بسم الله الرحمن الرحيم

مدیریت تحصیلات تکمیلی

## تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب **محفوظ سهرابی فرد** متعهد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب بوده و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکرگردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی اثر متعلق به دانشگاه شهید رجایی می‌باشد.

محفوظ سهرابی‌فرد

تهران – لویزان –کدپستی ۱۶۷۸۸-صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۸۵ تلفن ۹-۲۲۹۷۰۰۶۰
(داخلی ۲۳۴۷)نمابر ۲۲۹۷۰۰۱۱ پست الکترونیک sru@sru.ac.ir

دانشکده مهندسی مکانیک

# فرآیند کشش عمیق
# به کمک ارتعاشات التراسونیک

**نگارش**
**محفوظ سهرابی فرد**

**استاد راهنما :دکتر امیر عبداله**
**استاد مشاور: دکتر بنی مصطفی عرب**

**پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد**
**در رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت وتولید**

شهریور ۱۳۸۹

**تقدیم :**

**تحقق این پژوهش را اگر منزلتی باشد، بی دریغ نثار آن دو بزرگوار،**

# پدر و مادر عزیزم،

**می‌نمایم.**

**تقدیر و تشکر:**

بدینوسیله نهایت سپاس و امتنان خود را از استاد راهنمای عزیز و دلسوزم جناب آقای **دکتر امیر عبداله**، که در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه مرا یاری فرموده و در این راه از هیچ کمکی دریغ ننمودند، اعلام می‌دارم. همچنین از رهنمودهای ارزندهٔ استاد مشاور محترم، جناب آقای **دکتر بنی مصطفی عرب**، و نیز از زحمات بی شائبهٔ همکاران عزیزی چون آقایان احمد قضوی، حمید نیک سیرت، حسن معظّمی، محمد احمدی و همکاری‌های دوستان عزیزی چون مهندس سعید باقرزاده، مهندس رضوان عابدینی، مهندس وحید فرتاشوند، مهندس میدیا محمودی-نودشه، مهندس محسن صالحی‌راد، مهندس رامین درویش، سرکار خانم مهندس زهره صمدی و سایر دوستان عزیزی که مرا در انجام این پژوهش یاری نمودند، تشکر و قدردانی نموده و سلامتی و توفیق روزافزون را از خداوند منّان برایشان آرزومندم.

## چکیده

شکل‌دهی ورق، یکی از مهمترین روش‌های تولید می‌باشد. خصوصیاتی چون انعطاف پـذیری، کمـیِ وزن، قابلیت شکل‌پذیری زیاد، پرداخت خوب سطح و هزینه‌ی پایین تولید قطعاتی که با اسـتفاده از ایـن روش‌هـا تولید می‌شوند، باعث توسعه و گسترش دامنه‌ی کاربرد این روش‌ها و تنـوع تولیـدات حاصـل از آن‌هـا شـده است. در این راستا، فرآیند کشش عمیق یکی از روش‌های شکل‌دهی ورق بـوده کـه امـروزه بـه عنـوان یـک فرآیند تولیدی جهت ساخت قطعاتی نظیر بدنه‌ی خودرو، هواپیما و همچنین سـاخت قسـمت‌هـای مختلـف لوازم خانگی، الکترونیک و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند به لحاظ پیچیدگی و حساسـیت فـراوان، دقت محاسباتی بالایی را در طراحی و ساخت قالب‌هـای آن مـی طلبـد. در غیـر ایـن صـورت ورق در حـین شکل‌دهی، به دلیل عدم کنترل صحیح جریان فلز تحت تغییرشکل، دچار عیوبی نظیر چـین‌خـوردگی و یـا پارگی خواهد شد. در این پژوهش سعی شد که با اعمال ارتعاشات التراسـونیک بـه گلـوئی ورودی مـاتریس، نیروی مورد نیاز جهت شکل‌دهی ورق فولادی St12 به ضخامت ۰/۵ میلیمتـر را کـاهش داده و نسـبت حـد کشش ورق را افزایش داد. برای این منظور با استفاده از آنالیز تحلیلی و شبیه‌سـازی فرآینـد بـه روش المـان محدود و همچنین انجام آزمایش‌های تجربی، نتایج حاصله در شرایط بـا و بـدون ارتعاشـات التراسـونیک بـا یکدیگر مقایسه شد. نتایج این مقایسه نشان داد که با اعمال ارتعاشـات التراسـونیک، نیـروی شـکل‌دهـی در شبیه‌سازی ۱۰/۸٪ و در حالت تجربی ۱۱/۳٪ کاهش یافت و نیز نسبت حد کشش در شـبیه‌سـازی بـا ۹/۵٪ افزایش از ۲/۱ به ۲/۳ و در حالت تجربی با ۴/۵٪ افزایش، از نسبت حد کشش ۲/۲ به ۲/۳ افزایش یافت.



**واژه‌های کلیدی:**

کشش عمیق، ارتعاشات التراسونیک، روش المان محدود، نیروی شکل‌دهی، نسبت کشش، چین‌خـوردگی ورق، پارگی ورق.

