



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

زمان چاپ: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

بررسی و تحلیل تکنولوژی پیشرفته جایگزینی موجبرهای صوتی برای دماسنج نوع تماسی دقیق و قدرتمند

امیر شاطری*^۱

فارغ التحصیل مقطع کارشناسی پیوسته مهندسی برق موسسه آموزش عالی آپادانا شیراز

Amir.sh197799@gmail.com

چکیده

در این تحقیق و مقاله یک روش قوی و بسیار دقیق برای اندازه‌گیری دما با استفاده از امواج اولتراسونیک گزارش می‌شود. موجبرهای فولاد ضد زنگ جامد برای ارائه مسیرهای انتشار امواج اولتراسونیک به خوبی تعریف شده و پایدار استفاده می‌شود. سرعت موج اولتراسونیک به شدت وابسته به دما است. زمان رسیدن بسته‌های موج اولتراسونیک در امتداد یک موجبر برای استنباط دمای متوسط موجبر استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌های دمای اولتراسونیک دقت بالایی را نشان می‌دهند (یعنی ± 0.15 درجه سانتی‌گراد) که بیش از دو برابر بهتر از دقت نقل شده ردیاب‌های دمایی مقاومت ۱ به ۱۰ (RTDs) استاندارد ملی آلمان است. پاسخگویی موجبرها نیز مورد بررسی قرار گرفت. در حالی که اندازه‌گیری‌های اولتراسونیک را می‌توان در فرکانس‌های بسیار بالا انجام داد، پاسخ‌دهی با انتقال حرارت به ناحیه حسگر فعال محدود می‌شود. موجبرها سفارشی کردن ابعاد ناحیه حسگر فعال را آسان می‌کنند و زمان پاسخ کوتاه تری نسبت به سنسور RTD ها نشان داده شده است. تکنیک ارائه شده در این تحقیق و مقاله یک جایگزین قوی و مقرون به صرفه برای سایر اندازه‌گیری‌های دمای تماسی است.

کلمات کلیدی: موج اولتراسونیک، دما، موجبر، میدل پیزوالکتریک، دماسنج تماسی، آشکارساز دمای مقاومتی

۱- مقدمه

دما یکی از اندازه‌گیری شده‌ترین کمیت‌های فیزیکی است و مرسوم‌ترین روش اندازه‌گیری آن از طریق دماسنج تماسی است. ارزش خالص بازار حسگرهای دما در سال ۲۰۱۶؛ ۵٫۱۳ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۲ به ۶٫۷۹ میلیارد دلار افزایش یابد [۱]. رایج‌ترین انواع پروب‌های دمای تماس شامل ترموکوپل‌ها، ترمیستورها و آشکارسازهای دمای مقاومتی (RTD) هستند. ترموکوپل‌ها می‌توانند در محدوده دمایی وسیع کار کنند اما دقت زیادی ندارند. از طرف دیگر ترمیستورها و RTD ها بسیار دقیق و حساس به تغییرات دما هستند، اما زمان پاسخگویی طولانی و محدوده دمای عملیاتی محدودی دارند. همچنین، آنها نسبتاً گران هستند (به ویژه RTD ها) [۲].

۲- درباره آکوستیک (صوت شناسی)

صوت‌شناسی یا آکوستیک یکی از شاخه‌های علم فیزیک است و موضوع آن بررسی موج‌های مکانیکی در گازها، مایع‌ها و جامدها، از جمله نوسان‌ها، صدا، فراصوت و فروصوت است. کاربردهای آکوستیک در بسیاری از جنبه‌های زندگی امروز دیده می‌شوند و ساده‌ترین نمونه آن صنایع صوتی و نیز کنترل نویز (مکانیکی) است. از نظر اهمیتی که آکوستیک یا علم صدا



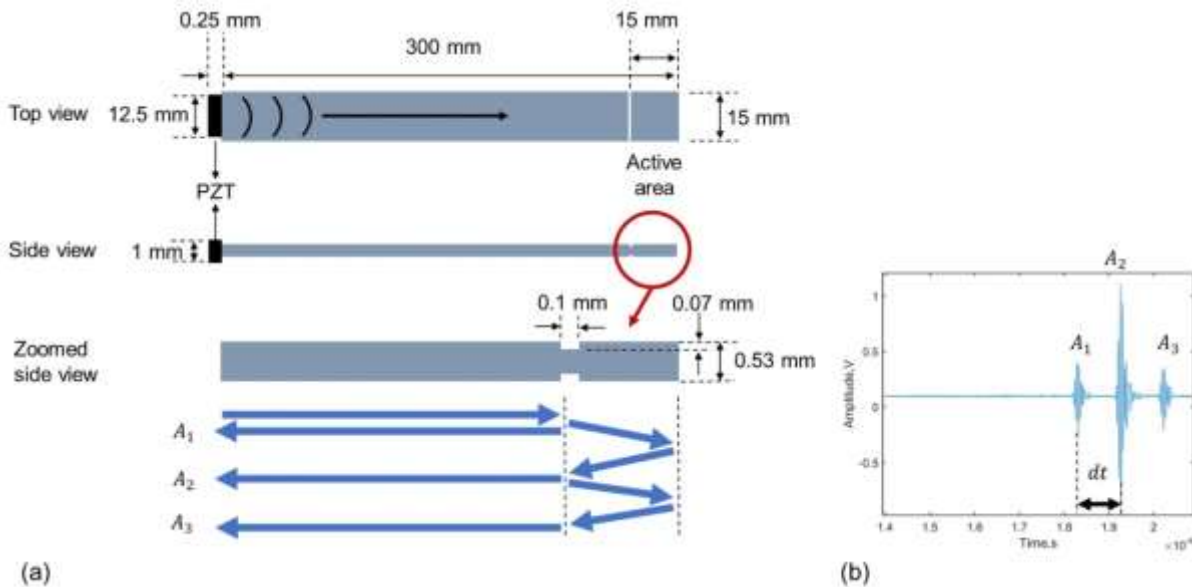
ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

