دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک
گروه ساخت و تولید

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
در رشته مکانیک گرایش ساخت و تولید

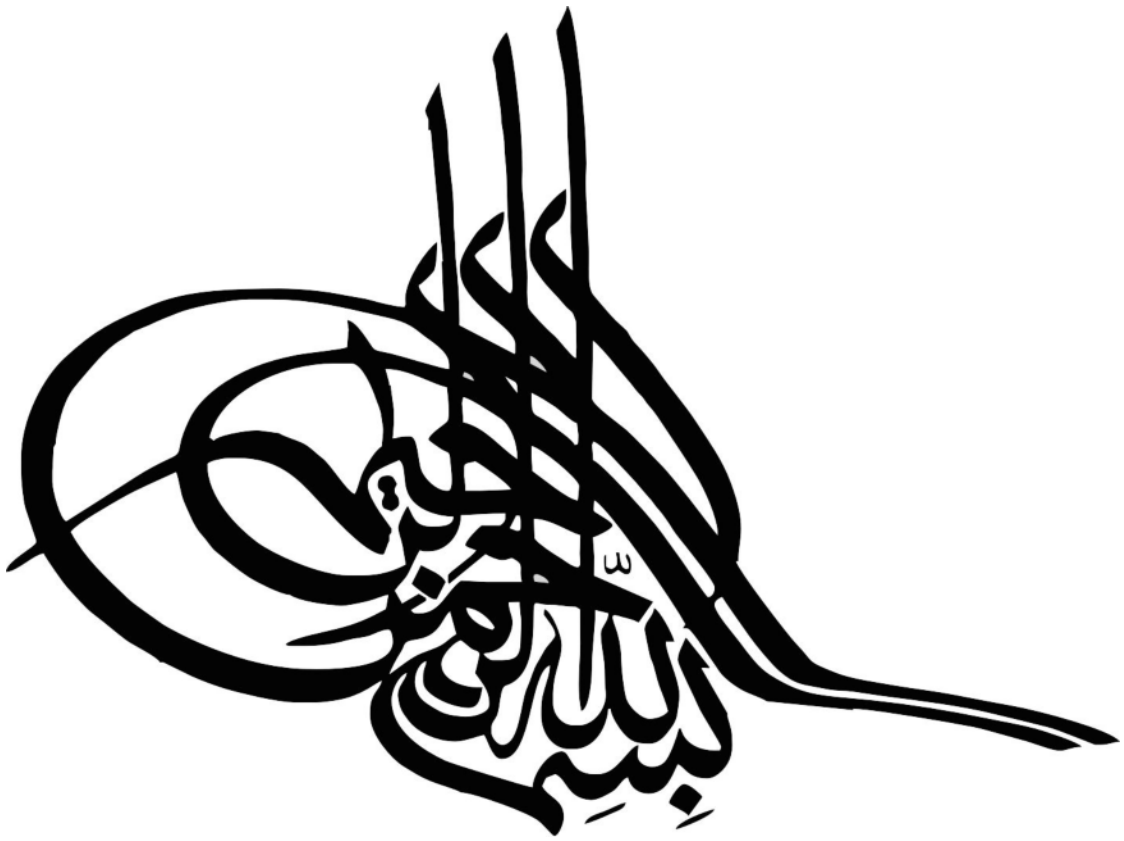
ضخامت سنجی دقیق قطعات با استفاده از تکنیک همبستگی متقابل

نگارش

محمد ایران‌نژاد

استاد راهنما
دکتر فرهنگ هنرور

مرداد ۱۳۹۱


بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

پدر و مادرم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مکانیک

گروه ساخت و تولید

تاییدیه هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان: " ضخامت سنجی دقیق قطعات با استفاده از تکنیک همبستگی متقابل " توسط آقای محمد ایران‌نژاد صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته: مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید با رتبه..... مورد تایید قرار می‌دهند.

۱- استاد راهنما	آقای دکتر فرهنگ هنرور	امضا
۲- ممتحن داخلی	آقای مهرداد کازرونی	امضا
۳- ممتحن داخلی	آقای مهرداد وحدتی	امضا

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان‌نامه: ضخامت سنجی دقیق قطعات با استفاده از تکنیک همبستگی متقابل

استاد راهنما: دکتر فرهنگ هنرور

نام دانشجو: محمد ایران‌نژاد

شماره دانشجویی: ۸۹۰۲۱۰۴

اینجانب محمد ایران‌نژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون 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.

