



بنام خداوند



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکتری

مهندسی مکانیک - طراحی جامدات

مدل سازی بنیادی رفتار مکانیکی وابسته به نرخ پلیمرهای  
آمورف حین تغییر شکل با نرخ کرنش های بسیار بالا

نگارش:

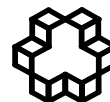
کیوان حسینی صفری

استاد راهنما:

دکتر جمال زمانی

شهریور ۹۱

	تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	<b>تأییدیه هیأت داوران</b>	شماره: تاریخ:
هیأت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از رساله تهیه شده تحت عنوان:			
<p style="text-align: center;"><b>مدل سازی بنیادی رفتار مکانیکی وابسته به نرخ پلیمرهای آمورف حین تغییر شکل با نرخ کرنش های بسیار بالا</b></p>			
توسط آقای <b>کیوان حسینی صفری</b> صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکتری با درجه عالی در رشته مهندسی مکانیک گرایش جامدات در تاریخ ۹۱/۶/۲۹ مورد تأیید قرار می دهند.			
۱- استاد راهنما	جناب آقای دکتر جمال زمانی	امضاء	
۴- ممتحن داخلی	جناب آقای دکتر مجید قریشی	امضاء	
۵- ممتحن داخلی	جناب آقای دکتر محمد رضا خلیلی	امضاء	
۴- ممتحن خارجی	جناب آقای دکتر محمود موسوی مشهدی	امضاء	
۵- ممتحن خارجی	جناب آقای دکتر غلامحسین لیاقت	امضاء	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	جناب آقای دکتر مجید بازارگان	امضاء	



## اظهارنامه دانشجو

شماره:

تاریخ:

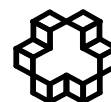
اینجانب **کیوان حسینی صفری** دانشجوی دکتری رشته **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که نتایج ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان :  
**طراحی جامدات** دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که نتایج ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان :

مدل سازی بنیادی رفتار مکانیکی وابسته به نرخ پلیمرهای آمورف حین تغییر شکل با نرخ کرنش های بسیار بالا

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای **دکتر جمال زمانی**، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد. در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:



شماره:  
تاریخ:

### حق چاپ و تکثیر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.
  - ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی باشد.

تقديم به

# مادر و پدر عزیزم

## تقدیر و تشکر

در اینجا لازم می دانم تا از رهنمودها و زحمات ارزنده استاد گرامی جناب آقای دکتر جمال زمانی، چه در دوران تحصیل و چه در نگارش این رساله، نهایت قدردانی و سپاسگزاری را داشته باشم.

همچنین از اساتید محترم جناب آقای پرفسور خدش (Guedes) و جناب آقای دکتر فرریا (Ferreira) و همینطور مسئولین محترم آزمایشگاه اپتیک و مکانیک تجربی دانشگاه پورتو که جهت انجام آزمایش های تجربی این تحقیق با اینجانب همکاری داشته اند، صمیمانه تشکر می نمایم.

## چکیده

پلی کربونیت ها گروه ویژه ای از پلیمرهای ترموپلاستیک می باشند. این مواد به راحتی مورد استفاده قرار گرفته و در معرض حرارت شکل می گیرند. به دلیل مقاومت بالای این مواد در معرض ضربه، کاربردهای متعددی برای آنها در نظر گرفته شده است. وابستگی به نرخ تغییر شکل در رفتار الاستیک، پلاستیک و واماندگی پلیمرها بخوبی شناخته شده است، با این وجود رفتار این مواد تحت شرایط تغییر شکل با نرخ های بالا به خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته است.

هدف اصلی از این مطالعه گسترش و ارائه مدل های بنیادی (توصیف کننده رفتار تنش- کرنش) وابسته به نرخ (زمان) برای پلیمرهای شیشه ای یا بی شکل (آمورف) در نرخ کرنش های بسیار بالا می باشد.

برنامه پژوهشی در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل جنبه های تجربی، تحلیلی (تئوریک) و عددی می باشد که بر پایه دانش نسبتاً وسیعی گسترش یافته است که در منابع بنا نهاده شده اند.