دارا می‌باشد می‌توان انتظار داشت که این موضوع در تاریخ علوم فیزیک جزو مطالب اساسی به شمار رفته باشد، در صورتی که چنین چیزی نیست، زیرا در قبال تاریخ سایر علوم، تاریخ آکوستیک قسمت از قلم افتاده و مهجوری بیش نیست. یکی از دلایل این مهجوریت تاریخی این است که نظریه اساسی اصلی راجع به انتشار و اخذ صوت از زمان‌های بسیار قدیم در تحولات فکر بشری پیدا شده و اسلوب این فکر همان است که امروزه مورد قبول است. وقتی که به یک جسم جامد ضربه وارد می‌سازیم، تولید صدا می‌کند. تحت بعضی از شرایط صدای حاصل، به گوش انسان خوش آیند و مطبوع است و این در واقع اساس پیدایش علم موسیقی است که سالیان دراز قبل از تاریخ ضبط صوت، موجود بوده است، اما موسیقی، قرن‌ها قبل از اینکه از نظر علمی مورد تحقیق قرار گیرد، جزو صنایع ظریفه محسوب می‌گردید. این مطلب مورد قبول عموم است که اولین فیلسوف یونانی که مبنای موسیقی را بررسی نموده است. فیثاغورث می‌باشد که ۶ قرن قبل از میلاد زندگی می‌کرده است. تجربیات روزانه نشان می‌دهد که احساس شنیدن وقتی برای ما پیدا می‌شود که شیئی که در مجاورت ما واقع شده است به ارتعاش در آید؛ مثلاً اگر کنار ما جامی فلزی قرار داشته باشد چنانچه با یک قطعه فلز به بدنه جام بزنیم صدایی از آن به گوش می‌رسد، و اگر با دقت به آن نگاه کنیم ملاحظه می‌گردد که در حین صدا دادن لبه جام غیر واضح می‌باشد و این علامت ارتعاش سریع است. اگر در این هنگام پاندول سبک وزن ساده‌ای را به بدنه جام نزدیک کنیم ضربه‌های پشت سر هم بدنه جام را روی پاندول که دلیل ارتعاش آن است به خوبی مشاهده می‌کنیم. اما بعضی اوقات ارتعاش به اندازه‌ای سریع است که با چشم دیده نمی‌شود و باید با وسایل مختلف از قبیل وسیله فوق وجود آن را در اجسام ظاهر ساخت.

۳- جزئیات و روش تحقیق

در این تحقیق و مقاله از نتایج آزمایش بر روی فولاد ضد زنگ ساده و مستحکم ۳۰۴ برای ساخت یک موجبر استفاده شده؛ لازم به ذکر است که این ماده به فولاد ضد زنگ محدود نمی‌شود و می‌تواند هر چیزی باشد که قادر به انتقال امواج مافوق صوت باشد و در محیط اندازه‌گیری تخریب نشود. موجبر نواری نازک و کشیده است که امواج برشی در امتداد آن منتشر می‌شوند. مطالعه دقیقی از انتشار موج در موجبر [۷] ارائه شده است. این تنظیم انتشار موج منجر به نسبت سیگنال به نویز (SNR) بسیار بالایی می‌شود. شکل ۱ موجبر و یک سیگنال اولتراسونیک را نشان می‌دهد که از آن به دست آمده است. دو بریدگی با عرض ۰,۱ میلی‌متر و عمق ۰,۲ میلی‌متر در جلو و پشت موجبر ساخته شده است. ناحیه فعال باید به طور کامل در محیط اندازه‌گیری غوطه‌ور شود و این سرعت اولتراسونیک میانگین مکانی در این ناحیه است که برای استخراج دما استفاده می‌شود. ناحیه فعال دارای جرم حرارتی کم است که منجر به واکنش سریع به تغییرات دما می‌شود.



شکل ۱. (a) نمودار شماتیک موجبر شامل مسیرهای انتشار بازتاب اول و دوم. (b) یک سیگنال اولتراسونیک ثبت شده معمولی که بازتاب اول و دوم و تفاوت بین زمان رسیدن آنها را نشان می دهد (dt).

یک اندازه گیری معمولی مستلزم ارسال یک انفجار زنگ سینوسی پنجره هانینگ ۵ سیکلی با فرکانس مرکزی ۲ مگاهرتز به داخل موجبر با استفاده از مبدل برشی PZT است. در کار قبلی نشان داده شده است که امواج برشی اولتراسونیک ۲ مگاهرتز در موجبرهای پیکربندی ارائه شده غیر پراکنده هستند [۷]. بسته موج به سمت پایین موجبر حرکت می کند تا زمانی که تا حدی توسط شکاف منعکس شود. کسری از کل انرژی به مبدل برمی گردد و در آنجا به عنوان اولین بازتاب دریافت می شود. بقیه انرژی در موجبر ادامه می یابد تا زمانی که به طور کامل توسط نوک منعکس شده و به سمت مبدل باز می گردد. هنگامی که این بسته موج بازگشتی با بریدگی مواجه می شود، مقداری از انرژی آن دوباره منعکس می شود و در ناحیه فعال طنین انداز می شود. بقیه انرژی آن به مبدل PZT برمی گردد و در نتیجه بسته موج دوم وارد می شود. هر سیگنالی که پس از آن شناسایی می شود، نتیجه طنین هایی است که به مبدل باز می گردند. سرعت برشی اولتراسونیک (v) در ناحیه فعال با محاسبه می شود:

$$v = \frac{2L}{dt} \quad (1)$$

که در آن L طول مسیر موج در ناحیه فعال (یعنی ۰،۰۱۵ متر) است.