فرم حق چاپ نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمنا متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

نیاز به محصولات جدید و ارتقاء سیستم‌های تولیدی، ایجاد و توسعه‌ی روش‌های پیشرفته در اندازه‌گیری و کنترل را ضروری نموده است. این روش‌های جدید، باعث افزایش کیفیت، قابلیت اطمینان و ایمنی می‌شود. گروهی از روش‌های جدید اندازه‌گیری، که امروزه جایگزین بسیاری از روش‌های قدیمی شده است، با استفاده از امواج فراصوتی صورت می‌گیرد. به کمک امواج فراصوتی علاوه بر اندازه‌گیری ابعادی می‌توان ویژگی‌های دیگر از جمله خواص الاستیک مواد را نیز اندازه گرفت. اصلی‌ترین محدودیت امواج فراصوتی برای اندازه‌گیری، دقت اندازه‌گیری این روش است، که در شرایط عادی از روش‌های مخرب کمتر است. در این پایان‌نامه عوامل عدم قطعیت در آزمون‌های فراصوتی بررسی و با ارائه‌ی راهکارهای مناسب، خطای ناشی از عوامل مختلف تا حد امکان کاهش داده شده است. علاوه بر این برای کاهش خطای ناشی از تغییرات دما معادله تئوری مناسبی ارائه شده است، همچنین از فیلتر وینر برای اصلاح شکل تغییر یافته اکو در اثر استهلاک در فرکانس‌های مختلف و کاهش نویز استفاده شده است.

کلمات کلیدی: ضخامت سنجی فراصوتی، سرعت امواج فراصوتی، تاثیر دما بر امواج فراصوتی، استهلاک امواج، فیلتر وینر، عدم قطعیت

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- تعریف مسئله و اهمیت آن ۲

۱-۲- اهداف پژوهش ۴

۱-۳- محتوای پایان‌نامه ۴

فصل دوم: مروری بر تحقیقات و مبانی ضخامت سنجی فراصوتی ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- مروری بر تحقیقات گذشته ۸