## فهرست مطالب

عنوان صفحه


چکیده ..... ب
فهرست مطالب ..... ج
فهرست جداول ..... ح
فهرست اشکال ..... ط
فهرست علائم اختصاری ..... ع

**فصل۱ ..... ۱**

**مقدمه ..... ۱**

۱-۱. مقدمه ..... ۲
۱-۲. تاریخچهٔ التراسونیک ..... ۲
۱-۳. تاریخچهٔ کاربرد ارتعاشات التراسونیک پر قدرت در شکل‌دهی فلزات: ..... ۴
۱-۴. تاریخچهٔ روش‌های تولید ارتعاشات التراسونیک پرقدرت ..... ۸
۱-۵. آنالیز خواص ارتعاشات (خواص ارتعاشی) ..... ۹
۱-۶. شیوه‌های نوین در اعمال ارتعاشات التراسونیک به قالب کشش عمیق ..... ۱۰
۱-۷. هدف از انجام تحقیق ..... ۱۴
۱-۸. مروری بر فصول پایان‌نامه ..... ۱۴

**فصل۲ ..... ۱۶**

**التراسونیک ..... ۱۶**

۲-۱. مقدمه ..... ۱۷
۲-۲. آکوستیک ..... ۱۷
۲-۳. امواج ..... ۱۸
*۲-۳-۲. امواج صوتی ..... ۱۸*
*۲-۳-۳. ویژگی‌های امواج التراسونیک ..... ۱۹*
*۲-۳-۴. انواع امواج التراسونیک ..... ۲۰*
۲-۴. تولید ارتعاشات التراسونیک ..... ۲۰
*۲-۴-۱. ساختمان و اجزاء مولد ارتعاشات التراسونیک ..... ۲۱*

**فصل۳ ..... ۲۶**

**فرآیند کشش عمیق ..... ۲۶**

۳-۱. مقدمه ..... ۲۷
۳-۲. پارامترهای فرآیند کشش عمیق ..... ۲۷
۳-۳. بررسی معادلات تنش وکرنش ورق در فرآیندکشش عمیق ..... ۲۸
*۳-۳-۱. تنش در ناحیهٔ فلنج ..... ۳۰*

۳-۳-۲. تنش در ناحیهٔ شعاع پروفیل ماتریس ۳۱
۳-۳-۳. تنش در ناحیهٔ دیواره ۳۱
۳-۳-۴. تنش در ناحیهٔ شعاع پروفیل سنبه ۳۲
۳-۳-۵. تنش در کف ظرف ۳۲
۳-۳-۶. کرنش در ناحیهٔ فلنج ۳۲
۳-۳-۷. کرنش در ناحیهٔ شعاع پروفیل ماتریس ۳۳
۳-۳-۸. کرنش در ناحیهٔ دیوارهٔ ظرف ۳۳
۳-۳-۹. کرنش در ناحیهٔ شعاع پروفیل سنبه ۳۳
۳-۳-۱۰. کرنش در ناحیهٔ کف ظرف ۳۳
۳-۳-۱۱. کرنش ضخامتی $\varepsilon t$ در فلنج ۳۴
۳-۳-۱۲. نسبت حد کشش (LDR) ۳۵
۳-۳-۱۳. اثر اصطکاک ورق‌گیر ۳۶
۳-۳-۱۴. اثر خمش و خم‌گشایی در لبهٔ ماتریس ۳۸
۳-۳-۱۵. اثر اصطکاک در شعاع لبهٔ ماتریس ۳۹
۳-۴. عیوب کشش عمیق ۴۰

**فصل۴ ۴۱**

**بررسی تحلیلی تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر تغییرشکل پلاستیک در فرآیند کشش عمیق ۴۱**

۴-۱. مقدمه ۴۲
۴-۲. ارائه مدل تغییرات الاستیک - پلاستیک در فرآیند کشش عمیق ۴۳
۴-۳. مدلسازی اعمال ارتعاشات التراسونیک بر فرآیند کشش عمیق ۴۴

**فصل۵ ۵۳**

**مدلسازی اعمال ارتعاشات التراسونیک به فرآیند کشش عمیق به کمک نرم افزار المان محدودABAQUS ۵۳**

۵-۱. مقدمه ۵۴
۵-۲. تشریح مراحل مدلسازی فرآیند کشش عمیق التراسونیکی ۵۵
۵-۲-۱. طراحی هندسی مدل فرآیند کشش عمیق ۵۵
۵-۲-۲. تعریف خواص مکانیکی اجزاء در مدلسازی ۵۶
۵-۲-۳. تعریف معیار وقوع پارگی ۶۰
۵-۲-۴. تعیین نوع حلگر و سرعت فرآیند ۶۱
۵-۲-۵. تعیین تماس ابزار و ورق ۶۳
۵-۲-۶. تعیین بارگذاری و شرایط مرزی ۶۴
۵-۲-۷. مش‌بندی ۶۶
۵-۲-۸. پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی ۶۷
۵-۳. نتایج حاصل از شبیه‌سازی **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

**فصل۶ ۶۸**

**طراحی و ساخت قالب کشش عمیق التراسونیکی ۷۶**

۶-۱. مقدمه : ۶۹
۶-۲. محاسبات طراحی قالب کشش عمیق التراسونیکی ۶۹
*۶-۲-۱. محاسبات مربوط به ابعاد هندسی ماتریس ۶۹*
*۶-۲-۲. محاسبات مربوط به طراحی سنبه: ۷۲*
*۶-۲-۳. محاسبات مربوط به طراحی ورقگیر ۷۳*
*۶-۲-۴. محاسبهٔ نیروی کشش در حالت استاتیک(بدون حضور ارتعاشات التراسونیک) ۷۳*
*۶-۲-۵. محاسبهٔ نیروی ورق‌گیر پرس‌های دوکاره(Double Action) ۷۴*
۶-۳. آنالیز مُدال ماتریس شیپوره‌ای ۷۶
۶-۴. ساخت و مونتاژ کفشک بالا(ماتریس التراسونیک) ۷۷
۶-۵. ساخت و مونتاژ مجموعهٔ کفشک پائین (شامل سنبه و ورق‌گیر) ۸۳
۶-۶. طراحی و ساخت ترانسدیوسر التراسونیک با فرکانس رزونانس ۲۰ کیلوهرتز ۸۴
۶-۷. مونتاژ مجموعهٔ قالب کشش عمیق التراسونیکی ۸۵

