بسم الله الرحمن الرحیم
الحمد لله رب العالمین الرحمن الرحیم مالک یوم الدین
اهدنا الصراط المستقیم صراط الذین انعمت علیهم غیر المغضوب علیهم ولا الضالین

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه رازی است.

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

عنوان پایان نامه

تعیین خواص مکانیکی مواد فلزی در نرخ کرنش بالا بر اساس مدل تحلیلی تیلور و شبیه‌سازی عددی آزمایش هاپکینسون

استاد راهنما:

دکتر سعید فعلی

نگارش:

محمد کارگری

تیر ماه ۱۳۹۰

سپاسگزاری

به نام او که این همه نقش عجب تصویر رخ اوست که بر جامم افتاد...

اکنون که به فضل عنایت پروردگار متعال مراحل انجام این پایان نامه به اتمام رسیده، بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاد ارجمند، جناب آقای دکتر سعید فعلی که در تمامی مراحل با رهنمودها و همفکریشان مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را نمایم. امیدوارم این اثر دلیل ناچیزی باشد در جهت جبران زحمات بی دریغ ایشان.

تقدیم به سایبانان آرامشم، به تکیه‌گاهان زندگیم، به آنان که یاریم کردند تا بیاموزم به عزیزانی که قلبم به یاری آنان در نهایت دلتنگی تپیدن گرفت...

تقدیم به

همسر عزیزم که وجودش همواره مایه دلگرمی و آرامش زندگی ام بوده

و

پدر و مادر مهربانم که وجودشان دلیل زیستن و تلاشم می باشد...

چکیده

به دست آوردن منحنی تنش–کرنش مواد مختلف و تعیین خصوصیات مکانیکی آنها در بارگذاری های ضربه ای و دماهای بالا، که یکی از شرایط و ملزومات ضروری طراحی می‌باشد، موضوع بسیاری از تحقیقات و پژوهش ها در طی دهه های اخیر و در مجامع علمی بوده است.

با استفاده از منحنی تنش–کرنش یک ماده می توان رفتار آن ماده را در شرایط مختلف بارگذاری و دمایی پیش بینی نمود و شرایط لازم را جهت طراحی بهینه در نظر گرفت.

برای تعیین خواص مکانیکی مواد فلزی در نرخ های کرنش و دمای بالا(شامل تعیین ضرایب مدل رفتار ماده و منحنی تنش–کرنش) از روش های آزمایشی و تحلیلی متفاوتی استفاده می شود، ولی اکثر این روش ها در عین پر هزینه بودن زمان زیادی را نیز می طلبند. آزمایش ضربه تیلور و دستگاه تست هاپکینسون دو روش معمول برای تعیین این خواص می‌باشند.

در این پایان نامه ابتدا بر اساس شبیه سازی آزمایش هاپکینسون به کمک نرم افزار *ABAQUS* و استفاده از معادلات ارائه شده، منحنی تنش–کرنش دو ماده فلزی فولاد و آلومینیوم در نرخ های کرنش و دماهای مختلف استخراج می‌گردد، سپس با استفاده از مدل تحلیلی بهینه شده آزمایش تیلور که در آن رابطه تنش–کرنش بر حسب پارامترهای نرخ کرنش، دما و همچنین مدل های رفتاری ارائه شده است، رابطه ای بر حسب ضرایب مدل های رفتاری استخراج می‌گردد.

در مراحل بعدی تابع هدفی با استفاده از مقادیر تنش به دست آمده از شبیه سازی آزمایش هاپکینسون و معادله تحلیلی به دست آمده از آزمایش تیلور، تعریف می شود که با مینیموم سازی این تابع و استفاده از روش بهینه سازی، ضرایب مدل های رفتاری برای دو مدل جانسون–کوک و زریلی–آرمسترانگ استخراج می‌گردد.

روش بهینه‌سازی به کار رفته در پایان نامه، روش الگوریتم ژنتیک می‌باشد که با استفاده از نرم افزار MATLAB کد نویسی شده است.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کاربرد زیادی جهت پیش بینی منحنی تنش–کرنش دینامیکی مواد در شرایط بارگذاری ضربه‌ای و محیط های دما بالا خواهد داشت. به علاوه با توجه به اینکه ضرایب مربوط به مدل‌های ساختاری بهینه شده در شرایط مختلفی از بارگذاری استخراج گردیده است، روابط به دست آمده بر پایه این ضرایب در محدوده وسیعی از دما و نرخ کرنش کاربرد خواهند داشت.