شکل ۲ تنظیمات آزمایشی را نشان می دهد که برای آزمایش قابلیت اندازه گیری دما موجبر و مقایسه آن با یک ۱ به ۱۰ سنسور PT۱۰۰ RTD استاندارد ملی آلمان (SE۰۱۲، Pico Technology، بریتانیا) ساخته شده است. اندازه گیری ها توسط سنسور RTD در فرکانس ۱ هرتز توسط یک دیتالاگر مقاومت پلاتین (PT-۱۰۴، Pico Technology، بریتانیا) ثبت شد. تحریک و کسب سیگنال های اولتراسونیک توسط یک ژنراتور/اسیلوسکوپ با عملکرد دلخواه (Handyscope HS۳، مهندسی TiePie، هلند) در فرکانس نمونه برداری ۵۰ مگاهرتز انجام شد. سیگنال های دریافتی از موجبر توسط یک تقویت کننده داخلی قبل از دیجیتالی شدن با ۴۰ دسی بل تقویت شدند. یک دستگاه پرینت سه بعدی (که در شکل ۲ دارای برچسب "کلاه" است) برای نگه داشتن موجبر و RTD در حالی که آنها در مایع داخل یک بشر غوطه ور بودند استفاده شد. این همچنین باعث می شود که دو کاوشگر در یک عمق در مایع ثابت شوند و از اتلاف حرارت از طریق دهانه بشر جلوگیری شود. یک صفحه داغ (PC-۶۲۰D، Corning Inc، ایالات متحده آمریکا) برای گرم کردن و هم زدن مایع استفاده شد. روش زیر برای بهبود SNR سیگنال های اولتراسونیک و تعیین زمان رسیدن بسته های موج اتخاذ شد.



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

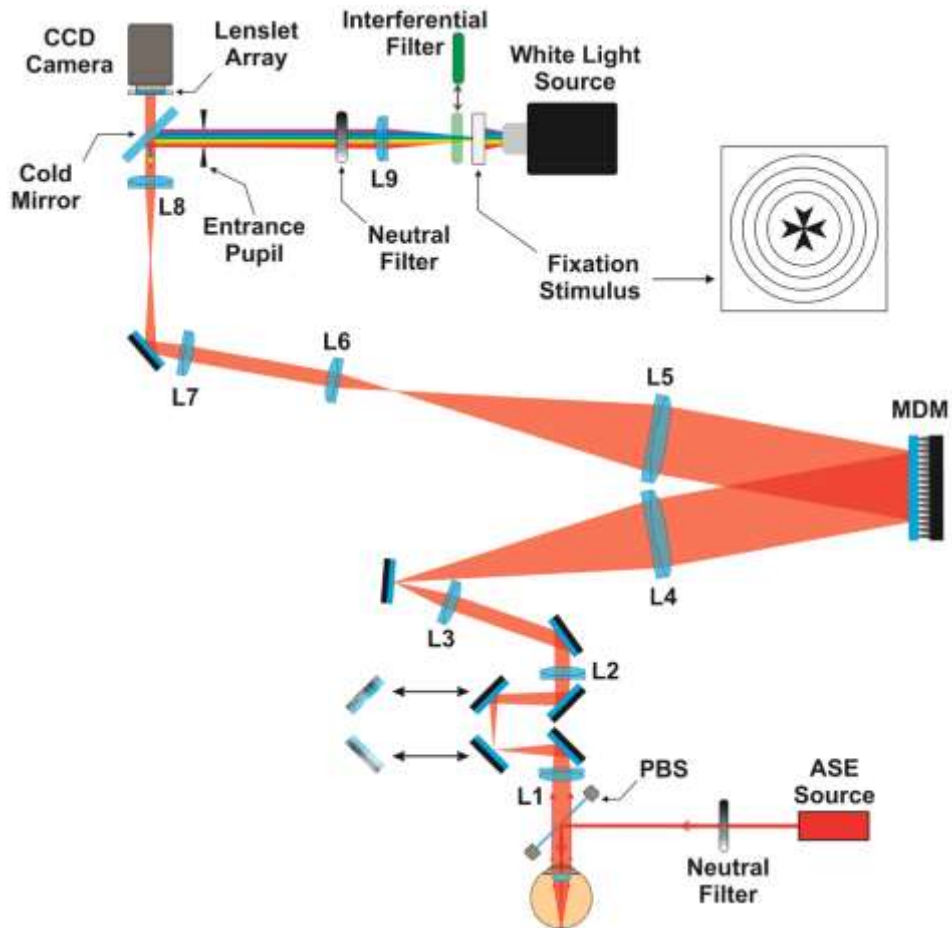
- ۱- برای هر اندازه گیری، سیگنال های متوالی ثبت می شود و متوسط.
- ۲- سیگنال متوسط توسط یک فیلتر باند پاس ارزش درجه ۵ با فرکانس های قطع در ۱,۶ و ۲,۴ مگاهرتز فیلتر می شود.
- ۳- سیگنال فیلتر شده تا ۸۰۰ مگاهرتز نمونه برداری می شود.
- ۴- سیگنال نمونه برداری شده خودکار همبستگی دارد.
- ۵- اوج در همبستگی خودکار با زمان رسیدن مطابقت دارد از بسته های موج مکان دقیق قله ها به دست می آید توسط درونیابی خطی مبتنی بر گرادیان.