۲-۳- اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی ۱۲

۲-۴- مروری بر روش‌های کاهش نویز ۱۴

۲-۵- مروری بر روش‌های تخمین تاخیر زمان ۱۵

۲-۵-۱- تعریف مسئله تخمین تاخیر زمانی ۱۶

۲-۵-۲- روش‌های تخمین تاخیر زمانی ۱۸

۲-۵-۳- درونیابی ۲۱

۲-۶- مفاهیم اندازه‌گیری و عدم قطعیت ۲۴

۲-۶-۱- تعریف فرآیند اندازه‌گیری ۲۵

۲-۶-۲- تشکیل مدل خطا ۲۶

۲-۶-۳- شناسایی منابع خطا و پراکندگی ۲۷

۲-۶-۴- تخمین عدم قطعیت ۳۴

۲-۶-۵- ترکیب و جمع‌کردن عدم قطعیت‌ها ۳۶

۲-۶-۶- گزارش نتایج تحلیل ۳۷

۲-۷- تشریح بخش‌های یک دستگاه آزمون فراصوتی ۳۸

۲-۷-۱- واحد ارسال- دریافت ۳۹

۲-۷-۲- کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال ۴۰

۲-۷-۳- ترانسدیوسر ۴۱

۲-۷-۴- واحد پردازنده ۴۲

۲-۸- سیستم‌های آزمون‌های فراصوتی ۴۲

۲-۸-۱- سیستم آزمون تماسی ۴۲

۲-۸-۲- سیستم آزمون غوطه‌وری ۴۳

۲-۹- تکنیک های بازرسی در آزمون فراصوتی ۴۴

۲-۹-۱- روش بازتابی با پروب عمودی ۴۴

۲-۹-۲- روش عبوری با پروب عمودی ۴۴

۲-۹-۳- روش عبوری با پروب زاویه ای ۴۵

۲-۹-۴- روش بازتابی با پروب زاویه‌ای ۴۶

۲-۱۰- خلاصه فصل ۴۶

فصل سوم: بررسی عوامل خطا در ضخامت سنجی با امواج فراصوتی ۴۸

۳-۱- مقدمه ۴۹

۳-۲- عوامل کاهش داده‌ها و کاهش کیفیت داده‌ها ۵۱

۳-۲-۱- تاثیر گسسته سازی سیگنال ۵۲

۳-۲-۲- تاثیر پله‌ای کردن ۵۲

۳-۲-۳- تاثیر نویزهای الکتریکی ۵۴
۳-۲-۴- تاثیر نویزهای ساختاری ۵۷
۳-۳- عوامل ایجاد خطا در سرعت صوت ۵۸
۳-۳-۱- تاثیر دما ۶۰
۳-۳-۲- تاثیر فرکانس در سرعت صوت ۶۰
۳-۴- خلاصه فصل ۶۱
فصل چهارم: روش‌های افزایش دقت ضخامت سنجی فراصوتی ۶۳
۴-۱- مقدمه ۶۴
۴-۲- استفاده از فیلتر وینر برای کاهش نویزهای سیگنال‌های فراصوتی و کاهش اثر تغییر شکل اکو ۶۴
۴-۲-۱- اساس فرآیند آزمون فراصوتی و ارائه مدل ۶۵
۴-۲-۲- بررسی تغییرات ضریب استهلاک با تغییر فرکانس ۶۸
۴-۲-۳- طراحی فیلتر وینر برای حذف نویز و اصلاح شکل سیگنال ۶۸
۴-۲-۴- بررسی نتایج اعمال فیلتر بر سیگنال‌های فراصوتی ۷۱
۴-۳- اصلاح معادله اندازه‌گیری سرعت صوت با در نظر گرفتن تاثیر دما..... ۷۴
۴-۴- خلاصه فصل ۷۷
فصل پنجم: تشریح آزمایشات اندازه‌گیری سرعت صوت و تحلیل عدم قطعیت ۷۹
۵-۱- مقدمه ۸۰

۵-۲- تعریف فرآیند اندازه‌گیری ۸۰

۵-۳- تشکیل مدل خطا ۸۲

۵-۴- شناسایی منابع خطا و پراکندگی ۸۳

۵-۴-۱- منابع خطای دما ۸۴

۵-۴-۲- منابع خطای اندازه‌گیری ضخامت ۸۴

۵-۴-۳- خطای اندازه‌گیری تاخیر زمانی ۸۷

۵-۵- تخمین عدم قطعیت ۹۳

۵-۶- ترکیب و جمع کردن عدم قطعیت‌ها ۹۴

۵-۷- گزارش نتایج ۹۷

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۹

۶-۱- مقدمه ۱۰۰

۶-۲- جمع بندی و نتیجه گیری ۱۰۰

۶-۳- پیشنهادات ۱۰۲

پیوست A) محاسبه درجات آزادی ۱۰۴

پیوست B) راهنمای استفاده از نرم‌افزار TDE ۱۰۶

B.1. مقدمه ۱۰۶

B.2. روش استفاده از برنامه ۱۰۶

منابع ۱۱۱

فهرست شکل‌ها

شکل ۲- ۱: اکوهای دیواره پشتی قابل تشخیص در سیگنال ۱۳

شکل ۲- ۲: سیستم با تاخیر زمانی ۱۶

شکل ۲- ۳: تاثیر تبدیل هیلبرت بر تقارن منحنی ۲۳

شکل ۲- ۴: درونیابی سهمی ۲۳

شکل ۲- ۵: بخش‌های یک سیستم آزمون فراصوتی ساده ۳۸

شکل ۲- ۶: واحد ارسال دریافت ۳۹

شکل ۲- ۷: کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال ۴۰

شکل ۲- ۸: پروب فراصوتی ۴۱

شکل ۲- ۹: سیستم آزمون تماسی ۴۳

شکل ۲- ۱۰: سیستم آزمون غوطه‌وری ۴۳

شکل ۲- ۱۱: بازرسی فراصوتی با روش بازتابی با پروب عمودی ۴۴

شکل ۲- ۱۲: بازرسی فراصوتی با روش عبوری با پروب عمودی ۴۵

شکل ۲- ۱۳: بازرسی فراصوتی با روش بازتابی با پروب زاویه‌ای ۴۶

شکل ۳- ۱: عوامل خطای کاهش داده‌ها در آزمون‌های فراصوتی ۵۰

شکل ۳- ۲: عوامل خطا در سرعت صوت ۵۱

شکل ۳- ۳: تاثیر پله‌ای کردن و خطای آن ۵۳

شکل ۳- ۴: انواع نویزهای رایج از نظر فرکانس ۵۴
شکل ۳- ۵: نویز ساختاری و طیف آن ۵۸
شکل ۳- ۶: عوامل خطای گرایش اندازه‌گیری سرعت صوت ۵۹

شکل ۴- ۱: تغییر شکل یک اکوی فراصوتی در فولاد ریزدانه ۶۵
شکل ۴- ۲: اساس و ترتیب آزمون فراصوتی ۶۶
شکل ۴- ۳: ضریب استهلاک برای فرکانس‌های مختلف برای فولاد ۶۸
شکل ۴- ۴: تاثیر فیلتر وینر بر اصلاح شکل تغییر یافته در دو اکوی فراصوتی ۷۲
شکل ۴- ۵: سیگنال فراصوتی حاصل از ضخامت سنجی یک فولاد درشت دانه به ضخامت ۲۰MM ۷۳
شکل ۴- ۶: اکوی اول و دوم سیگنال شکل ۴-۵ بعد از اعمال فیلتر ۷۳
شکل ۴- ۷: تعثیر دما بر مدول یانگ مواد ۷۵