در پایان تطابق خوب بین نتایج بدست آمده از شبیه سازی و بهینه سازی با نتایج تجربی، دقت بالای روش استفاده شده در این پایان نامه را نشان می‌دهد.

فهرست مطالب

عنوان
صفحه

فصل اول: مقدمات، کلیات، تاریخچه

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تعریف اصطلاحات به کار رفته در پایان نامه ۳

۱-۲-۱- موج تنش ۳

۱-۲-۱-۱- انتشار موج تنش طولی ۴

۱-۲-۱-۱-۱- شدت تنش محوری منتشر شده در میله ۷

۱-۲-۲- انعکاس موج های تنش ۸

۱-۲-۲-۱- انتهای ساده ۹

۱-۲-۲-۲- انتهای گیردار ۹

۱-۲-۳- موج های تنش الاستیک-پلاستیک ۱۱

۱-۲-۳-۱- منحنی تنش-کرنش در محدوده پلاستیک خطی ۱۲

۱-۲-۳-۲- منحنی تنش-کرنش در محدوده پلاستیک غیر خطی ۱۳

۱-۳- تاریخچه آزمایش هاپکینسون و تست ضربه تیلور ۱۵

۱-۴- تعریف موضوع پایان نامه ۱۷

فصل دوم: رفتار مواد در نرخ کرنش و دمای بالا

۲-۱- منحنی تنش-کرنش ۲۰

۲-۲- تأثیرات نرخ کرنش بر روی رفتار ماده ۲۱

۲-۲-۱- رفتار فلزات bcc ۲۲

۲-۲-۲- رفتار فلزات fcc ۲۳

۲-۳- تأثیرات درجه حرارت ۲۳
۲-۴- مدل های تنش سیلان ۲۴
۲-۴-۱- مدل تنش سیلان JC ۲۴
۲-۴-۲- مدل تنش سیلان ZA ۲۵
۲-۵- معادله حالت ۲۶
۲-۶- آزمایش های رفتار دینامیکی مواد ۲۹
۲-۶-۱- دستگاه پلاستومتر بادامکی ۲۹
۲-۶-۲- دستگاه چرخ طیار ۳۰
۲-۶-۳- دستگاه میله هاپکینسون ۳۰
۲-۶-۳-۱- مود فشاری ۳۲
۲-۶-۳-۲- مود کششی ۳۲
۲-۶-۳-۲-۱- تغییر سیستم محرک ۳۲
۲-۶-۳-۲-۲- ایجاد تنش پسماند کششی در نمونه ۳۳
۲-۶-۴- آزمایش ضربه تیلور ۳۴

فصل سوم: تحلیل آزمایش ضربه تیلور

۳-۱- مقدمه ۳۷
۳-۲- انتشار موج تنش پلاستیک یک بعدی در پرتابه ۳۷
۳-۲-۱- کرنش مساحتی ۳۸
۳-۲-۲- کرنش حجمی ۳۹
۳-۲-۳- معادلات بقاء در پیشانی موج پلاستیک منتشر شده در پرتابه ۴۰
۳-۲-۳-۱- معادلات بقاء جرم ۴۱
۳-۲-۳-۲- معادلات بقاء اندازه حرکت ۴۱