در زمینه تجربی این مطالعه، تحقیق در خصوص رفتار ویسکو الاستیک به عنوان یک ضرورت اساسی انتخاب گردیده تا فهم پایه ای کاملتری از انتقال ها در رفتار ماده و در پی آن از ارتباط مابین رفتار ویسکو الاستیک، تنش تسلیم و رفتار تنش-کرنش ماده حاصل گردد. بنابراین نتایج تجربی ای که ضمن غلبه بر مشکلات تکنیکی از تست های میله فشاری هاپکینسون (SHPB) در نرخ کرنش های بسیار بالا بدست آمده اند، با آنالیزهای حرارتی مکانیکی دینامیکی (DMTA) و روش جداسازی/جابجایی/بازسازی (DSR) توأم گردیده اند. چگونگی انجام و نتایج حاصل از این دو گروه از آزمایش ها و آنالیزها (تست های میله فشاری هاپکینسون و آنالیزهای حرارتی مکانیکی دینامیکی) در این مطالعه با جزئیات مربوطه ارائه گردیده است.

در زمینه تحلیلی (تئوریک) این مطالعه، مفهوم جداسازی و تفکیک مقاومت تغییر شکل ماده به مشارکت فرآیند های ملکولی متفاوت، بستر لازم برای تحلیل و ارائه تکنیک های مدل سازی مورد اشاره را فراهم نموده است.

نخست یک مدل بنیادی برای تغییر شکل های بزرگ پلی کربونیت Lexan<sup>TM</sup> تحت شرایط نرخ کرنش های بالا (فرا تر از  $10^4 \text{ s}^{-1}$ ) ارائه گردیده است. با بکارگیری تئوری تسلیم ری-ایرینگ (Ree-Eyring) و بر پایه مدلی که ابتدا توسط بويس (Boyce) و همکارانش معرفی شده است، و با در نظر گرفتن فرض تک دمایی، این مدل برای پیش بینی رفتار تسلیم و پس از تسلیم پلیمرهای آمورف در نرخ کرنش های بالا ارائه گردیده است. مدل پیشنهادی فرآیند تغییر شکل اولیه (فرآیند  $\alpha$ ) و دو فرآیند ثانویه ی فعال شونده با نرخ (فرآیندهای  $\beta$  و  $\gamma$ ) را در نظر می گیرد. در مقایسه با مدل های گذشته برای اولین بار مشارکت فرآیند های ثانویه در کنار فرآیند اولیه در این مطالعه لحاظ شده و مدل جدیدی پیشنهاد گردیده است. با انجام تست های SHPB در نرخ کرنش های بسیار بالا، این امر ممکن گردید که تاثیر مشارکت فرآیندهای ثانویه بخصوص فرآیند  $\gamma$  در پیش بینی های مدل مورد ارزیابی واقع شود. مقایسه های صورت پذیرفته حاکی از آن است که با در نظر گرفتن فرآیندهای ثانویه، پیش بینی مدل بطور چشمگیری ارتقاء یافته است. این موضوع مورد تایید قرار گرفته است



## خ

که افزودن فرآیند ۷، که به معنای عمل سه فرآیند ایرینگ به موازات یکدیگر است، باعث پیش بینی بهتر مدل در خصوص تنش تسلیم ماده و رفتار تنش-کرنش (پس از تسلیم) در نرخ کرنش های بالاتر از  $6000 \text{ s}^{-1}$  می شود.