۴- نتایج

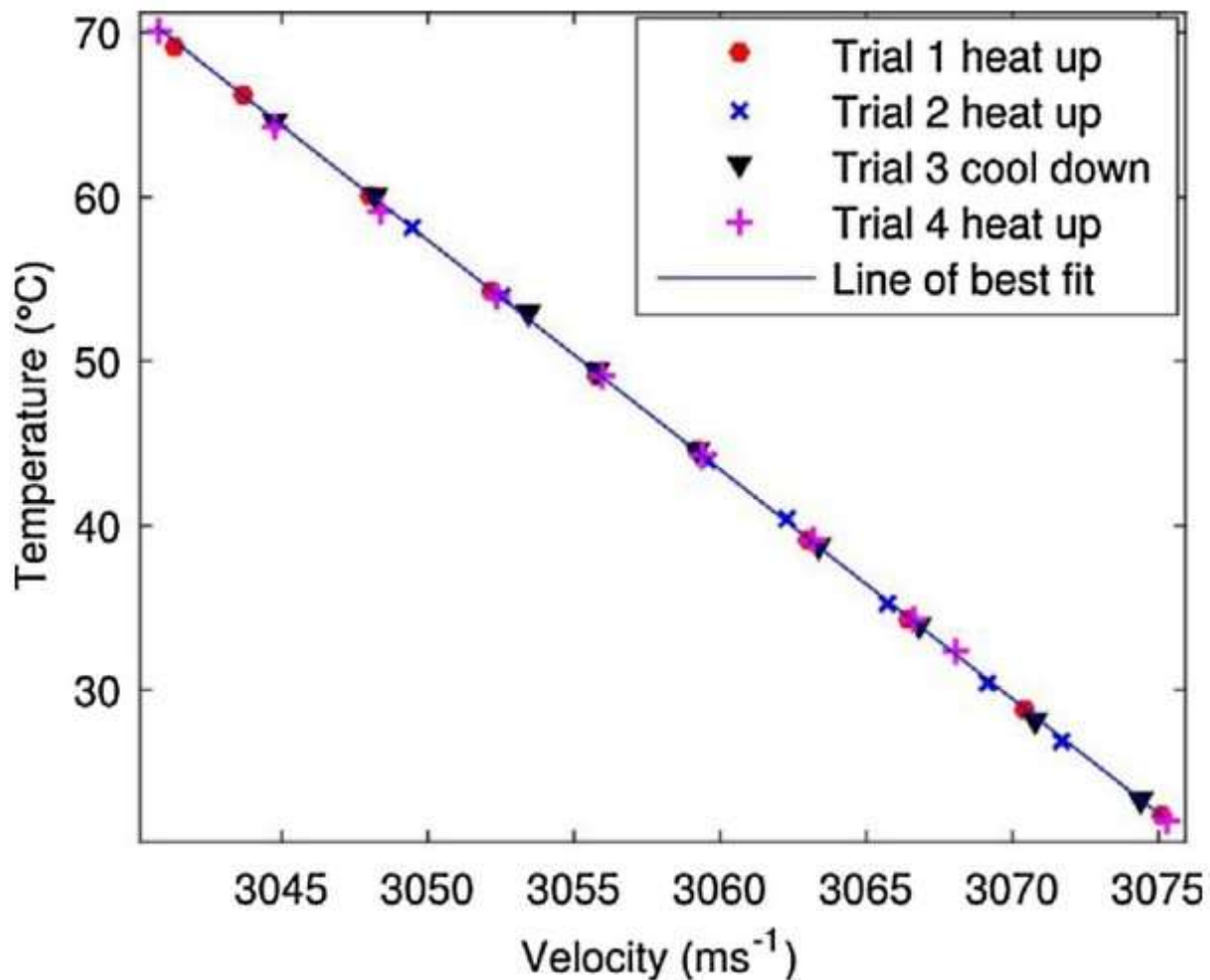
به منظور استفاده از یک موجبر برای اندازه گیری دما، رابطه بین دما و سرعت برشی اولتراسونیک در ناحیه فعال باید تعیین می شود. این کار با کالیبره کردن موجبر در برابر RTD که قبلاً توضیح داده شد انجام شد. هر دو موجبر و RTD در آب غوطه ور شدند و اندازه گیری ها در دماهای مختلف زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد در طول سه چرخه گرمایش و یک چرخه خنک کننده انجام شد. نتیجه کالیبراسیون، نشان داده شده در شکل ۳، نشان می دهد که اندازه گیری ها نسبت به زمان و جهت تغییر دما پایدار بوده اند. رابطه بین دما (T) و سرعت برشی اولتراسونیک به صورت خطی مشاهده می شود و از معادله پیروی می کند:

$$T = -1.4v + 4313.9 \quad (۲)$$

توجه داشته باشید که ضرایب در اینجا برای یک موجبر با ضخامت ۰,۸۸ میلی متر است. در تحقیقات قبل از این تحقیق و مقاله [۸] نشان داده شد که برای فولاد ضد زنگ ۳۰۴ که در محدوده دمایی وسیع تر (تا چند ۱۰۰ درجه سانتی گراد در ثانیه) کار می کند، استفاده از تناسب خطی بین دما و سرعت برشی منجر به افزایش خطا نمی شود. استفاده از تناسب درجه دوم می تواند منجر به کاهش خطا شود، اما هنوز کامل نیست. در این مورد، استفاده از یک جدول جستجو توصیه می شود که بر اساس اندازه گیری های کالیبراسیون باشد و از نظر تجربه این بالاترین دقت را به همراه دارد. شایان ذکر است که برای دقت اندازه گیری مورد نیاز، تغییر در سرعت های ما فوق صوت در نمونه های فلزی مختلف مهم می شود و باید برای هر متالورژی کالیبراسیون انجام شود. همچنین، در دماهای بالا (بالتر از ۷۰۰ درجه سانتی گراد)، تغییرات فاز لوژیکال فلز می تواند منجر به غیرخطی شدن بیشتر بین سرعت و دما شود.