۳-۲-۳-۳- معادلات بقاء انرژی ۴۳

۳-۳- مولفه های تنش و معادلات حاکم بر رفتار پرتابه ۴۳

۳-۳-۱- مولفه های تنش پرتابه ۴۳

۳-۳-۲- معادله تسلیم ون مایزز ۴۵

۳-۳-۳- معادله حالت ۴۵

۳-۴- روابط سینماتیکی ۴۶

۳-۵- محاسبه نرخ کرنش در پرتابه ۴۷

۳-۶- منحنی تنش-کرنش دینامیکی پرتابه ۴۸

فصل چهارم: تئوری آزمایش هاپکینسون

۴-۱- مقدمه ۵۵

۴-۲- اساس آزمایش هاپکینسون بار ۵۰

۴-۳- تئوری آزمایش هاپکینسون بار ۵۲

۴-۳-۱- ارتعاش محوری در میله ها ۵۲

۴-۳-۲- انتشار موج طولی در میله ها ۵۴

۴-۳-۳- محاسبه تنش، نرخ کرنش و کرنش نمونه ۵۷

۴-۳-۳-۱- تنش نمونه ۵۷

۴-۳-۳-۲- نرخ کرنش و کرنش نمونه ۵۸

فصل پنجم: بهینه سازی و به دست آوردن ضرایب مدل های رفتاری مواد

۵-۱- مقدمه ۶۲

۵-۲- بهینه سازی ۶۳

۵-۳- روشهای بهینه سازی ۶۳

۵-۳-۱- روش نیوتن ۶۵
۵-۳-۲- روش گرادیان ۶۶
۵-۳-۳- روش سیمپلکس ۶۷
۵-۳-۴- روش الگوریتم ژنتیک ۶۹
۵-۴- روشهای تعیین ضرایب مدل ماده ۷۱
۵-۴-۱- برازش منحنی ۷۱
۵-۴-۲- ترکیب شبیه سازی و بهینه سازی ۷۳
۵-۴-۳- ترکیب تئوری و آزمایش ۷۶

فصل ششم: شبیه سازی آزمایش هاپکینسون

۶-۱- نرم افزار المان محدود *ABAQUS* ۸۰
۶-۲- شبیه سازی آزمایش هاپکینسون ۸۱
۶-۲-۱- منو *Part* و منو *Sketch* ۸۲
۶-۲-۲- منو *Property* ۸۲
۶-۲-۳- منو *Assembly* ۸۴
۶-۲-۴- منو *Step* ۸۵
۶-۲-۵- منو *Interaction* ۸۶
۶-۲-۶- منو *Load* ۸۷
۶-۲-۷- منو *Mesh* ۸۹
۶-۲-۸- منو *Job* ۹۰

فصل هفتم: نتایج، بحث و بررسی

۷-۱- مقدمه ۹۲
۷-۲- منحنی تنش-کرنش شبه استاتیکی مواد ۹۳

۷-۳- نتایج به دست آمده از شبیه سازی با آباکوس ۹۴
۷-۳-۱- منحنی تغییرات سرعت ضربه زننده (*Striker*) ۹۵
۷-۳-۲- منحنی انتشار و انعکاس امواج کرنش ۹۵
۷-۳-۲-۱- بررسی اثرات استفاده از صفحه شکل دهنده موج (*Pad*) ۹۸
۷-۳-۲-۲- بررسی اثرات مربوط به شکل هندسی نمونه ۱۰۰
۷-۳-۳- بررسی اثر مربوط به موقعیت کرنش سنج ها ۱۰۳
۷-۳-۴- تغییر شکل هندسی اجزاء دستگاه هاپکینسون در فرآیند شبیه سازی ۱۰۵
۷-۳-۵- بررسی تغییرات نرخ کرنش در نمونه ۱۰۸
۷-۳-۶- منحنی های تنش-کرنش دینامیکی ۱۱۵
۷-۳-۶-۱- منحنی تنش-کرنش مهندسی ۱۱۵
۷-۳-۶-۲- منحنی تنش-کرنش حقیقی ۱۲۶
۷-۴- تعیین ضرایب رفتاری مواد با استفاده از نتایج بهینه سازی ۱۳۴
۷-۴-۱- محاسبه ضرایب مربوط به نرخ کرنش سختی ۱۳۵
۷-۴-۲- محاسبه ضرایب مربوط به نرخ کرنش و دما ۱۳۸
۷-۵- نتیجه گیری نهایی و پیشنهادها ۱۴۶
۷-۵-۱- نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار *ABAQUS* ۱۴۶
۷-۵-۲- نتایج حاصل از بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک ۱۴۷
۷-۵-۳- پیشنهادها ۱۴۸

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول(۲-۱): پارامترهای مدل تنش سیلان JC برای مس ۲۵