یک مدل بنیادی آدیباتیک نیز در این مطالعه برای تغییر شکل های بزرگ پلی کربونیت Makrolon<sup>TM</sup> در نرخ کرنش های بالا پیشنهاد گردیده است. در شرایطی که نرخ کرنش به اندازه کافی بزرگ باشد، بطوریکه گرمای ایجاد گردیده در نمونه زمان کافی برای انتقال به محیط پیرامون را نداشته باشد، دمای ماده افزایش می یابد. بسته به جنس ماده انتخاب گردیده، تغییر شکل در نرخ کرنش های بالا ممکن است به طرز قابل توجهی از ثوابت الاستیک وابسته به دما و نرم شوندگی حرارتی تاثیر بپذیرد. با در نظر گرفتن مدل بنیادی تک دمایی (همدمایی) که در این تحقیق ارائه گردیده، یک مدل بنیادی آدیباتیک برای پیش بینی رفتار تسلیم و پس از تسلیم پلیمرهای آمورف پیشنهاد شده است. با محاسبه گرمای تولید شده و تغییرات دمایی حین شبیه سازی مرحله به مرحله فرآیند تغییر شکل، ثوابت الاستیک وابسته به دما در روابط بنیادین بکار گرفته شده اند. علاوه بر این، پیش بینی بهتری از پدیده نرم شوندگی ضمن ارائه تعریف جدیدی برای پارامترهای نرم شوندگی در مدل پیشنهادی، حاصل گردیده است. مقایسه نتایج پیش بینی های مدل آدیباتیک با نتایج تجربی و همینطور پیش بینی های مدل همدمای، مشخص می سازد که این مدل در تعیین ویژگی های اساسی منحنی تنش-کرنش در نرخ کرنش های بسیار بالا از قابلیت لازم برخوردار است.

جنبه تحلیلی و عددی این مطالعه پس از گسترش مدل های بنیادی به پیاده سازی مدل های مذکور در کد اجزاء محدود ABAQUS سوق پیدا کرده است. این مهم با نگارش سابروتین های مقتضی توصیف کننده رفتار ماده (VUMAT) تحقق یافته است، بطوریکه تلاش فراوانی در خصوص تهیه سابروتین های مناسب صورت پذیرفته است.

در یک نگاه کلی، مقایسه نتایج پیش بینی های مدل های پیشنهاد گردیده با نتایج تست های صورت پذیرفته، توانایی مدل های مذکور را در بیان ویژگی های ذاتی منحنی تنش-کرنش همچون نمود الاستیسیته خطی آغازین، بروز تنش تسلیم عمومی، نرم شوندگی کرنش و سخت شوندگی کرنشی حین تغییر شکل با نرخ کرنش های بسیار بالا (فرا تر از  $10000 \text{ s}^{-1}$ ) مشخص می سازد.

## فهرست تفصیلی مطالب

صفحه

### بخش اول: مقدمه و پیشینه تحقیق

۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱: شناخت پلیمرها
۳	۱-۱-۱: انتقال در رفتار پلیمرها
۴	۲-۱-۱: الاستیسیته در پلیمرها
۶	۳-۱-۱: رفتار نمونه یک پلیمر آمورف و تاثیر نرخ کرنش
۹	۲-۱: تبیین اهداف پروژه
۱۱	۳-۱: چگونگی ارائه مطالب ( ساختار پایان نامه)
۱۴	فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق
۱۵	۱-۲: مدل های تئوری اولیه برای جریان پلاستیک وابسته به نرخ یک پلیمر
	۲-۲: مشاهدات انتقال ثانویه در رفتار پلیمر و مدل های تکامل یافته برای جریان پلاستیک وابسته به نرخ
۲۰	یک پلیمر
۳۰	۳-۲: روش های انجام تست ها در نرخ کرنش های بالا و مدل های تئوری ارائه گردیده در این محدوده
	۴-۲: مدل های بنیادی توصیف کننده رفتار تنش-کرنش پلیمرها در گستره های محدود دمایی و
۴۲	نرخ کرنش

### بخش دوم: مبانی تئوری مورد نیاز

۵۴	فصل سوم: تئوری میله فشاری هاپکینسون (SHPB)
۵۵	۱-۳: تاریخچه SHPB
۵۵	۲-۳: توضیحات روش SHPB
۵۷	۳-۳: تئوری SHPB
۶۰	۴-۳: شرح روش SHPB
۶۲	۵-۳: آنالیز و پردازش داده ها در تست های SHPB
۶۲	۱-۵-۳: تاثیر موج برخورد بر بار اعمالی بر نمونه
۶۳	۲-۵-۳: مشکلات مورد انتظار در پردازش داده ها