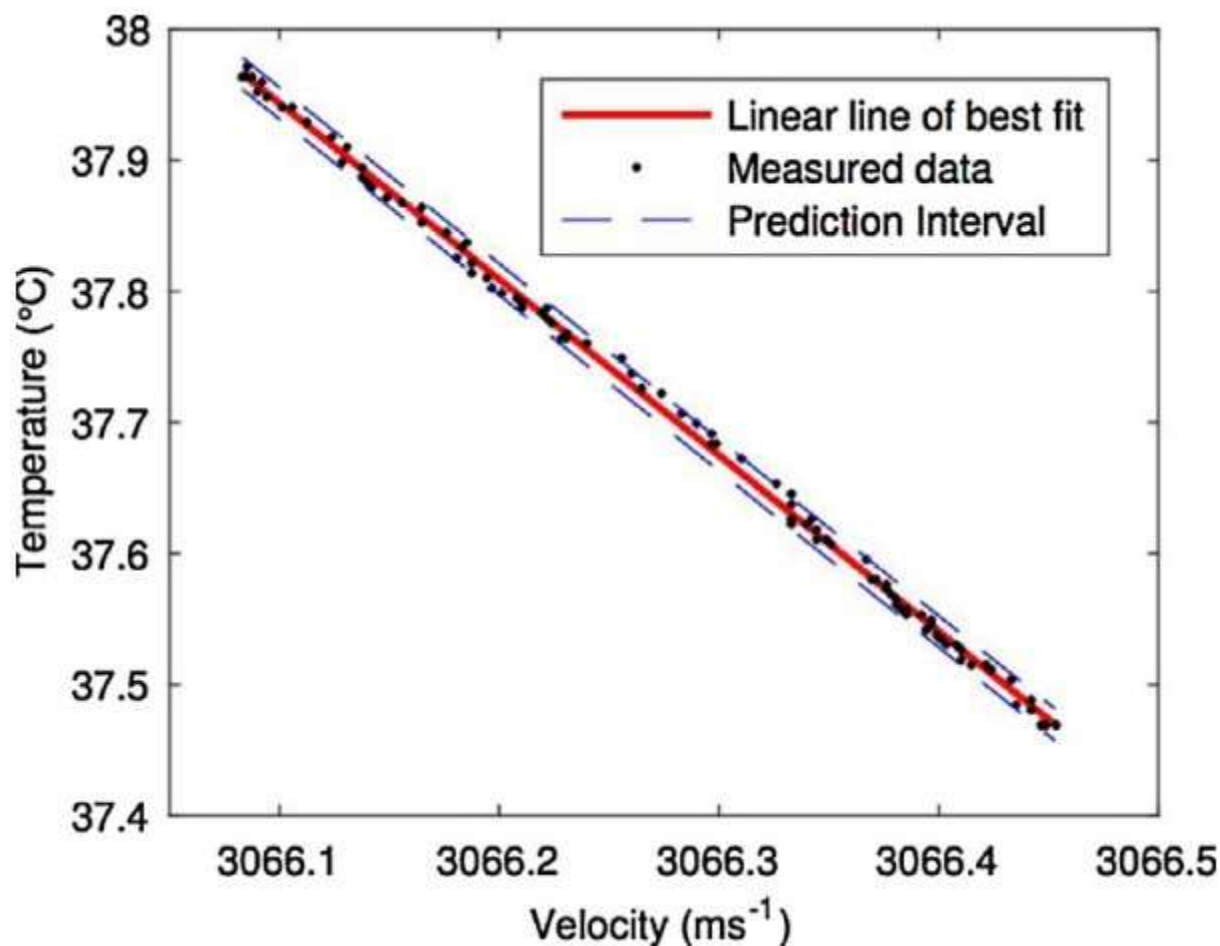


شکل ۲. نمودار شماتیک تنظیمات آزمایشی.

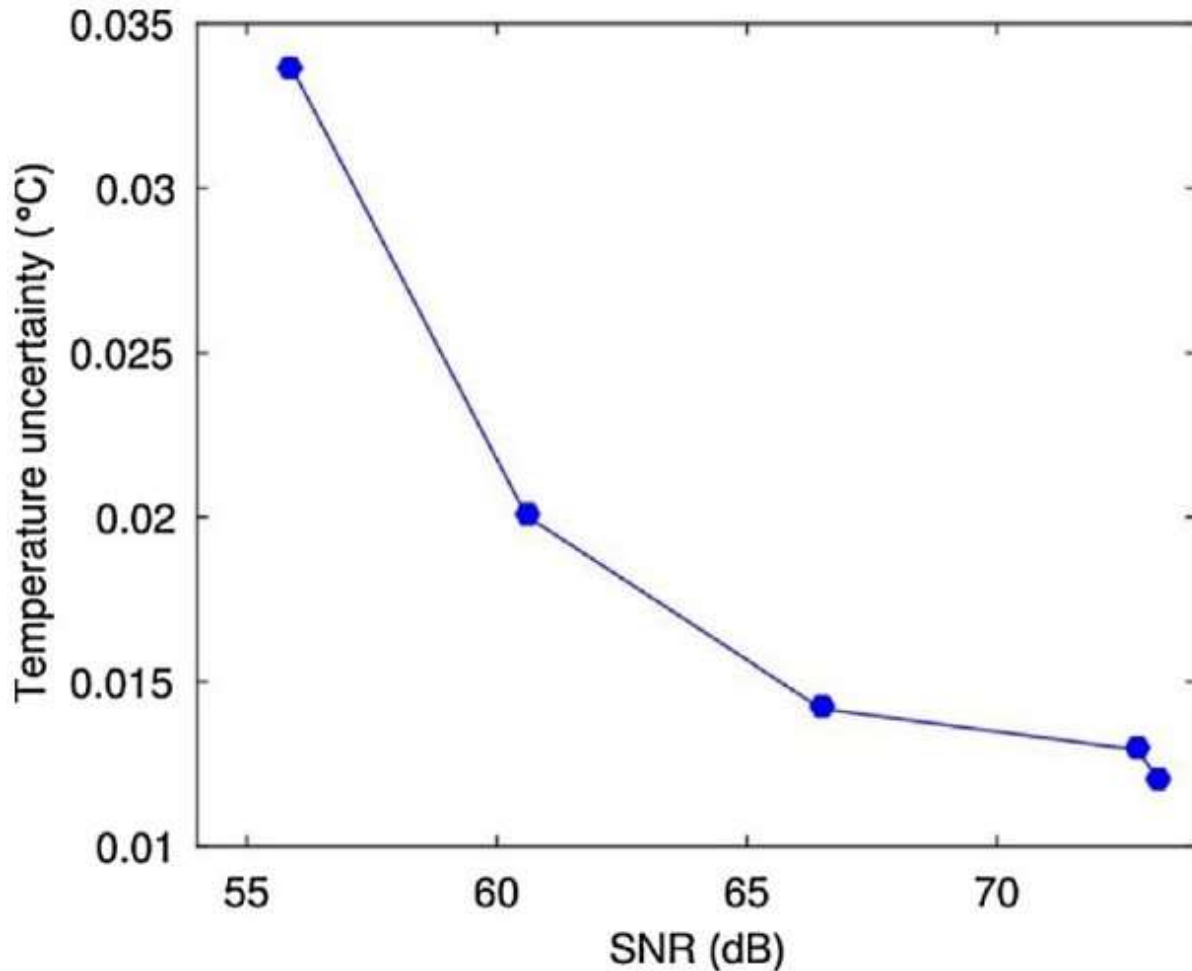


شکل ۳. رابطه بین دما و سرعت برشی اولتراسونیک در یک موجبر با ضخامت ۰,۸۸ میلی متر.

