونده و یا نرم‌شونده از خود نشان می‌دهند. در حالتی که کرنش میان دو حد ثابت  $-\epsilon^*$  و  $+\epsilon^*$  به صورت یکنوا تغییر نماید، اگر دامنه‌ی تنش در هر چرخه نسبت به چرخه‌ی قبل از آن افزایش یابد (شکل ۱-۲-۱ الف)، رفتار ماده سخت‌شونده‌ی چرخه‌ای<sup>۲</sup> می‌باشد. اما اگر دامنه‌ی تنش طی چرخه‌های بارگذاری کاهش یابد (شکل ۱-۲-۱ ب)، رفتار ماده نرم‌شونده چرخه‌ای<sup>۳</sup> است. حال اگر الگوی بارگذاری، تنش کنترل متقارن باشد، مطابق با حالت قبل اگر طی چرخه‌های بارگذاری دامنه‌ی کرنش کاهش یابد (شکل ۱-۳-۱ الف)، ماده دارای رفتار سخت‌شدگی چرخه‌ای است و اگر دامنه‌ی کرنش در هر چرخه نسبت به چرخه‌ی قبل افزایش یابد (شکل ۱-۳-۱ ب)، ماده رفتاری نرم‌شونده دارد [۷]. لازم به ذکر است در هر دو حالت بارگذاری تنش کنترل و کرنش کنترل، معمولاً با ادامه‌ی بارگذاری، اثر سخت‌شدگی (نرم‌شدگی) چرخه‌ای پایدار می‌گردد؛ به این پدیده

<sup>۱</sup> Bauschinger effect (1886)

<sup>۲</sup> Cyclic hardening

<sup>۳</sup> Cyclic softening