جدول(۲-۲): پارامترهای مدل تنش سیلان ZA برای مس ۲۶

جدول (۲-۳): پارامترهای معادله حالت مای-گرونایزن برای مس ۲۷

جدول(۲-۴): پارامترهای معادله حالت مای-گرونایزن برای مس ۲۸

جدول(۵-۱): نتایج بدست آمده از بهینه سازی ۷۵

جدول(۶-۱): خصوصیات هندسی مربوط به اجزاء دستگاه هاپکینسون ۸۲

جدول(۶-۲): خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مواد بکار رفته در شبیه سازی ۸۳

جدول(۶-۳): ضرایب مدل رفتاری جانسون –کوک برای صفحه مسی *pad* ۸۳

جدول(۶-۴): رفتار پلاستیک بکار رفته درشبیه سازی برای ۴۳۴۰ *steel* ۸۴

جدول(۶-۵): رفتار پلاستیک بکار رفته در شبیه سازی برای ۷۰۳۹ *Aluminum* ۸۴

جدول(۷-۱): مشخصات هندسی نمونه های بکار رفته در شبیه سازی ۱۰۸

جدول(۷-۲): مساحت مقطع عرضی میله های الاستیک و سرعت موج الاستیک درون آنها ۱۱۶

جدول(۷-۳): ضرایب مربوط به کار سختی در مدل های ساختاری ۱۳۵

جدول(۷-۴): ضرایب مدل ساختاری جانسون-کوک بدست آمده از برازش منحنی ۱۳۷

جدول(۷-۵): ضرایب مدل ساختاری زریلی-آرمسترانگ بدست آمده از برازش منحنی ۱۳۸

جدول(۷-۶): ضرایب مربوط به نرخ کرنش و دما در مدل های ساختاری ۱۳۸

جدول(۷-۷): مقادیر پارامترهای بکار رفته در رابطه (۳-۵۵) برای فولاد ۴۳۴۰ .....۱۳۹

جدول(۷-۸): مقادیر پارامترهای بکار رفته در رابطه (۳-۵۵) برای آلومینیوم ۷۰۳۹ .....۱۳۹

جدول(۷-۹): ضرایب مدل جانسون-کوک بدست آمده از بهینه سازی برای فولاد ۴۳۴۰ و مقایسه با نتایج تجربی ۱۴۰

جدول(۷-۱۰): ضرایب مدل جانسون-کوک بدست آمده از بهینه سازی برای آلومینیوم ۷۰۳۹ و مقایسه با نتایج تجربی ۱۴۰

جدول(۷-۱۱): ضرایب مدل زریلی-آرمسترانگ بدست آمده از بهینه سازی برای فولاد ۴۳۴۰ و مقایسه با نتایج تجربی ۱۴۰

جدول (۷-۱۲): ضرایب مدل زریلی-آرمسترانگ بدست آمده از بهینه سازی برای آلومینیوم ۷۰۳۹ و مقایسه با نتایج تجربی..... ۱۴۱

فهرست شکل ها

عنوان
صفحه

شکل (۱-۱): انتشار موج طولی در میله بلند منشوری ۴

شکل (۱-۲): المان در حال تعادل برای یک میله بلند منشوری که موج طولی در حال عبور از آن می باشد ۵

شکل (۱-۳): نحوه انعکاس موج تنش از انتهای آزاد ۱۰

شکل (۱- ۴): نحوه انعکاس موج تنش از انتها با شرط مرزی گیردار ۱۱

شکل (۱-۵-a): توزیع تنش و کرنش در میله با منحنی تنش –کرنش دو خطی تحت انتشار امواج الاستیک و پلاستیک..... ۱۲

شکل (۱-۵-b): منحنی تنش-کرنش دو خطی ۱۳

شکل (۱-۶): المان در حالت تعادل برای میله ای که امواج تنش الاستیک و پلاستیک از آن عبور می کند ۱۴

شکل (۲-۱): منحنی تنش-کرنش حقیقی ۲۰

شکل (۲-۲): منحنی تنش-کرنش (a) فولاد در $1000\ ^{\circ}C$ (b) مس در نرخ کرنش $10^{3}1/s$ ۲۳