شکل ۵- ۱: قطعات اندازه‌گیری شده و پروب‌های آزمون ۸۱
شکل ۵- ۲: قسمت‌های مختلف دستگاه آزمون فرا صوتی و شرایط آزمایش ۸۲
شکل ۵- ۳: بخشی از کاتالوگ میکرومتر سری ۱۰۲ ساخت شرکت MITUTOYO ۸۵
شکل ۵- ۴: عدم قطعیت تکرار پذیری تاخیر زمانی امواج طولی ۹۰
شکل ۵- ۵: عدم قطعیت تکرار پذیری تاخیر زمانی امواج عرضی ۹۱
شکل ۵- ۶: برنامه نوشته شده برای آزمون فراصوتی ۹۲

فهرست جداول

جدول ۲- ۱: جدول توزیع احتمال ۳۳

جدول ۵- ۱: مشخصات قطعات مورد آزمون ۸۰

جدول ۵- ۲: انبساط حرارتی قطعات ۸۷

جدول ۵- ۳: تاخیر زمانی تخمینی نمونه اول برحسب میکروثانیه ۸۸

جدول ۵- ۴: تاخیر زمانی تخمینی نمونه دوم برحسب میکروثانیه ۸۹

جدول ۵- ۵: تاخیر زمانی تخمینی نمونه سوم برحسب میکروثانیه ۸۹

جدول ۵- ۶: تاخیر زمانی تخمینی نمونه چهارم برحسب میکروثانیه ۸۹

جدول ۵- ۷: میانگین زمان تخمینی برای هر نمونه برحسب میکروثانیه ۹۰

جدول ۵- ۸: عدم قطعیت تکرار پذیری تاخیر زمانی برای هر نمونه برحسب میکروثانیه ۹۰

جدول ۵- ۹: عدم قطعیت زمان تاخیر بر حسب میکروثانیه ۹۳

جدول ۵- ۱۰: سرعت صوت در دمای آزمایش ۹۵

جدول ۵- ۱۱: سرعت صوت در دمای استاندارد ۹۵

جدول ۵- ۱۲: عدم قطعیت سرعت صوت در دمای آزمایش ۹۵

جدول ۵- ۱۳: عدم قطعیت سرعت صوت در دمای استاندارد ۹۶

جدول ۵- ۱۴: عوامل عدم قطعیت در اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی ۹۷

فصل اول: مقدمه

۱-۱- تعریف مسئله و اهمیت آن

یکی از موضوعاتی که سالهاست محققین را به خود مشغول کرده است ضخامت سنجی قطعات با روشی غیرمخرب است. کاربرد اصلی این موضوع در کنترل فرآیندها، آزمایشات، کنترل کیفیت و مباحث تعمیر و نگهداری است. در بسیاری از موارد نیاز است از روش‌هایی استفاده شود که با قطعیت و سرعت بالا ضخامت یک قطعه را به صورت غیرمخرب اندازه‌گیری نمایند. این امر زمانی که ابعاد قطعه بزرگ یا پیچیده شود یا دسترسی از یک طرف قطعه غیر ممکن باشد، مشکل خواهد بود. در بسیاری از موارد آزمون‌های مخرب هزینه‌های بسیار بالایی در پی خواهد داشت.

از طرفی پیشرفت‌های چشمگیر و ارتقاء سیستم‌های تولیدی، نیازمند روش‌های پیشرفته‌تر در اندازه‌گیری و کنترل است، که باعث افزایش کیفیت، قابلیت اطمینان و ایمنی می‌شود. در راستای تحقق این امر به تدریج آزمون‌های مخرب جای خود را به سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل غیرمخرب داده‌اند.