موجبر قادر به اندازه گیری با نرخ ۵ هرتز است. سرعت اکتساب بالا این امکان را فراهم می کند که در هر اندازه گیری به طور میانگین چندین سیگنال اولتراسونیک را به منظور سرکوب نویز تصادفی و بهبود SNR، لازم است که دقت اندازه گیری دما در یک موجبر کالیبره شده کمی سازی شود. چندین اندازه گیری دما و اولتراسونیک که به ترتیب توسط سنسور RTD و موجبر در دمای نسبتاً پایدار به دست آمده اند در شکل ۴ نشان داده شده است. میانگین سیگنال های اولتراسونیک دارای SNR ۶۰ دسی بل هستند. در این کار، SNR با تقسیم دامنه پیک بسته موج دوم بر میانگین ریشه سیگنال در ۰,۱۸ میلی ثانیه اول محاسبه می شود. عدم قطعیت اندازه گیری دمای مورد انتظار بر اساس سطح اطمینان ۹۷,۵٪ بهترین خط برازش شده ۰,۰۲ درجه سانتی گراد محاسبه شد. شکل ۵ نشان می دهد که عدم قطعیت اندازه گیری می تواند با افزایش SNR بیشتر کاهش یابد. بالاترین عدم قطعیت قابل دستیابی $\pm 0,013$ درجه سانتی گراد کمتر از نیمی از دقیق ترین RTD هایی که به صورت تجاری در دسترس هستند (یعنی دقت ۱ به ۱۰ استاندارد ملی آلمان، ۰ درجه سانتی گراد تا $\pm 0,03$ درجه سانی گراد).



شکل ۴. اندازه‌گیری‌های دما و سرعت‌های برشی اولتراسونیک در یک موجیر با ضخامت ۰,۸۸ میلی‌متر که در دمای پایدار ثبت شد. همچنین تناسب خطی و فاصله اطمینان ۹۷,۵٪ نشان داده شده است.

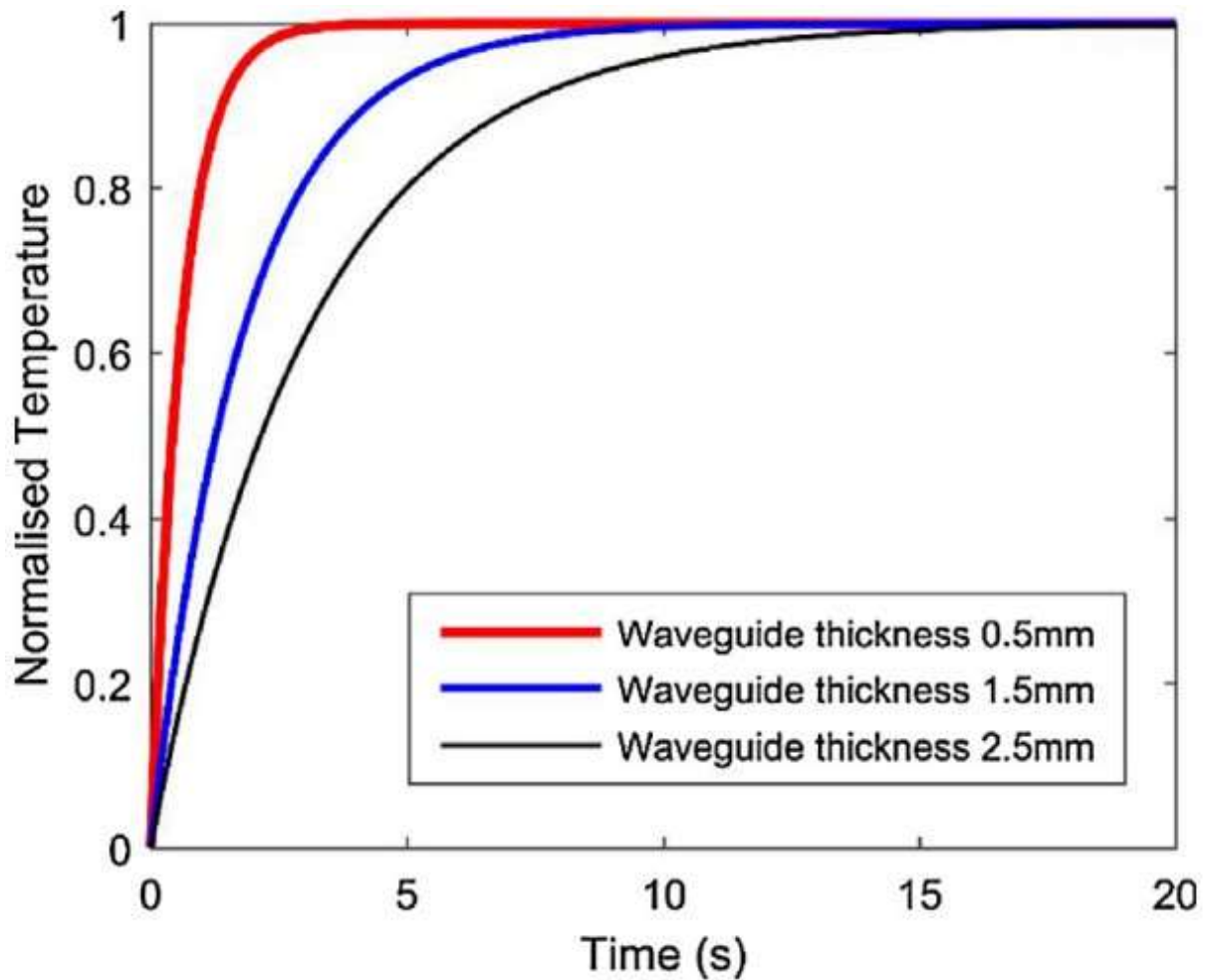


شکل ۵. عدم قطعیت های اندازه گیری دما (بر اساس سطح اطمینان ۹۷,۵٪ و به دست آمده در همان دمای آب) یک موجبر با ضخامت ۰,۸۸ میلی متر.