شکل (۲-۳): دستگاه آزمایش دینامیکی پلاستومتر بادامکی ۲۹

شکل (۲-۴): دستگاه آزمایش دینامیکی چرخ طیار ۳۰

شکل (۲-۵): دستگاه آزمایش میله فشاری هاپکینسون ۳۱

شکل (۲-۶): طرح شماتیک مود فشاری آزمایش هاپکینسون ۳۲

شکل (۲-۷): طرح شماتیک مود کششی آزمایش هاپکینسون ۳۳
شکل (۲-۸): تخت شدن پرتابه و تغییر شکل آن در آزمایش ضربه تیلور ۳۴
شکل (۲-۹): دستگاه شلیک پرتابه در آزمایش ضربه تیلور ۳۵
شکل (۳-۱): برخورد پرتابه استوانه ای به سطح صلب و تخت شدن پرتابه ۳۷
شکل (۳-۲): عبور موج تنش پلاستیک در پرتابه و مقادیر پارامتر ها در دو سمت موج ۴۱
شکل (۳-۳): حجم کنترل اعمالی در پیشانی موج تنش پلاستیک ۴۲
شکل (۳-۴): دیاگرام جسم آزاد برای ناحیه صلب پرتابه ۴۲
شکل (۳-۵): نرخ افزایش طول ناحیه تغییر شکل داده و کاهش طول ناحیه صلب پرتابه ۴۷
شکل (۴-۱): شماتیک دستگاه هاپکینسون بار ۵۱
شکل (۴-۲): میله فشار با المان دیفرانسیلی قبل از تغییر شکل ۵۲
شکل (۴-۳): المان دیفرانسیلی تحت فشار ۵۲
شکل (۴-۴): نیروهای مقاوم در برابر فشار در المان دیفرانسیلی ۵۳
شکل (۴-۵): شماتیک تغییر پله در مساحت و خواص ماده ۵۵
شکل (۴-۶): معادلات به کار رفته در فصل مشترک میله و نمونه آزمایش ۵۶
شکل (۴-۷): شماتیک نمونه استوانه ای ۵۷
شکل (۵-۱): الگوریتم مسائل بهینه سازی ۶۴
شکل (۵-۲): شماتیک روش گرادیان ۶۶
شکل (۵-۳): المان چهار وجهی در روش سیمپلکس ۶۷
شکل (۵-۴): روش جستجوی الگوریتم سیمپلکس ۶۸
شکل (۵-۵): تقاطع تک نقطه ای ۷۰
شکل (۵-۶): تقاطع دو نقطه ای ۷۰
شکل (۵-۷): تقاطع دو نقطه ای ۷۱

شکل (۵-۸): شبیه سازی نمونه های آزمایشی ۷۳
شکل (۵-۹): مقایسه داده های آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از بهینه سازی ۷۵
شکل (۵-۱۰): مرحل محاسبه ضرایب مدل ماده ۷۶
شکل (۵-۱۱): مقایسه نتایج آزمایشگاهی با شبیه سازی (Pso) ۷۷
شکل (۵-۱۲): مراحل محاسبه مدل ماده ۷۸
شکل (۶-۱): موقعیت اجزاء دستگاه هاپکینسون در ماژول $Assembly$ ۸۵
شکل (۶-۲): نمایش سطوح پایه و پیرو در میله ضربه زننده و Pad ۸۶
شکل (۶-۳): شرایط مرزی سرعت به کار رفته در شبیه سازی ۸۸
شکل (۶-۴): شرایط دمایی به کار رفته در شبیه سازی ۸۸
شکل (۶-۵): نمای مش بندی شده میله ورودی، خروجی و نمونه آزمایش ۸۹
شکل (۶-۶): نمای مش بندی شده میله ضربه زننده و Pad ۹۰
شکل (۶-۷): نمایی از پنجره Job ۹۰
شکل (۷-۱): منحنی تنش-کرنش شبه استاتیکی برای فولاد ۴۳۴۰ ..... ۹۳
شکل (۷-۲): منحنی تنش-کرنش شبه استاتیکی برای آلومینیوم ۷۰۳۹ ..... ۹۳
شکل (۷-۳): شماتیک دستگاه هاپکینسون ۹۴
شکل (۷-۴): نمودار تغییرات سرعت میله ضربه زننده (جنس ماده نمونه فولاد ۴۳۴۰) ۹۵
شکل (۷-۵): نمودار تغییرات سرعت میله ضربه زننده (جنس ماده آلومینیوم ۷۰۳۹) ۹۵
شکل (۷-۶): نمودار موج کرنش انعکاسی و انتشاری با جنس نمونه فولاد ۴۳۴۰ ..... ۹۶
شکل (۷-۷): نمودار موج کرنش انتقالی با جنس نمونه فولاد ۴۳۴۰ ..... ۹۷
شکل (۷-۸): نمودار موج کرنش انعکاسی و انتشاری با جنس نمونه آلومینیوم ۷۰۳۹ ..... ۹۷
شکل (۷-۹): نمودار موج کرنش انتقالی با جنس نمونه آلومینیوم ۷۰۳۹ ..... ۹۷
شکل (۷-۱۰): شماتیک دستگاه هاپکینسون و موقعیت صفحه شکل دهنده در آن ۹۸