**فصل۷ ۸۶**

**مراحل انجام آزمون‌های عملی کشش عمیق به کمک ارتعاشات التراسونیک ۸۶**

۷-۱. مقدمه ۸۷
۷-۲. معرفی لوازم مورد نیاز جهت انجام آزمون ۸۷
*۷-۲-۱. قالب کشش عمیق التراسونیک ۸۷*
*۷-۲-۲. دستگاه پرس هیدرولیک دوکاره(Double action) ۸۸*
*۷-۲-۳. ژنراتور التراسونیک ۸۸*
*۷-۲-۴. ترانسدیوسر التراسونیک ۸۹*
*۷-۲-۵. اسیلوسکوپ ۹۰*
*۷-۲-۶. دینامومتر KISTLER-type 9255B ۹۰*
*۷-۲-۷. دستگاه ثبت اطلاعات(Data Logger) ۹۱*
*۷-۲-۸. کامپیوتر شخصی(PC) مجهز به نرم‌افزار Dynoware ۹۱*
*۷-۲-۹. ورق St12 ۹۲*
*۷-۲-۱۰. سایر لوازم ۹۳*
۷-۳. مراحل مونتاژ قالب بر روی دستگاه پرس هیدرولیک ۹۳
*۷-۳-۱. نصب دینامومتر KISTLER بر روی دستگاه پرس هیدرولیک ۹۳*
*۷-۳-۲. نصب کفشک بالای قالب کشش عمیق بر روی دستگاه پرس هیدرولیک ۹۴*
*۷-۳-۳. نصب کفشک پائین قالب کشش عمیق بر روی دستگاه پرس هیدرولیک ۹۵*
*۷-۳-۴. نصب سیستم ورق‌گیر در پرس‌های هیدرولیک دوکاره(Double Action) ۹۶*
*۷-۳-۵. نصب ژنراتور التراسونیک و اسیلوسکوپ ۹۸*
*۷-۳-۶. نصب Data Logger و کامپیوتر شخصی به دینامومتر KISTLER ۹۸*
۷-۴. شرایط انجام آزمایش ۹۹
۷-۵. پارامترهای مورد مطالعه ۱۰۰
*۷-۵-۱. متغیرهای ورودی ۱۰۱*
*۷-۵-۲. متغیرهای خروجی ۱۰۱*

۷-۶. طراحی آزمون ..... ۱۰۲
۷-۷. نتایج آزمون‌ها ..... ۱۰۳

**فصل ۸ ..... ۱۰۵**

**بحث و نتیجه‌گیری ..... ۱۰۵**

۸-۱. مقدمه ..... ۱۰۶
۸-۲. نتایج حاصل از آنالیز تئوری ..... ۱۰۶
*۸-۲-۱. نتایج بررسی تحلیلی فرآیند کشش عمیق به کمک ارتعاشات التراسونیک ..... ۱۰۶*
*۸-۲-۲. انتخاب دامنهٔ مناسب، $a$ ..... ۱۰۶*
*۸-۲-۳. محاسبات ..... ۱۰۸*
*۸-۲-۴. رسم نمودارهای سیکل ارتعاشی ..... ۱۱۳*
۸-۳. محاسبهٔ تئوری پارامترهای هندسی فرآیند کشش عمیق ..... ۱۱۴
*۸-۳-۱. شعاع سنبه و ماتریس ..... ۱۱۴*
*۸-۳-۲. شعاع پروفیل لبهٔ سنبه و ماتریس ..... ۱۱۵*
*۸-۳-۳. ضخامت و جنس ورق ..... ۱۱۵*
*۸-۳-۴. قطر بلانک اولیه ..... ۱۱۵*
*۸-۳-۵. ارتفاع فنجانی حاصله از فرآیند کشش ..... ۱۱۵*
*۸-۳-۶. ضریب اصطکاک میان ورق با اجزاء قالب ..... ۱۱۶*
*۸-۳-۷. محاسبهٔ نیروی مورد نیاز جهت کشش عمیق بلانک ..... ۱۱۶*
۸-۴. نتایج حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری ..... ۱۱۸
*۸-۴-۱. اثر افزایش نسبت کشش(DR) بر ماکزیمم نیروی شکل‌دهی ..... ۱۱۸*
*۸-۴-۲. اثر افزایش دامنهٔ ارتعاشی بر ماکزیمم نیروی شکل‌دهی ..... ۱۲۰*
*۸-۴-۳. اثر افزایش ضریب اصطکاک بر ماکزیمم نیروی شکل‌دهی ..... ۱۲۰*
*۸-۴-۴. مقایسهٔ منحنی نیرو – زمان فرآیند کشش عمیق در حالات با و بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک ..... ۱۲۱*
۸-۵. بررسی نتایج حاصل از آزمون تجربی ..... ۱۲۲
*۸-۵-۱. محاسبهٔ نیروی خالص شکل‌دهی ..... ۱۲۳*
*۸-۵-۲. متوسط گیری از منحنی‌های نیروی خالص شکل‌دهی و ترسیم منحنی‌های مقایسه‌ای در حالات با و بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک ..... ۱۲۴*
*۸-۵-۳. ترسیم نمودار میزان کاهش نیروی خالص شکل‌دهی در اثر اعمال ارتعاشات التراسونیک برای هر نسبت کشش و به ازای توان‌های مختلف التراسونیک ..... ۱۲۴*
۸-۶. ترسیم منحنی مقایسه‌ای نیروی خالص شکل‌دهی مابین حالت بدون و با ارتعاشات التراسونیک برای هر نسبت کشش و توان‌های مختلف التراسونیک ..... ۱۲۷
*۸-۶-۲. اثر اعمال ارتعاشات التراسونیک بر نسبت حد کشش(LDR) ..... ۱۲۹*
۸-۷. بررسی دلائل اثر اعمال ارتعاشات التراسونیک بر فرآیند کشش عمیق ..... ۱۳۰
۸-۸. جمع‌بندی از کارهای انجام شده ..... ۱۳۱
*۸-۸-۱. نحوهٔ اعمال ارتعاشات التراسونیک به قالب کشش ..... ۱۳۱*
*۸-۸-۲. نتایج حاصل از آنالیز تئوری ..... ۱۳۱*
*۸-۸-۳. نتایج حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری ..... ۱۳۲*