در این چنین مواردی آزمون فراصوتی می‌تواند روش مناسبی برای چنین اندازه‌گیری‌هایی باشد. از جمله مزایای این روش که آن را به روشی کارآمد و اقتصادی تبدیل کرده است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- روشی مطمئن و بدون خطر جانبی و مسائل و مشکلات ایمنی در مقایسه با پرتونگاری
- عمق نفوذ آن در مقایسه با سایر روش‌ها بسیار زیاد است.
- نیاز قابل توجهی به مواد مصرفی مانند فیلم و غیره ندارد.
- برای کلیه فلزات و غیر فلزات قابل استفاده است.
- نتایج آزمون بلافاصله قابل دسترسی است.
- بالا بودن حساسیت کنترل و توانایی یافتن عیب‌های کوچک

- امکان عیب‌یابی به صورت خودکار
- دقت نسبتاً خوب در ارزیابی محل عیب
- امکان بازرسی تنها از یک طرف

در کنار این مزایا ضخامت سنجی فراصوتی دارای معایب و محدودیت‌هایی است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- هزینه اولیه بالا
- نیاز به نیروی متخصص
- وجود قطعات الکترونیکی در سیستم باعث محدودیت استفاده از روش در بسیاری از محیط‌ها می‌شود.
- نیاز به الگوریتم‌های مختلف
- محدودیت در ابعاد قطعه
- محدودیت در جنس قطعه‌کار
- نیاز به شرایط سطحی مناسب
- محدودیت در هندسه‌های پیچیده

ضخامت سنجی با امواج فراصوتی مانند هر اندازه‌گیری دارای معیارهای دقت، صحت، عدم قطعیت و ... می‌باشد که می‌تواند معیاری برای ارزیابی فرآیند اندازه‌گیری باشد. اندازه‌گیری ضخامت با امواج فراصوتی، با اندازه‌گیری دو کمیت سرعت صوت و زمان تاخیر انجام می‌شود. اندازه‌گیری سرعت صوت در واقع بخشی از ضخامت سنجی فراصوتی است که با اندازه‌گیری تاخیر زمانی در یک ماده با جنس مورد نظر و ضخامت مشخص انجام می‌گیرد.

۱-۲- اهداف پژوهش

هدف از این پژوهش بررسی عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری سرعت امواج صوتی و ضخامت قطعات و ارائه‌ی راهکارهای موثر برای کم کردن آن است. اگرچه پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده است ولی بررسی جامعی در این زمینه صورت نگرفته است. هر عامل خطا بسته به منبع خود نوعی خطا در اندازه‌گیری ایجاد می‌کند که مقدار و چگونگی آن عامل خطا وابسته است.

برای حذف خطا در درجه اول باید عوامل آن مورد بررسی و مقدار تاثیر هر یک ارزیابی شود. در اغلب اندازه‌گیری‌ها تعداد کمی از عوامل دارای تاثیر قابل توجهی هستند و عوامل دیگر تاثیر کمی دارند. که در عمل کاهش دادن خطای عوامل با تاثیر گذاری بالاتر می‌تواند تاثیر چشمگیری بر عدم قطعیت داشته باشد. لذا در ابتدا لازم است بررسی جامعی بر عوامل خطا در یک اندازه‌گیری انجام شود؛ سپس به راهکارهای مناسب برای حذف عوامل اصلی خطا پرداخت.

۱-۳- محتوای پایان‌نامه

این پایان‌نامه مشتمل بر شش فصل است. در فصل اول مقدماتی پیرامون موضوع تحقیق و ضرورت آن بیان می‌شود. در فصل دوم مختصری به پیشینه تحقیقات در این موضوع و استانداردهای آن اشاره می‌شود و روش‌هایی که برای کاهش نویز و تخمین تاخیر زمانی ارائه شده بیان می‌گردد. در ادامه همین فصل به بررسی اساس آزمون‌های فراصوتی تجهیزات آن پرداخته شده و مفاهیم عدم قطعیت و چگونگی محاسبه آن تشریح می‌شود.

در فصل سوم به بررسی عوامل خطا در ضخامت سنجی فراصوتی پرداخته می‌شود و تاثیر هر عامل به طور خلاصه بررسی و راهکارهای حذف آن بیان می‌شود.

در فصل چهارم راهکارهایی برای حذف اصل‌ترین عوامل خطا که قبلا راهکاری مناسبی برای حذف آن ارائه نشده است (دما و استهلاک در فرکانس‌های مختلف)، ارائه می‌گردد.

در فصل پنجم به تشریح آزمایشات و محاسبه عدم قطعیت برای بررسی میزان تاثیر گذاری روش‌های ارائه شده در فصل چهار پرداخته می‌شود. در این فصل از روش همبستگی متقابل با درونیابی سهموی که دقیق‌ترین روش متداول در اندازه‌گیری تاخیر زمانی استفاده می‌گردد.

در فصل آخر نیز نتایج حاصل از تحقیقات این پایان‌نامه و پیشنهاداتی برای ادامه تحقیقات ارائه خواهد شد.

فصل دوم: مروری بر تحقیقات و مبانی ضخامت سنجی فراصوتی