۶۵	۳-۶: پدیده پراکندگی
۶۶	۳-۶-۱: معادلات پوکامر و چری برای میله های استوانه ای
۶۹	۳-۶-۲: تحلیل لی و لامبروس برای مسئله پراکندگی در میله های استوانه ای
۷۳	۳-۷: تعادل تنش
۷۵	۳-۷-۱: تاثیر ضخامت نمونه
۷۷	۳-۷-۲: تاثیر نرخ بارگذاری
۷۹	۳-۷-۳: زمان تعادل و پارامترهای موثر در آن
۸۱	۳-۸: تاثیر اندازه و شکل نمونه در تست های SHPB
۸۲	۳-۸-۱: بررسی اثر نسبت طول به قطر (L/D)

## بخش سوم : آزمایش های تجربی

۸۴	فصل چهارم: طراحی و ساخت دستگاه تست تجربی
۸۵	۴-۱: مقدمه
۸۶	۴-۲: نکاتی در خصوص انتخاب هندسه میله های فشاری هایپکینسون
۸۸	۴-۲-۱: تاثیرات اندازه نمونه
۹۱	۴-۳: طراحی و ساخت دستگاه برای اعمال ضربه
۹۴	۴-۳-۱: بخش پنوماتیک
۹۸	۴-۳-۲: بوش های هدایت کننده میله ضربه زننده
۹۹	۴-۳-۳: سیستم اتلاف ( جذب ) انرژی
۱۰۰	۴-۴: نصب کرنش سنج ها ( مبدل های جا بجایی)
۱۰۰	۴-۵: پردازش سیگنال
۱۰۳	۴-۵-۱: پردازشگر سیگنال
۱۰۴	۴-۵-۲: ثبت سیگنال
۱۰۴	۴-۵-۳: ماشه
۱۰۵	۴-۶: کد های عددی کمکی

۱۰۷	فصل پنجم: اهداف و روش انجام آزمایش های تجربی
۱۰۸	۵-۱: مقدمه
۱۰۸	۵-۲: اهداف
۱۰۸	۵-۲-۱: آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی (DMTA)
۱۰۸	۵-۲-۲: تست میله فشاری هایپکینسون ( SHPB )

۱۰۹	۳-۵: متغیر های آزمایش ها
۱۰۹	۱-۳-۵: آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی (DMTA)
۱۱۰	۲-۳-۵: تست میله فشاری هایپکینسون (SHPB)
۱۱۰	۴-۵: مواد و آماده سازی نمونه ها
۱۱۰	۱-۴-۵: موارد مورد استفاده در آزمایش ها
۱۱۱	۲-۴-۵: آماده سازی نمونه ها
۱۱۱	۵-۵: روند و چگونگی انجام آزمایش ها
۱۱۱	۱-۵-۵: تست های آنالیز مکانیکی دینامیکی
۱۱۵	۲-۵-۵: تست های میله فشاری هایپکینسون

### فصل ششم: نتایج آزمایش های تجربی و مشاهدات

۱۱۹	۱-۶: مقدمه
۱۲۰	۲-۶: نتایج آنالیز مکانیکی دینامیکی
۱۲۰	۱-۲-۶: پلی کربونیت Lexan
۱۲۲	۲-۲-۶: پلی کربونیت Makrolon
۱۲۴	۳-۶: نتایج تست های میله فشاری هایپکینسون
۱۲۴	۱-۳-۶: پلی کربونیت Lexan
۱۲۸	۲-۳-۶: پلی کربونیت Makrolon
۱۳۰	۴-۶: محاسبات
۱۳۰	۱-۴-۶: روش جداسازی / انتقال / بازسازی مربوط به آنالیز دینامیکی مکانیکی

### فصل هفتم: آنالیز و بحث نتایج تست های میله فشاری هایپکینسون

۱۳۷	۱-۷: آنالیز نتایج پلی کربونیت Lexan
۱۳۸	۲-۷: آنالیز نتایج پلی کربونیت Makrolon
۱۴۳	

## بخش چهارم: ارائه مدل های بنیادی و تهیه زیر برنامه (سابروتین) برای پیاده

### سازی مدل ها

۱۴۵	فصل هشتم: مدل بنیادی سه بعدی در نرخ کرنش های بالا
۱۴۶	۱-۸: مقدمه
۱۴۷	۲-۸: مدل بنیادی در نرخ کرنش های بالا