*۸-۸-۴. نتایج حاصل از آزمون تجربی ..... ۱۳۳*
۸-۹. نتیجه‌گیری ..... ۱۳۵
۸-۱۰. نوآوری تحقیق ..... ۱۳۶
۸-۱۱. شناسائی منابع خطا ..... ۱۳۶
۸-۱۲. پیشنهادها برای مطالعات بعدی ..... ۱۳۷
۸-۱۳. منابع و مآخذ ..... ۱۴۰

# فهرست جداول

**عنوان** **صفحه**


جدول ۱-۱ : نتایج کشش عمیق استوانه‌ای برای ضریب اصطکاک‌های مختلف ورق با اجزاء قالب ..... ۱۳

جدول ۴-۱ : خواص مواد مورد استفاده در آزمایش ایزومی و همکاران (۱۹۶۶) ..... ۵۲

جدول ۵-۱ : مقادیر مربوط به ابعاد تجهیزات قالب در فرآیند ..... ۵۶

جدول ۵-۲ : خواص مکانیکی ورق فولادی وقالب مورد استفاده در مدلسازی فرآیند ..... ۵۷

جدول ۵-۳ : ضرایب ناهمسانگردی ورق فولادی مورد استفاده در نرم افزار ..... ۵۹

جدول۵-۴ : ضرایب اصطکاک سطوح تماسی در فرآیند مدل‌سازی شده ..... ۶۴

جدول ۶-۱ : خواص مکانیکی ورق St 12 و ماتریس شیپوره‌ای تیتانیومی ..... ۷۸

جدول ۶-۲ : مشخصات هندسی قالب ..... ۷۸

جدول ۶-۳ : ضریب تصحیح نیروی کشش ..... ۸۲

جدول۷-۱ : طراحی آزمون ..... ۱۱۱

جدول ۸-۱ : فرضیات مورد استفاده در طراحی و مدلسازی قالب کشش عمیق التراسونیکی ..... ۱۵۱

جدول ۸-۲ : خلاصهٔ نتایج محاسبات تئوری مربوط به کشش عمیق التراسونیکی ..... ۱۵۸

جدول ۸-۳ : خواص مکانیکی ورق St12 ..... ۱۶۰

جدول ۸-۴ : مقادیر تئوری نیروی شکل دهی به ازای ضرائب مختلف اصطکاک ..... ۱۶۲

# فهرست اشکال

عنوان صفحه


شکل۱-۱. یک نمونه از مبدل‌های پیزوالکتریک ۴
شکل۱-۲. روش‌های متنوع اعمال ارتعاشات التراسونیک به قالب کشش عمیق ۱۱
شکل۱-۳. منحنی نسبت حد کشش – نیروی ورقگیر[۸۹] ۱۲
شکل۱-۴. نسبت‌های کشش(LDR) مربوط به ورق فولاد زنگ نزن (SUS304) ۱۲
شکل۲-۱. انتشار امواج طولی در یک محیط الاستیک ۱۸
شکل۲-۲. دو نمونه از تمرکزدهنده‌های طراحی شده و دامنه نوسانی آن‌ها ۲۱
شکل۲-۳. اجزاء اصلی سیستم مولد ارتعاشات التراسونیک ۲۲
شکل۲-۴. توزیع تنش در دو نمونه از تمرکز دهنده‌های التراسونیک ۲۳
شکل۲-۵. یک نوع متدول از این نوع ترانسدیوسر نوع ساندویچی ۲۴
شکل۲-۶. ترانسدیوسر مرکب با طول انتهایی $\lambda / 4$ ۲۵
شکل۳-۱. نواحی مختلف یک فنجانی کشیده شده حاصله از فرآیند کشش عمیق ۲۹
شکل۳-۲. برآیند نیروهای وارده بر ورق در فرآیند کشش عمیق ۲۹
شکل۳-۳. مشخصات هندسی اجزای قالب کشش عمیق ۳۵
شکل۳-۴. دیاگرام آزاد نیروها در فرآیند کشش عمیق ۳۷
شکل۳-۵. آنالیز خمش و خم‌گشایی در ورق ۳۸
شکل۳-۶. آنالیز اصطکاک روی شعاع لبهٔ ماتریس ۳۹
شکل۴-۱. دیاگرام کرنش – نیرو شامل نواحی تغییرشکل الاستیک و پلاستیک ۴۳
شکل۴-۲.A ) مدل المانی یک مادهٔ الاستیک – پلاستیک ایدهآل، B) منحنی کرنش-نیرو تغییرشکل مادهٔ پلاستیکِ ایده آل ۴۴
شکل۴-۳.A ) مدل جریانی یک مادهٔ الاستیک – پلاستیک ایده آل ،B) رفتار یک مادهٔ الاستیک – پلاستیک ایده آل ۴۵
شکل۴-۴. زمان‌های تغییر حالت در یک سیکل $ti$ ، ($i$ =۴،۳،۲،۱) ۴۷
شکل۴-۵. نمودار جابجایی- زمان، نمودار نیرو – جابجایی و نمودار نیروی عکس‌العمل- زمان. $a$) رژیم ارتعاشی و $b$) رژیم ارتعاشی پیوسته ۴۸
شکل۴-۶. نمودار نرمال‌شده نیروی استاتیکی $P$ بر حسب دامنه ارتعاشی $a$. نقطه $A(0.5,0.5)$ مرز میان رژیم ضربهای و رژیم پیوسته است. ۵۱
شکل۴-۷. نتایج تجربی کاهش تنش تسلیم مواد مختلف در اثر اعمال ارتعاشات التراسونیک، اویزومی و همکاران (۱۹۶۶)، (اطلاعات تکمیلی شکل در جدول ۱ آمده است). ۵۲
شکل۵-۱. چرخهٔ طراحی تا تولید یکی از قطعات کشش عمیق خودرو و جایگاه شبیه سازی فرآیند ۵۴
شکل۵-۲. مدل هندسی مونتاژ شده اجزای فرآیند (اجزاء شامل: (۱) سنبه (۲) ورق (۳) ورق‌گیر (۴) قسمت جانبی قالب (۵) قالب (۶) صفحه صلب اعمال ارتعاشات) ۵۵
شکل۵-۳. نمونه دیاگرام حد شکل دهی برای فولاد کم کربن ۶۰
شکل۵-۴. دیاگرام حد شکل دهی برای فولاد شکل پذیر ST12 ۶۱
شکل۵-۵. شکل شماتیک تغییرات نوسان التراسونیک در قالب ۶۶