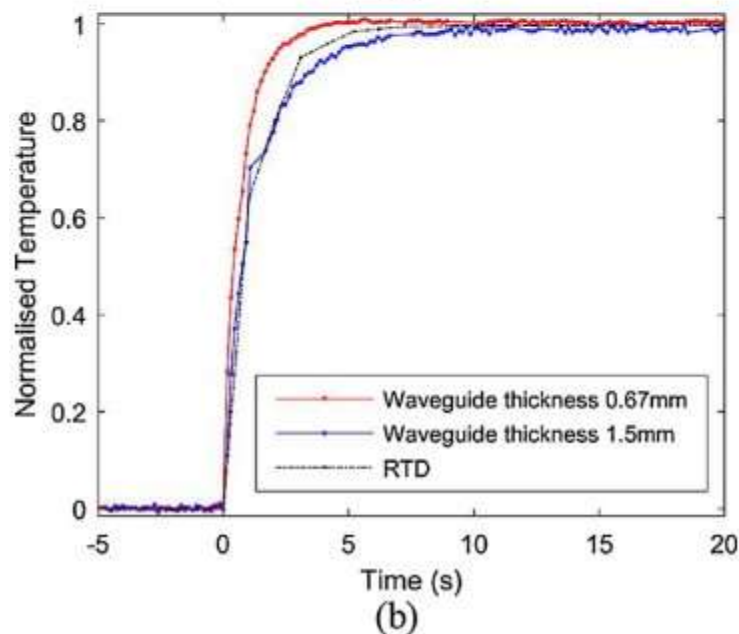
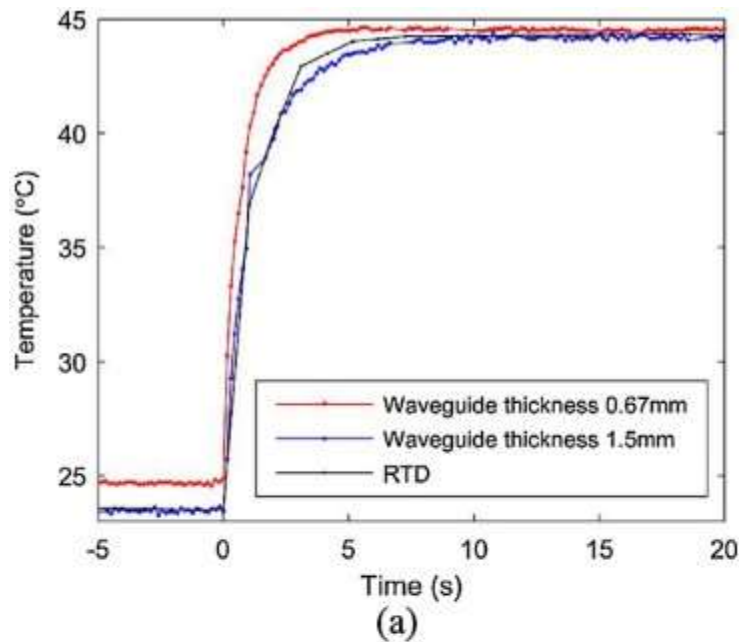
نتایج گزارش شده تاکنون از سیستم‌های شبه ساکن با تغییرات آهسته دما بود. با این حال، پاسخگویی به تغییرات دما نیز یک پارامتر کلیدی برای سیستم های اندازه گیری دما است. موجبر ضخامتی بسیار کوچکتر از دو بعد دیگر دارد. بنابراین، تأثیر هجوم گرما از طریق طول و ارتفاع موجبر را می توان در پاسخ های کوتاه مدت انتقال دما نادیده گرفت و مدل توزیع گرما را می توان به یک مسئله انتشار ۱ بعدی با شرایط مرزی رابین ساده کرد [۹]:

$$-k \frac{dT}{dy} = hT \quad (3)$$

که در آن h ضریب همرفتی سیال اطراف است، k رسانایی فولاد ضد زنگ استفاده شده، و y موقعیت در امتداد ضخامت موجبر است. پیش‌بینی‌های نظری پاسخ‌های موجبر با ضخامت‌های متفاوت در شکل ۶ نشان داده شده است. از آنجایی که خواص همرفتی مایعات بسیار متغیر است، h بهترین مقدار برازش را از یک آزمایش اولیه که از آب به عنوان مایع اطراف استفاده می‌کرد، استفاده کرد. نتایج نشان می‌دهد که هر چه یک موجبر نازک‌تر باشد، سریع‌تر به تغییرات دما پاسخ می‌دهد.



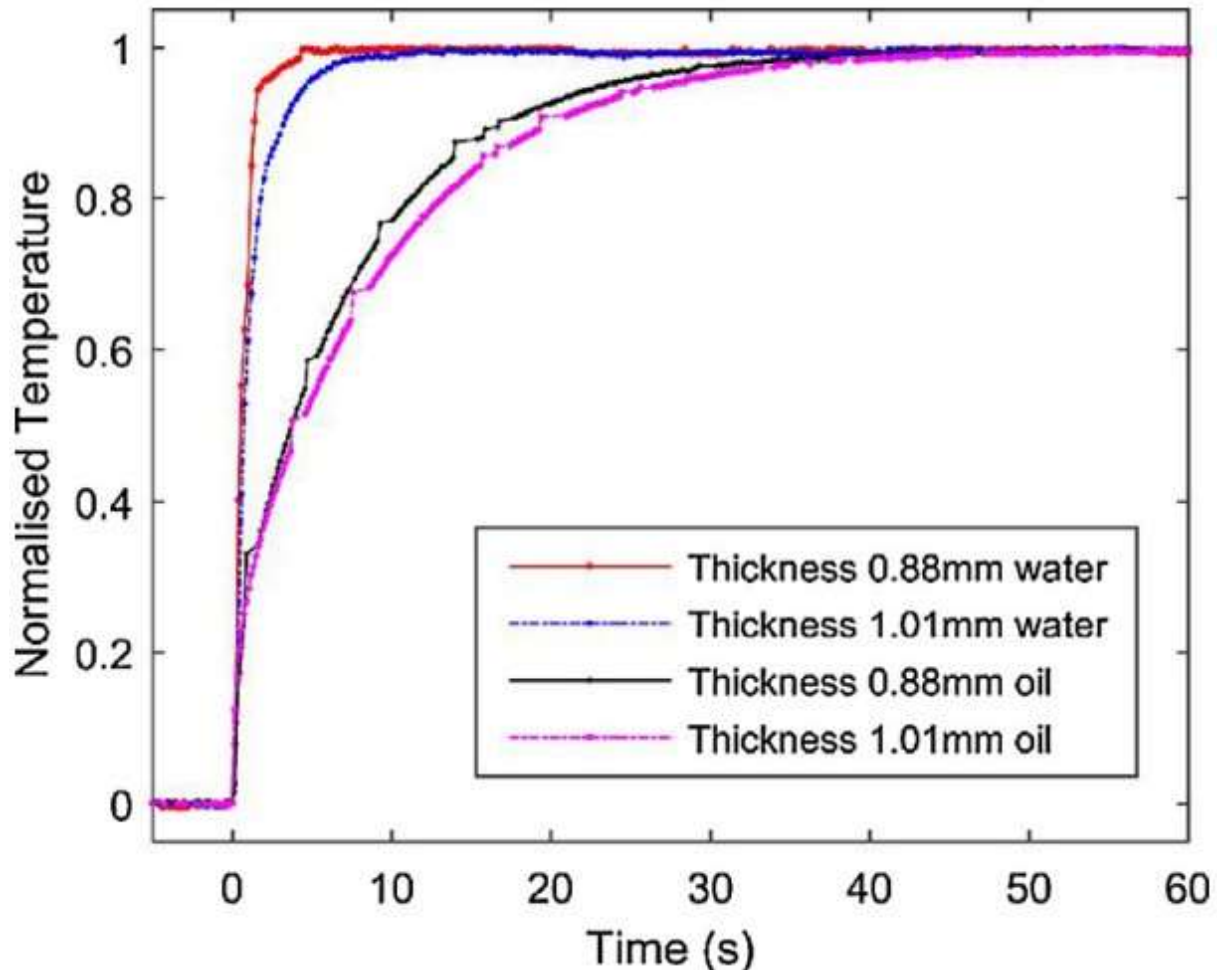
شکل ۶. پیش بینی انتقال دمای سه موجبر با ضخامت های مختلف.