۱۴۹	۱-۲-۸: کینماتیک مدل
۱۵۳	۲-۲-۸: روابط بنیادی
۱۵۷	۳-۲-۸: ثوابت ماده، متدولوژی استخراج آنها
۱۶۲	۳-۸: نگارش زیر برنامه (سابروتین) VUMAT جهت پیاده سازی مدل
۱۶۳	۴-۸: نتایج مدل و مقایسه با نتایج تجربی
<b>فصل نهم: مدل بنیادی آدیاباتیک</b>	
۱۶۸	
۱۶۹	۱-۹: مقدمه
۱۷۰	۲-۹: هدایت گرمایی و پاسخ حرارتی
۱۷۴	۳-۹: مدل بنیادی آدیاباتیک
۱۷۴	۱-۳-۹: کینماتیک مدل
۱۷۷	۲-۳-۹: روابط بنیادی
۱۸۰	۳-۳-۹: تاثیر گرمای تولید شده در مدل و تصحیح نرم شوندگی کرنشی
۱۸۶	۴-۳-۹: ثوابت ماده، متدولوژی استخراج آنها
۱۸۸	۴-۹: نگارش زیر برنامه (سابروتین) VUMAT جهت پیاده سازی مدل
۱۸۸	۵-۹: نتایج مدل و مقایسه با نتایج تجربی
<b>فصل دهم: نتیجه گیری</b>	
۱۹۲	
۱۹۳	۱-۱۰: مقدمه
۱۹۳	۲-۱۰: پلی کربونیت Lexan و مدل بنیادی جدید
۱۹۶	۳-۱۰: پلی کربونیت Makrolon و مدل بنیادی آدیاباتیک
۱۹۸	۴-۱۰: پیشنهاد فعالیت های آینده

## پیوست ها

۲۰۰	پیوست الف: انتشار امواج الاستیک
۲۰۱	الف-۱: پدیده انتشار امواج الاستیک
۲۰۱	الف-۱-۱: مقدمه
۲۰۲	الف-۱-۲: تئوری انتشار امواج الاستیک در محیط های پیوسته
۲۰۶	الف-۱-۳: کاربرد تئوری عمومی امواج الاستیک در موارد خاص
۲۱۰	الف-۱-۴: انواع موج الاستیک
۲۱۱	الف-۱-۵: معادله انتشار موج در میله های استوانه ای
۲۱۳	الف-۱-۶: حل عمومی برای معادله موج در محیط تک جهته
۲۱۵	الف-۲: مقاومت مکانیکی

- ۲۱۶ الف-۲-۱: انعکاس امواج الاستیک در ناپیوستگی ها ناشی از تغییرات مقاومت مکانیکی
- ۲۲۳ الف-۳: انتشار موج تغییر شکل پلاستیک
- ۲۲۹ پیوست ب: آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی (DMTA)
- ۲۳۰ ب-۱: آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی چگونه صورت می پذیرد
- ۲۳۴ لیست مقالات ارائه شده در دوره دکتری
- ۲۳۵ منابع

## فهرست جداول

صفحه

### فصل پنجم

جدول ۵-۱: خواص مکانیکی پلی کربونیت Makrolon™ ۱۱۱

### فصل ششم

جدول ۶-۱: ضرایب جابجایی انتقال های ویسکو الاستیک برای پلی کربونیت Lexan™ ۱۳۲

جدول ۶-۲: ضرایب جابجایی انتقال های ویسکو الاستیک برای کربونیت Makrolon™ ۱۳۵

### فصل هشتم

جدول ۸-۱: ثوابت ناده برای توصیف مولفه های الاستیک مدل در نرخ کرنش  $(s^{-1})$  ۱۰۰۲۰

و دمای  $(^{\circ}C)$  ۲۰ ۱۵۸

جدول ۸-۲: پارامتر های مدل پیشنهاد گردیده ۱۶۱

### فصل نهم

جدول ۹-۱: تجزیه مدول الاستیک به مولفه های  $\alpha$  و  $\beta$  در دو نرخ کرنش  $s^{-1}$  ۴۶۰۰

و  $s^{-1}$  ۱۱۳۰۰. روابط ضمن تطابق چند جمله ها با داده ها استخراج گردیده اند. ۱۸۳