شکل۵-۶. ابزارها و بلانک مش بندی شده به همراه مدل مونتاژ شده : (الف) ورقگیر، (ب) سنبه شکل دهی، (پ) ماتریس، (ت) بلانک ورق و (ث) مدل قالب مونتاژ شده نهایی ..... ۶۷
شکل۵-۷. کشش عمیق بدون التراسونیک با نسبت کشش ۱/۶ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۶۸
شکل۵-۸. کشش عمیق بدون التراسونیک با نسبت کشش ۱/۸ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۶۸
شکل۵-۹. کشش عمیق بدون التراسونیک با نسبت کشش ۲/۰ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۶۹
شکل۵-۱۰. کشش عمیق بدون التراسونیک با نسبت کشش ۲/۱ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۶۹
شکل۵-۱۱. کشش عمیق با التراسونیک و با نسبت کشش ۱/۶ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۶۹
شکل۵-۱۲. کشش عمیق با التراسونیک و با نسبت کشش ۱/۸ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۰
شکل۵-۱۳. کشش عمیق با التراسونیک و با نسبت کشش ۲/۰ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۰
شکل۵-۱۴. کشش عمیق با التراسونیک و با نسبت کشش ۲/۱ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۰
شکل۵-۱۵. کشش عمیق با التراسونیک و با نسبت کشش ۲/۲ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۱
شکل۵-۱۶. کشش عمیق با التراسونیک و با نسبت کشش ۲/۳ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۱
شکل۵-۱۷. نسبت کشش ۲ با دامنهٔ ارتعاش ۱میکرون (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۲
شکل۵-۱۸. نسبت کشش ۲ با دامنهٔ ارتعاش ۳میکرون (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۲
شکل۵-۱۹. نسبت کشش ۲ با دامنهٔ ارتعاش ۵میکرون (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۳
شکل۵-۲۰. نسبت کشش ۲ با دامنهٔ ارتعاش ۷میکرون (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۳
شکل۵-۲۱. نسبت کشش ۲ با دامنهٔ ارتعاش ۱۰میکرون (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۳
شکل۵-۲۲. نسبت کشش ۲ با ضریب اصطکاک ۰/۰۵ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۴
شکل۵-۲۳. نسبت کشش ۲ با ضریب اصطکاک ۰/۱ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۴
شکل۵-۲۴. نسبت کشش ۲ با ضریب اصطکاک ۰/۱۵ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۵
شکل۵-۲۵. نسبت کشش ۲ با ضریب اصطکاک ۰/۲۰ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۵
شکل۵-۲۶. نسبت کشش ۲ با ضریب اصطکاک ۰/۲۵ (A) گرادیان تنش (B) گرادیان کرنش ..... ۷۵
شکل۶-۱. طراحی سنبهٔ قالب کشش عمیق التراسونیکی ..... ۸۰
شکل۶-۲. سنبهٔ ساخته شدهٔ مربوط به قالب کشش عمیق التراسونیکی ..... ۸۰
شکل۶-۳. طرح ورق‌گیر قالب کشش عمیق التراسونیکی ..... ۸۱
شکل۶-۴. آنالیز مُدال ماتریس شیپوره ای به کمک نرم افزار المان محدود ABAQUS ..... ۸۴
شکل۶-۵. ابعاد نهایی بدست آمده برای ماتریس شیپوره‌ای تیتانیومی ..... ۸۵
شکل۶-۶. مراحل مونتاژ ماتریس شیپوره‌ای در قالب ..... ۸۵
شکل۶-۷. طراحی قالب کشش عمیق التراسونیکی ..... ۸۶
شکل۶-۸. موقعیت ماتریس شیپوره‌ای در قالب کشش عمیق التراسونیکی ..... ۸۶
شکل۶-۹. کمربند فلزی ماتریس شیپوره‌ای ..... ۸۷
شکل۶-۱۰. کمربند فلزی ساخته شدهٔ ماتریس شیپوره‌ای ..... ۸۷
شکل۶-۱۱. طرح مجموعهٔ ماتریس التراسونیک مطابق ..... ۸۸
شکل۶-۱۲. قطعهٔ واسطهٔ ساخته شدهٔ ماتریس شیپوره‌ای ..... ۸۸
شکل۶-۱۳. رینگ فیبر استخوانی جازده شده در حفرهٔ بدنهٔ ماتریس ..... ۸۹
شکل۶-۱۴. ماتریس تیتانیومی جازده شده در گلوئی فیبر استخوانی ..... ۸۹
شکل۶-۱۵. نحوهٔ بستن کمربند دو تکه به ماتریس تیتانیومی ..... ۹۰
شکل۶-۱۶. مجموعهٔ ساخته شدهٔ کفشک بالا (ماتریس التراسونیک) ..... ۹۰