شکل (۷-۱۱): موج کرنش انتشاری و انعکاسی در دستگاه هاپکینسون بدون استفاده از Pad ۹۸

شکل (۷-۱۲): موج کرنش انتشاری و انعکاسی در دستگاه هاپکینسون با استفاده از Pad مسی ۹۹

شکل (۷-۱۳): موج کرنش انتشاری و انعکاسی در دستگاه هاپکینسون با استفاده از Pad آلومینیومی ۹۹

شکل (۷-۱۴): موج کرنش انتشاری و انعکاسی در دستگاه هاپکینسون با استفاده از Pad فولادی ۱۰۰

شکل (۷-۱۵): منحنی موج کرنش با نسبت $L/D=۲/۵$ برای نمونه فولادی ۴۳۴۰ .....۱۰۱

شکل (۷-۱۶): منحنی موج کرنش با نسبت $L/D=۰/۲۵$ برای نمونه فولادی ۴۳۴۰ .....۱۰۱

شکل (۷-۱۷): منحنی موج کرنش با نسبت $L/D=۱/۶۶۷$ برای نمونه آلومینیوم ۷۰۳۹ .....۱۰۲

شکل (۷-۱۸): منحنی موج کرنش با نسبت $L/D=۰/۵$ برای نمونه آلومینیوم ۷۰۳۹ .....۱۰۲

شکل (۷-۱۹): منحنی موج کرنش در وسط میله های ورودی و خروجی (نمونه فولادی ۴۳۴۰) ۱۰۳

شکل (۷-۲۰): منحنی موج کرنش در ابتدای میله های ورودی و خروجی (نمونه فولادی ۴۳۴۰) ۱۰۴

شکل (۷-۲۱): منحنی موج کرنش در وسط میله های ورودی و خروجی (نمونه آلومینیومی ۷۰۳۹) ۱۰۴

شکل (۷-۲۲): منحنی موج کرنش در ابتدای میله های ورودی و خروجی (نمونه آلومینیومی ۷۰۳۹) ۱۰۵

شکل (۷-۲۳): شکل هندسی نمونه و میله های ورودی و انتقالی دستگاه هاپکینسون، قبل از برخورد ۱۰۶

شکل (۷-۲۴): شکل هندسی نمونه و میله های ورودی و انتقالی دستگاه هاپکینسون، بعد از برخورد ۱۰۶

شکل (۷-۲۵): شکل هندسی Pad و میله ضربه زننده قبل از برخورد ۱۰۷

شکل (۷-۲۶): شکل هندسی Pad و میله ضربه زننده هنگام از برخورد ۱۰۷

شکل (۷-۲۷): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه های فولادی ۴۳۴۰ در دمای $۲۵\,^{\circ}C$ ۱۰۹

شکل (۷-۲۸): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه های فولادی ۴۳۴۰ در دمای $۲۰۰\,^{\circ}C$ ۱۰۹

شکل (۷-۲۹): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه های فولادی ۴۳۴۰ در دمای $۴۰۰\,^{\circ}C$ ۱۱۰

شکل (۷-۳۰): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه های آلومینیومی ۷۰۳۹در دمای $۲۵\,^{\circ}C$ ۱۱۰

شکل (۷-۳۱): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه های آلومینیومی ۷۰۳۹در دمای $۱۰۰\,^{\circ}C$ ۱۱۱

شکل (۷-۳۲): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه های آلومینیومی ۷۰۳۹در دمای $۲۵۰\,^{\circ}C$ ۱۱۱