جدول ۹-۲: مقایسه مدل های آدیاتیکی و مدل همدمای پیشنهادی ۱۸۶

جدول ۹-۳: ثوابت ماده مورد مطالعه جهت استفاده در مدل آدیباتیک ۱۸۷

### پیوست الف

جدول الف-۱: روابط بین امواج ورودی، انتقال و انعکاس در ناپیوستگی های متفاوت ۲۲۳

## فهرست تصاویر

صفحه

## فصل اول

- شکل ۱-۱: تغییرات مدول دینامیک به دما برای نایلون شامل مقادیر متفاوت آب یا متانول ۴
- شکل ۱-۲: رفتار تنش-کرنش (حقیقی) پلی کربونیت (PC) در فشردگی تک محوره تحت  
نرخ کرنش  $10^{-3} s^{-1}$  ۷
- شکل ۱-۳: رفتار تنش-کرنش (حقیقی) PMMA در فشردگی تک محوره در چهار نرخ کرنش ۸

## فصل دوم

- شکل ۲-۱: مدل تنش تسلیم ایرینگ (Eyring) منطبق گشته بر داده های PC ۱۶
- شکل ۲-۲: مقایسه نتایج مدل تنش تسلیم آرگون (Argon) و داده های پلی اتیلن در ۷ نرخ کرنش ۱۹
- شکل ۲-۳: مقاومت تسلیم کششی PMMA تابعی از نرخ تغییر شکل و دما، خط مایل d محل وقوع انتقال های ثانویه ی محتمل را مشخص می سازد. ۲۱
- شکل ۲-۴: داده های تسلیم روتلینگ (Roetling) که برای تطبیق با نتایج تجربی PMMA از مدل ری-ایرینگ (Ree-Eyring) بهره برده است. ۲۲
- شکل ۲-۵: داده های تسلیم روتلینگ (Roetling) که برای تطبیق با نتایج تجربی PMEA از مدل ری-ایرینگ (Ree-Eyring) بهره برده است. ۲۳
- شکل ۲-۶: وابستگی استحکام تسلیم PC به دما در هر دو حالت کششی و فشاری. تست ها در نرخ کرنش  $10^{-1} s^{-1} \times 4.16$  انجام گرفته اند. ۲۴
- شکل ۲-۷: وابستگی تنش تسلیم پلی اتیلن به دما و نرخ کرنش. برای تطبیق با داده های تجربی از رابطه ری-ایرینگ استفاده شده است. تست ها در چهار نرخ کرنش متفاوت صورت گرفته اند. ۲۸
- شکل ۲-۸: نمایی از یک سیستم میله فشاری هاپکینسون ۳۱
- شکل ۲-۹: سیگنال های نمونه از تست میله فشاری هاپکینسون بروی PC ۳۲



- شکل ۲-۱۰: رفتار تنش- کرنش فشاری PVC در پنج نرخ کرنش متفاوت ۳۵
- شکل ۲-۱۱: داده های تسلیم PC تابعی از دما و نرخ کرنش تطبیق داده شده با مدل دو فرآینده ری- ایرینگ در هفت دمای متفاوت ۳۷
- ۲-۱۲: داده های تسلیم PC تابعی از دما و نرخ کرنش، تطبیق داده شده با دو مدل مشارکتی و ری- ایرینگ ۴۰
- شکل ۲-۱۳: داده های تسلیم سه پلیمر PC ، PAI و PMMA تابعی از دما و نرخ کرنش تطبیق داده شده با مدل مشارکتی ۴۱
- شکل ۲-۱۴: تعبیر جریان شناختی از مدل ریاضی هاوارد (Haward) ارائه شده برای تغییر شکل های بزرگ پلیمر های شیشه ای ۴۳
- شکل ۲-۱۵: رفتار تنش-کرنش وابسته به نرخ PMMA که از مدل BPA برای تطبیق با داده های تجربی استفاده شده است. ۴۸
- شکل ۲-۱۶: نمایش مدل سه زنجیره از یک شبکه ملکولی در حالات الف) تغییر شکل نیافته ب) کشش تک محوره ج) کشش دو محوره ۴۹
- شکل ۲-۱۷: نمایش مدل هشت زنجیره از یک شبکه ملکولی در حالات الف) تغییر شکل نیافته ب) کشش تک محوره ج) کشش دو محوره ۵۰
- شکل ۲-۱۸: ترسیم رفتار تنش-کرنش PC در حالات فشردگی تک محوره و صفحه ای به منظور مقایسه مدل آرودا و بویس با داده های تجربی ۵۱
- شکل ۲-۱۹: ترسیم رفتار تنش-کرنش PMMS در حالات فشردگی تک محوره و صفحه ای به منظور مقایسه مدل آرودا و بویس با داده های تجربی ۵۲
- فصل سوم**
- شکل ۳-۱: جابجایی ها، کرنش ها و نیرو ها حین تست میله فشاری هاپکینسون ۶۰
- شکل ۳-۲: دیاگرام جابه جایی- زمان امواج برخورد، انعکاس و انتقال در تست SHPB ۶۱
- شکل ۳-۳: موج برخورد و بار اعمالی به نمونه ۶۳