شکل۶-۱۷. طرح کفشک پائین(سنبه) قالب کشش عمیق التراسونیکی ..... ۹۱
شکل۶-۱۸. کفشک مونتاژ شدهٔ قالب کشش عمیق التراسونیکی ..... ۹۱
شکل۶-۱۹. طرح ترانسدیوسر التراسونیک با توان ۱کیلووات و فرکانس رزونانس ۲۰ کیلوهرتز ..... ۹۲
شکل۶-۲۰. مجموعهٔ قالب کشش عمیق التراسونیکی ..... ۹۳
شکل۷-۱. قالب کشش عمیق التراسونیک ..... ۹۵
شکل۷-۲. پرس هیدرولیک دو کاره با تناژ ۱۵۰ تن ..... ۹۶
شکل۷-۳. ژنراتور التراسونیک ..... ۹۷
شکل۷-۴. ترانسدیوسرهای التراسونیک ..... ۹۷
شکل۷-۵. اسیلوسکوپ ۲۰ مگاهرتز ..... ۹۸
شکل۷-۶. دینامومتر KISTLER-TYPE 9255B ..... ۹۹
شکل۷-۷. دستگاه ثبت اطلاعات(DATA LOGGER) ..... ۹۹
شکل۷-۸. کامپیوتر شخصی(PC) مجهز به نرم‌افزار DYNOWARE ..... ۱۰۰
شکل۷-۹. بلانک‌های مورد نیاز جهت انجام آزمون کشش عمیق ..... ۱۰۰
شکل۷-۱۰. محل نصب دینامومتر KISTLER بر روی دستگاه پرس هیدرولیک ..... ۱۰۱
شکل۷-۱۱. نصب دینامومتر بر روی پرس هیدرولیک ..... ۱۰۲
شکل۷-۱۲. نصب ماتریس التراسونیک بر روی دینامومترKISTLER ..... ۱۰۳
شکل۷-۱۳. مونتاژ قالب کشش عمیق بر روی پرس هیدرولیک ..... ۱۰۴
شکل۷-۱۴. سیستم ورق‌گیر قالب کشش عمیق ..... ۱۰۵
شکل۷-۱۵. قالب کشش عمیق التراسونیک نصب شده بر روی دستگاه پرس ..... ۱۰۵
شکل۷-۱۶. ژنراتور التراسونیک ..... ۱۰۶
شکل۷-۱۷. کابل های ورودی و خروجی DATA LOGGER و PC ..... ۱۰۶
شکل۷-۱۸.کلیهٔ تجهیزات التراسونیک نصب شده بر روی دستگاه پرس ..... ۱۰۷
شکل۷-۱۹. واشرهای هم‌مرکز کنندهٔ بلانک با محور سنبه و ماتریس ..... ۱۰۸
شکل۷-۲۰. قطعات ساخته شده در آزمون تجربی ..... ۱۱۲
شکل۷-۲۱. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.6 و توان التراسونیک(0%) ..... ۱۱۳
شکل۷-۲۲. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.6 و توان التراسونیک(5%) ..... ۱۱۴
شکل۷-۲۳. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.6 و توان التراسونیک(10%) ..... ۱۱۵
شکل۷-۲۴. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.6 و توان التراسونیک(15%) ..... ۱۱۶
شکل۷-۲۵. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.6 و توان التراسونیک(20%) ..... ۱۱۷
شکل۷-۲۶. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.6 و توان التراسونیک(22%) ..... ۱۱۸
شکل۷-۲۷. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.8 و توان التراسونیک(0%) ..... ۱۱۹
شکل۷-۲۸. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.8 و توان التراسونیک(5%) ..... ۱۲۰
شکل۷-۲۹. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.8 و توان التراسونیک(10%) ..... ۱۲۱
شکل۷-۳۰. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.8 و توان التراسونیک(15%) ..... ۱۲۲
شکل۷-۳۱. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.8 و توان التراسونیک(20%) ..... ۱۲۳
شکل۷-۳۲. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.8 و توان التراسونیک(25%) ..... ۱۲۴
شکل۷-۳۳. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 1.8 و توان التراسونیک(30%) ..... ۱۲۵
شکل۷-۳۴. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2 و توان التراسونیک(0%) ..... ۱۲۶