شکل (۷-۳۳): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه فولادی ۴۳۴۰ با طول $2mm$ و در سه دمای مختلف..... ۱۱۲

شکل (۷-۳۴): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه فولادی ۴۳۴۰ با طول $4mm$ و در سه دمای مختلف..... ۱۱۳

شکل (۷-۳۵): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه فولادی ۴۳۴۰ با طول $6mm$ و در سه دمای مختلف..... ۱۱۳

شکل (۷-۳۶): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه آلومینیومی ۷۰۳۹ با طول $2mm$ و در سه دمای مختلف..... ۱۱۴

شکل (۷-۳۷): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه آلومینیومی ۷۰۳۹ با طول $5mm$ و در سه دمای مختلف..... ۱۱۴

شکل (۷-۳۸): منحنی نرخ کرنش-کرنش مهندسی برای نمونه آلومینیومی ۷۰۳۹ با طول $8mm$ و در سه دمای مختلف..... ۱۱۵

شکل (۷-۳۹): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در نرخ کرنش $3000 1/s$ و دماهای مختلف ۱۱۷

شکل (۷-۴۰): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در نرخ کرنش $2000 1/s$ و دماهای مختلف ۱۱۷

شکل (۷-۴۱): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در نرخ کرنش $1500 1/s$ و دماهای مختلف ۱۱۸

شکل (۷-۴۲): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در دمای $25\,^{\circ}C$ و نرخ های کرنش مختلف ۱۱۸

شکل (۷-۴۳): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در دمای $200\,^{\circ}C$ و نرخ های کرنش مختلف ۱۱۹

شکل (۷-۴۴): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در دمای $400\ ^{\circ}C$ و نرخ های کرنش مختلف ۱۱۹
شکل (۷-۴۵): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در نرخ کرنش $30001/s$ و دماهای مختلف ۱۲۰
شکل (۷-۴۶): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در نرخ کرنش $16001/s$ و دماهای مختلف ۱۲۰
شکل (۷-۴۷): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در نرخ کرنش $10001/s$ و دماهای مختلف ۱۲۱
شکل (۷-۴۸): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در دمای $25\ ^{\circ}C$ و نرخ های کرنش مختلف ۱۲۱
شکل (۷-۴۹): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در دمای $100\ ^{\circ}C$ و نرخ های کرنش مختلف ۱۲۲
شکل (۷-۵۰): منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در دمای $250\ ^{\circ}C$ و نرخ های کرنش مختلف ۱۲۲
شکل (۷-۵۱): مقایسه بین منحنی تنش-کرنش به دست آمده از شبیه سازی ونتایج تجربی برای فولاد ۴۳۴۰ در نرخ های کرنش $20001/s$ و دمای $25\ ^{\circ}C$ ۱۲۳
شکل (۷-۵۲): مقایسه بین منحنی تنش-کرنش به دست آمده از شبیه سازی ونتایج تجربی برای فولاد ۴۳۴۰ در نرخ های کرنش $20001/s$ و دمای $200\ ^{\circ}C$ ۱۲۴
شکل (۷-۵۳): مقایسه بین منحنی تنش-کرنش به دست آمده از شبیه سازی ونتایج تجربی برای فولاد ۴۳۴۰ در نرخ های کرنش $20001/s$ و دمای $400\ ^{\circ}C$ ۱۲۴
شکل (۷-۵۴): مقایسه بین منحنی تنش-کرنش به دست آمده از شبیه سازی ونتایج تجربی برای آلومینیوم ۷۰۳۹ در نرخ های کرنش $16001/s$ و دمای $25\ ^{\circ}C$ ۱۲۵