- شکل ۳-۴: مشاهده پراکندگی حین انتشار موج ۶۶
- شکل ۳-۵: دستگاه مختصات استوانه ای و المان سطحی بکار گرفته شده ۶۷
- شکل ۳-۶: تاثیر تعداد فرکانس ها در پراکندگی موج (a) انتشار رو به جلو (b) انتشار رو به سمت عقب ۷۲
- شکل ۳-۷: نمونه ای از تاریخچه بارگذاری برای موج برخورد ۷۵
- شکل ۳-۸: تاثیرات ضخامت نمونه (لاستیک سیلیکون RTV) بر روی تعادل دینامیکی تحت نرخ بارگذاری ثابت  $1.25 \times 10.5 \text{ MPa}$  ۷۷
- شکل ۳-۹: تاثیرات نرخ بارگذاری نمونه (لاستیک EPDM) بر روی تعادل دینامیکی تحت ضخامت ثابت  $1.6 \text{ mm}$  ۷۸
- شکل ۳-۱۰: تاثیر نسبت طول به قطر در تنش، کرنش و نرخ کرنش در تست های SHPB ۸۳

## فصل چهارم

- شکل ۴-۱: نمای شماتیکی از وسیله میله فشاری هاپکینسون ۸۶
- شکل ۴-۲: دیاگرام جابجایی-زمان برای دستگاه میله فشاری ۸۸
- شکل ۴-۳: تصاویر دستگاه میله فشاری هاپکینسون مورد استفاده ۹۲
- شکل ۴-۴: تصویر ساختار در نظر گرفته شده برای کالیبراسیون میله ها ۹۴
- شکل ۴-۵: واحد پنوماتیک شامل شیر ها و مخزن ذخیره ۹۵
- شکل ۴-۶: جعبه کنترل ۹۶
- شکل ۴-۷: چگونگی محاسبه سرعت میله ضربه زننده ۹۷
- شکل ۴-۸: نقش بوش های (درزگیرهای) میله ضربه زننده در ایجاد پالس تغییر شکل ۹۸
- شکل ۴-۹: دو نمونه از بوش های استفاده شده برای هدایت میله ضربه زننده ۹۹
- شکل ۴-۱۰: مکانیزم در نظر گرفته شده برای جذب انرژی و سکون میله انتقال ۱۰۰
- شکل ۴-۱۱: چگونگی قرار گیری کرنش سنج ها و تشکیل پل وتستون ۱۰۱
- شکل ۴-۱۲: تصاویری از میله مجهز به کرنش سنج ۱۰۲