شکل۷-۳۵. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2 و توان التراسونیک(5%) ۱۲۷
شکل۷-۳۶. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2 و توان التراسونیک(10%) ۱۲۸
شکل۷-۳۷. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2 و توان التراسونیک(15%) ۱۲۹
شکل۷-۳۸. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2 و توان التراسونیک(20%) ۱۳۰
شکل۷-۳۹. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2 و توان التراسونیک(25%) ۱۳۱
شکل۷-۴۰. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2 و توان التراسونیک(30%) ۱۳۲
شکل۷-۴۱. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.2 و توان التراسونیک(0%) ۱۳۳
شکل۷-۴۲. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.2 و توان التراسونیک(5%) ۱۳۴
شکل۷-۴۳. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.2 و توان التراسونیک(10%) ۱۳۵
شکل۷-۴۴. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.2 و توان التراسونیک(10%) ۱۳۶
شکل۷-۴۵. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.2 و توان التراسونیک(15%) ۱۳۷
شکل۷-۴۶. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.2 و توان التراسونیک(20%) ۱۳۸
شکل۷-۴۷. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.2 و توان التراسونیک(25%) ۱۳۹
شکل۷-۴۸. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.2 و توان التراسونیک(30%) ۱۴۰
شکل۷-۴۹. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.3 و توان التراسونیک(0%) ۱۴۱
شکل۷-۵۰. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.3 و توان التراسونیک(5%) ۱۴۲
شکل۷-۵۱. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.3 و توان التراسونیک(10%) ۱۴۳
شکل۷-۵۲. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.3 و توان التراسونیک(15%) ۱۴۴
شکل۷-۵۳. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.3 و توان التراسونیک(20%) ۱۴۵
شکل۷-۵۴. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.3 و توان التراسونیک(25%) ۱۴۶
شکل۷-۵۵. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.3 و توان التراسونیک(30%) ۱۴۷
شکل۷-۵۶. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.4 و توان التراسونیک(0%) ۱۴۸
شکل۷-۵۷. منحنی‌های نیرو-زمان نمونه‌های کشش یافته با شرایط DR 2.4 و توان التراسونیک(30%) ۱۴۹
شکل۸-۱. نمودار نرمال‌شده نیروی استاتیکی $P$ بر حسب دامنه ارتعاشی $a$. نقطهٔ $B(17,0.073)$، نقطهٔ انتخابی جهت انتخاب دامنهٔ ارتعاشی در مدلسازی فرآیند کشش عمیق التراسونیکی می‌باشد ۱۵۳
شکل۸-۲. منحنی‌های رسم شده جهت یافتن جواب $t_1$ ۱۵۴
شکل۸-۳. منحنی‌های رسم شده جهت یافتن جواب $t_2$ ۱۵۵
شکل۸-۴. منحنی‌های رسم شده جهت یافتن جواب $t_3$ ۱۵۶
شکل۸-۵. منحنی‌های رسم شده جهت یافتن جواب $t_4$ ۱۵۷
شکل۸-۶. نمودار جابه‌جایی- زمان، نمودار نیرو – جابه‌جایی و نمودار نیروی عکس‌العمل- زمان برای دستگاه التراسونیک کشش عمیق ۱۵۹
شکل۸-۷. تغییرات نیروی ماکزیمم شکل‌دهی به ازای ضرائب مختلف اصطکاک برای نسبت‌های ۱/۸، ۲، ۲/۲ و ۲/۳ ۱۶۳
شکل۸-۸. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری فرآیند کشش عمیق برای حالت بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک ۱۶۴
شکل۸-۹. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری فرآیند کشش عمیق برای حالت با اعمال ارتعاشات التراسونیک ۱۶۴
شکل۸-۱۰. منحنی تغییرات ماکزیمم نیروی شکل‌دهی حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری بازای نسبت‌های مختلف کشش ۱۶۵
شکل۸-۱۱. (A) منحنی تغییرات ماکزیمم نیروی شکل‌دهی کشش ورق حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری با نسبت کشش ۲ به ازای افزایش دامنهٔ ارتعاشی (B) منحنی تغییرات نیرو به ازای دامنهٔ ارتعاشی حاصل از آنالیز تحلیلی ۱۶۶

شکل۸-۱۲. اثر افزایش ضریب اصطکاک بر نیروی شکل‌دهی ورق حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری با نسبت کشش ۲.....۱۶۶
شکل۸-۱۳. منحنی نیرو- زمان مربوط به کشش عمیق ورق حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری با نسبت کشش ۲..... ....۱۶۷
شکل۸-۱۴. چگونگی تعیین بازهٔ زمانی مناسب شکل‌دهی و تعیین نقطهٔ اشتراک در دو منحنی جهت کسر آنها از یکدیگر..... ....۱۶۸
شکل۸-۱۵. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۱/۶..... ۱۶۹
شکل۸-۱۶. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۱۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۶/..... ۱۷۰
شکل۸-۱۷. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۱۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۱/۶..... ۱۷۰
شکل۸-۱۸. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۲۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۱/۶..... ۱۷۱
شکل۸-۱۹. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۱/۸..... ۱۷۱
شکل۸-۲۰. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۱۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۱/۸..... ۱۷۲
شکل۸-۲۱. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۱۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۱/۸..... ۱۷۲
شکل۸-۲۲. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۲۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۸/..... ۱۷۳
شکل۸-۲۳. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۲۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۱/۸..... ۱۷۳
شکل۸-۲۴. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۳۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۱/۸..... ۱۷۴
شکل۸-۲۵. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲..... ۱۷۴
شکل۸-۲۶. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۱۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲..... ۱۷۵
شکل۸-۲۷. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۱۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲..... ۱۷۵
شکل۸-۲۸. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان۲۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲..... ۱۷۶
شکل۸-۲۹. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۲۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲..... ۱۷۶
شکل۸-۳۰. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۳۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲..... ۱۷۷
شکل۸-۳۱. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲/۲..... ۱۷۷