شکل (۷-۵۵): مقایسه بین منحنی تنش-کرنش به دست آمده از شبیه سازی ونتایج تجربی برای آلومینیوم ۷۰۳۹ در نرخ های کرنش $1/s$ ۱۶۰۰ و دمای $^{\circ}C$ ۱۰۰ ..... ۱۲۵
شکل (۷-۵۶): مقایسه بین منحنی تنش-کرنش به دست آمده از شبیه سازی ونتایج تجربی برای آلومینیوم ۷۰۳۹ در نرخ های کرنش $1/s$ ۱۶۰۰ و دمای $^{\circ}C$ ۲۵۰ ..... ۱۲۶
شکل (۷-۵۷): نمودار تغییرات مساحت سطح مقطع نمونه $4mm$ با جنس فولاد ۴۳۴۰ ..... ۱۲۷
شکل (۷-۵۸): نمودار تغییرات مساحت سطح مقطع نمونه $5mm$ با جنس آلومینیوم ۷۰۳۹ ..... ۱۲۸
شکل (۷-۵۹): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در نرخ کرنش $1/s$ ۳۰۰۰ و دماهای مختلف ۱۲۸
شکل (۷-۶۰): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در نرخ کرنش $1/s$ ۲۰۰۰ و دماهای مختلف ۱۲۹
شکل (۷-۶۱): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در نرخ کرنش $1/s$ ۱۵۰۰ و دماهای مختلف ۱۲۹
شکل (۷-۶۲): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در دمای $^{\circ}C$ ۲۵ و نرخ های کرنش مختلف ۱۳۰
شکل (۷-۶۳): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در دمای $^{\circ}C$ ۲۰۰ و نرخ های کرنش مختلف ۱۳۰
شکل (۷-۶۴): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در دمای $^{\circ}C$ ۴۰۰ و نرخ های کرنش مختلف ۱۳۱
شکل (۷-۶۵): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در نرخ کرنش $1/s$ ۳۰۰۰ و دماهای مختلف ۱۳۱
شکل (۷-۶۶): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در نرخ کرنش $1/s$ ۱۶۰۰ و دماهای مختلف ۱۳۲

شکل (۷-۶۷): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در نرخ کرنش $1000\,1/s$ و دماهای مختلف ۱۳۲

شکل (۷-۶۸): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در دمای $25\,^{\circ}C$ و نرخ های کرنش مختلف ۱۳۳

شکل (۷-۶۹): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در دمای $100\,^{\circ}C$ و نرخ های کرنش مختلف ۱۳۳

شکل (۷-۷۰): منحنی تنش-کرنش حقیقی مربوط به آلومینیوم ۷۰۳۹ در دمای $250\,^{\circ}C$ و نرخ های کرنش مختلف ۱۳۴

شکل (۷-۷۱): مقایسه منحنی تنش-کرنش حاصل از مدل بهینه شده جانسون-کوک با نتایج تجربی در نرخ کرنش $30001/s$ و دمای $25\,^{\circ}C$ برای فولاد ۴۳۴۰ ..... ۱۴۲

شکل (۷-۷۲): مقایسه منحنی تنش-کرنش حاصل از مدل بهینه شده جانسون-کوک با نتایج تجربی در نرخ کرنش $30001/s$ و دمای $300\,^{\circ}C$ برای فولاد ۴۳۴۰ ..... ۱۴۲

شکل (۷-۷۳): مقایسه منحنی تنش-کرنش حاصل از مدل بهینه شده زریلی-آرمسترانگ با نتایج تجربی در نرخ کرنش $30001/s$ و دمای $25\,^{\circ}C$ برای فولاد ۴۳۴۰ ..... ۱۴۳

شکل (۷-۷۴): مقایسه منحنی تنش-کرنش حاصل از مدل بهینه شده زریلی-آرمسترانگ با نتایج تجربی در نرخ کرنش $30001/s$ و دمای $300\,^{\circ}C$ برای فولاد ۴۳۴۰ ..... ۱۴۳

شکل (۷-۷۵): مقایسه منحنی تنش-کرنش حاصل از مدل بهینه شده جانسون-کوک با نتایج تجربی در نرخ کرنش $30001/s$ و دمای $25\,^{\circ}C$ برای آلومینیوم ۷۰۳۹ ..... ۱۴۴

شکل (۷-۷۶): مقایسه منحنی تنش-کرنش حاصل از مدل بهینه شده جانسون-کوک با نتایج تجربی در نرخ کرنش $30001/s$ و دمای $200\,^{\circ}C$ برای آلومینیوم ۷۰۳۹ ..... ۱۴۴

شکل (۷-۷۷): مقایسه منحنی تنش-کرنش حاصل از مدل بهینه شده زریلی-آرمسترانگ با نتایج تجربی در نرخ کرنش $30001/s$ و دمای $25\,^{\circ}C$ برای آلومینیوم ۷۰۳۹ ..... ۱۴۵