شکل ۴-۱۳: پردازشگر سیگنال مورد استفاده ۱۰۳

### فصل پنجم

شکل ۵-۱: نمونه ای از قالب های فولادی تهیه شده برای ساخت نمونه ها ۱۱۲

شکل ۵-۲: دستگاه پرس گرم (واقع در پژوهشگاه پلیمر) ۱۱۲

شکل ۵-۳: دستگاه آنالیز دینامیکی مکانیکی ۱۱۵

شکل ۵-۴: تصویری از دستگاه تست میله فشاری هاپکینسون ۱۱۶

شکل ۵-۵: نمونه پلیمری در میان میله های برخورد و انتقال ۱۱۷

شکل ۵-۶: پردازشگر سیگنال (تصویر بالا) به همراه نوسان سنج و سیستم کامپیوتری حاوی

نرم افزارهای مربوطه (تصویر پایین) ۱۱۸

### فصل ششم

شکل ۶-۱: مدول ذخیره (خط پر) و مدول اتلاف (خط چین) پلی کربونیت Lexan توابعی از دما

در فرکانس ۱ هرتز. ۱۲۲

شکل ۶-۲: مدول ذخیره پلی کربونیت Makrolon تابعی از دما در فرکانس ۱ هرتز. ۱۲۳

شکل ۶-۳: تانژانت اتلاف (خط پر) و مدول اتلاف (خط چین) پلی کربونیت Makrolon

توابعی از دما در فرکانس ۱ هرتز. ۱۲۴

شکل ۶-۴: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan در نرخ کرنش  $S^{-1}$  ۹۱۰ ۱۲۵

شکل ۶-۵: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan در نرخ کرنش  $S^{-1}$  ۲۰۴۶ ۱۲۵

شکل ۶-۶: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan در نرخ کرنش  $S^{-1}$  ۳۳۴۴ ۱۲۶

شکل ۶-۷: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan در نرخ کرنش  $S^{-1}$  ۳۹۴۳ ۱۲۶

شکل ۶-۸: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan در نرخ کرنش  $S^{-1}$  ۵۷۴۰ ۱۲۷

شکل ۶-۹: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan در نرخ کرنش  $S^{-1}$  ۸۲۰۰ ۱۲۷

شکل ۶-۱۰: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan در نرخ کرنش  $S^{-1}$  ۱۰۰۲۰ ۱۲۸

- شکل ۱۱-۶: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Makrolon در نرخ کرنش  $1 S^{-1}$  ۱۲۹
- شکل ۱۲-۶: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Makrolon در نرخ کرنش  $4600 S^{-1}$  ۱۲۹
- شکل ۱۳-۶: نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلی کربونیت Makrolon در نرخ کرنش  $11300 S^{-1}$  ۱۳۰
- شکل ۱۴-۶: تانژانت اتلاف ( $\tan \delta$ ) تابعی از دما و نرخ کرنش در محدوده دمایی نزدیک دمای انتقال شیشه ۱۳۱
- شکل ۱۵-۶: نمودار مرجع مدول الاستیک پلی کربونیت Lexan تجربه گردیده به مولفه های  $\alpha, \beta, \gamma$  ۱۳۳
- شکل ۱۶-۶: پیش بینی مدول الاستیک پلی کربونیت Lexan در چهار نرخ کرنش در محدوده  $6 \times 10^{-4} S^{-1}$  تا  $6 \times 10^4 S^{-1}$  با استفاده از روش DSR ۱۳۳
- شکل ۱۷-۶: پیش بینی مدول الاستیک پلی کربونیت Lexan در نرخ کرنش های بالاتر از  $6 \times 10^3 S^{-1}$  ۱۳۴
- شکل ۱۸-۶: پیش بینی مدول الاستیک پلی کربونیت Makrolon در چهار نرخ کرنش در محدوده  $6 \times 10^{-4} S^{-1}$  تا  $10^5 S^{-1}$  با استفاده از روش DSR ۱۳۶

### فصل هفتم

- شکل ۱-۷: نمودار های تنش-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan و نرخ کرنش های مربوطه ۱۳۸
- شکل ۲-۷: نمودار های تنش-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan در محدوده وسیعی از نرخ کرنش ۱۴۰
- شکل ۳-۷: نمودار های تنش-کرنش حقیقی پلی کربونیت Lexan در دو نرخ کرنش ۱۴۲
- شکل ۴-۷: نمودار های تنش-کرنش حقیقی پلی کربونیت Makrolon در محدوده وسیعی از نرخ کرنش  $8200 S^{-1}$  و  $10020 S^{-1}$  به منظور بررسی تغییرات ویژگی سخت شوندگی کرنشی ۱۴۴