شکل۸-۳۲. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۱۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲/۲ ..... ۱۷۸
شکل۸-۳۳. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۱۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲/۲ ..... ۱۷۸
شکل۸-۳۴. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۲۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲/۲ ..... ۱۷۹
شکل۸-۳۵. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۲۵ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲/۲ ..... ۱۷۹
شکل۸-۳۶. منحنی نیروی خالص شکل‌دهی در حالات بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک و اعمال توان ۳۰ درصد التراسونیک برای نسبت کشش ۲/۲ ..... ۱۸۰
شکل۸-۳۷. چگونگی محاسبهٔ درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای هر نسبت کشش و توان التراسونیک..... ۱۸۱
شکل۸-۳۸. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۶ و به ازای توان ۵ درصد التراسونیک..... ۱۸۲
شکل۸-۳۹. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۶ و به ازای توان ۱۰ درصد التراسونیک.... ۱۸۲
شکل۸-۴۰. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۶ و به ازای توان ۱۵ درصد التراسونیک.... ۱۸۳
شکل۸-۴۱. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۶ و به ازای توان ۲۰ درصد التراسونیک.... ۱۸۳
شکل۸-۴۲. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۸ و به ازای توان ۵ درصد التراسونیک..... ۱۸۴
شکل۸-۴۳. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۸ و به ازای توان ۱۰ درصد التراسونیک.... ۱۸۴
شکل۸-۴۴. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۸ و به ازای توان ۱۵ درصد التراسونیک.... ۱۸۵
شکل۸-۴۵. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۸ و به ازای توان ۲۰ درصد التراسونیک.... ۱۸۵
شکل۸-۴۶. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۸ و به ازای توان۲۵ درصد التراسونیک .....۱۸۶
شکل۸-۴۷. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۱/۸ و به ازای توان ۳۰ درصد التراسونیک.....۱۸۶
شکل۸-۴۸. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۰ و به ازای توان ۵ درصد التراسونیک..... ۱۸۷
شکل۸-۴۹. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۰ و به ازای توان ۱۰ درصد التراسونیک.... ۱۸۷
شکل۸-۵۰. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۰ و به ازای توان ۱۵ درصد التراسونیک.... ۱۸۸
شکل۸-۵۱. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۰ و به ازای توان ۲۰ درصد التراسونیک.... ۱۸۸
شکل۸-۵۲. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۰ و به ازای توان ۲۵ درصد التراسونیک.... ۱۸۹
شکل۸-۵۳. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۰ و به ازای توان ۳۰ درصد التراسونیک.... ۱۸۹
شکل۸-۵۴. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۲ و به ازای توان ۵ درصد التراسونیک..... ۱۹۰
شکل۸-۵۵. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۲ و به ازای توان ۱۰ درصد التراسونیک.... ۱۹۰
شکل۸-۵۶. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۲ و به ازای توان ۱۵ درصد التراسونیک.... ۱۹۱
شکل۸-۵۷. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۲ و به ازای توان ۲۰ درصد التراسونیک.... ۱۹۱
شکل۸-۵۸. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۲ و به ازای توان ۲۵ درصد التراسونیک.... ۱۹۲
شکل۸-۵۹. نمودار درصد کاهش نیروی خالص شکل‌دهی برای نسبت کشش ۲/۲ و به ازای توان ۳۰ درصد التراسونیک.... ۱۹۲
شکل۸-۶۰. منحنی تغییرات نیروی خالص شکل‌دهی ورق به ازای توان‌های مختلف التراسونیک و نسبت کشش ۱/۶..... ۱۹۳
شکل۸-۶۱. منحنی تغییرات نیروی خالص شکل‌دهی ورق به ازای توان‌های مختلف التراسونیک و نسبت کشش ۱/۸..... ۱۹۴
شکل۸-۶۲. منحنی تغییرات نیروی خالص شکل‌دهی ورق به ازای توان‌های مختلف التراسونیک و نسبت کشش ۲/۰..... ۱۹۴
شکل۸-۶۳. منحنی تغییرات نیروی خالص شکل‌دهی ورق به ازای توان‌های مختلف التراسونیک و نسبت کشش ۲/۲..... ۱۹۵
شکل۸-۶۴. فنجانی‌های ساخته شده به روش کشش عمیق در حالت بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک..... ۱۹۵

شکل۸-۶۵. فنجانی‌های ساخته شده به روش کشش عمیق در حالت با اعمال ارتعاشات التراسونیک.....۱۹۶
شکل۸-۶۶. تاثیر ارتعاشات التراسونیک در کاهش میانگین نیروی خالص شکل‌دهی برای هر نسبت کشش..... ۱۹۹
شکل۸-۶۷. تغییرات متوسط نیروی خالص شکل‌دهی در هر توان التراسونیک به ازای تغییرات نسبت کشش..... ۲۰۰
شکل۸-۶۸. مقایسهٔ منحنی زمان – نیرو مربوط به حالت‌های با و بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک..... ۲۰۰

## فهرست علائم اختصاری

| | |
|---|---|
| $a$ | دامنهٔ ارتعاشی($\mu m$) |
| $C_d$ | سرعت موج انبساطی موثر ماده($mm/s$) |
| $D$ | مقدار نیروی لازم برای تسلیم قطعه($N$) |
| $D_0$ | قطر بلانک اولیه($mm$) |
| $dr$ | ضخامت المان($mm$) |
| $E$ | مدول الاستیسیته($GPa$) |
| $f$ | فرکانس ارتعاشی($kHz$) |
| $f(u,\dot{u})$ | نیروی دینامیکی($N$) |
| $h$ | میزان تغییرشکل نمونه($mm$) |
| $h_0$ | تغییرشکل پلاستیک پسماند($mm$) |
| $H$ | ارتفاع نمونه($mm$) |
| $K_0$ | سختی استاتیکی ماده |
| $L_e$ | بُعد شاخص المان($mm$) |
| $n$ | توان کارسختی |
| $r$ | شعاع المان($mm$) |
| $r_0$ | شعاع بلانک اولیه($mm$) |
| $r_p$ | شعاع سنبه($mm$) |
| $S$ | سطح مقطع نمونه($mm^2$) |
| $t$ | ضخامت ورق($mm$) |
| $T$ | دورهٔ تناوب ارتعاشی($s$) |
| $u_0$ | جابجائی ابزار التراسونیک(ماتریس مرتعش) ($\mu m$) |
| $\dot{u}$ | سرعت بارگذاری($mm/s$) |
| $\ddot{u}$ | شتاب بارگذاری($mm/s^2$) |
| $v$ | سرعت ثابت ماتریس مرتعش($mm/s$) |
| $W_z$ | بار توزیع شده در جهت $z$ ($MPa$) |
| $Y$ | تنش تسلیم قطعه($MPa$) |
| $\Delta$ | فاصلهٔ اولیهٔ بین مرکز ارتعاشات لبهٔ ماتریس و ورق($\mu m$) |
| $\Delta t$ | نمو زمانی($s$) |
| $\rho$ | شعاع انحنا ($mm$) |
| $\sigma_r$ | تنش شعاعی($MPa$) |
| $\sigma_\theta$ | تنش محیطی($MPa$) |
| $\sigma_{\varphi rd}$ | تنش شعاعی در شعاع پروفیل ماتریس($MPa$) |
| $\varphi$ | زاویهٔ کمان لبهٔ ماتریس($Radian$) |
| $\mu$ | ضریب اصطکاک |
| $\omega$ | فرکانس زاویه‌ای($kHz$) |
| $\bar{\varepsilon}$ | کرنش معادل |

# فصل۱

# مقدمه