شکل ۷. (a) شکل خام و (b) نرمال شده از انتقال دمای تجربی به دست آمده از RTD و دو موجبر با ضخامت های مختلف.

برای به دست آوردن رفتارهای پاسخ به صورت تجربی، دو موجبر با ضخامت های متفاوت به طور متوالی در آب در دمای پایدار قرار گرفتند. موجبرها به صورت جداگانه کالیبره شده بودند و از داده های کالیبراسیون برای استنباط دما از سیگنال های مافوق صوت استفاده شد. RTD برای ارائه اندازه گیری دمای مرجع استفاده شد. اندازه گیری های دما به دست آمده توسط پروب های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده اند. اندازه گیری های دما به منظور کمک به مقایسه نتایجی که به دلیل محدودیت های آزمایشی، تفاوت های جزئی در دمای اولیه و نهایی نشان می دهند، با تغییر دمای کلی نرمال می شوند. در حالی که نتایج تجربی پیش بینی های نظری را دقیقاً منعکس نمی کنند، اما روند پیش بینی شده را تأیید می کنند. همچنین، نشان داده شده است که پاسخگویی موجبرها می تواند از طریق کاهش ضخامت بدون از دست دادن دقت اندازه گیری، از RTD ها پیشی بگیرد. ضریب

همرفتی مایع اطراف اثر غالب بر پاسخ موجبرها دارد. این در شکل ۸ نشان داده شده است، که در آن مقایسه ای بین اندازه گیری های دمایی بدست آمده توسط دو موجبر در آب و روغن انجام شده است. نتایج به همان دلیلی که قبلاً توضیح داده شد به شکل عادی نمایش داده شدند.



شکل ۸. انتقال دمای عادی دو موجبر با ضخامت های مختلف در مایعات مختلف.

توجه به این نکته ضروری است که پاسخ یک موجبر اساساً توسط مایع اطراف و تا حدی با ضخامت آن تعیین می شود. سادگی در پیکربندی موجبرها به آنها اجازه می دهد تا به طور انعطاف پذیر سفارشی شوند تا پاسخگویی بالاتری داشته باشند.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق و مقاله، به طور تجربی نشان داده شد که اندازه گیری دما با دقت 0.015 درجه سانتی گراد با استفاده از موجبرهای فولادی ضد زنگ با دقت ساخته شده امکان پذیر است. کالیبراسیون با استفاده از یک 1 به 10 سنسور RTD استاندارد ملی آلمان انجام شد و دماها با موفقیت از اندازه گیری سرعت اولتراسونیک به دقت بازسازی شدند که می تواند چندین برابر بهتر از دقت نقل قول RTD باشد. نشان داده شد که پاسخگویی موجبرها قابل تنظیم است و می تواند از RTD ها پیشی بگیرد. خود موجبر قوی، مقرون به صرفه است و تولید انبوه آن آسان است، همانطور که مبدل PZT و سخت افزار تکمیلی آن هستند. بنابراین



می توان معتقد بود که این روش اندازه گیری به یک جایگزین رقابتی برای سایر پروب های دماسنجی تماسی در برخی از کاربردهای اندازه گیری دما تبدیل خواهد شد.

منابع و مراجع

۱. Temperature Sensors Market by Product Type (Bimetallic, Thermoistor, IC, RTD, Thermocouple, IR, Fiber Optics), End-Use Application (Oil & Gas, Chemical, Refining, HVAC, Automotive, Electrical, and Electronics), and Geography – Global Forecast to ۲۰۲۳. Available from: <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/temperature-sensor-market-۵۲۲.html>.
۲. P. Spies, M. Pollak, L. Mateu, Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications, CRC Press, ۲۰۱۵.
۳. A. Afaneh, et al., Ultrasonic measurements of temperature in aqueous solutions: why and how, Phys. Res. Int. ۲۰۱۱ (۲۰۱۱).
۴. L.C. Lynnworth, Ultrasonic Measurements for Process Control: Theory, Techniques, Applications, Academic Press, ۱۹۸۹.
۵. S. Periyannan, P. Rajagopal, K. Balasubramaniam, Ultrasonic bent waveguides approach for distributed temperature measurement, Ultrasonics ۷۴ (۲۰۱۷) ۲۱۱-۲۲۰.
۶. W.-Y. Tsai, H.-C. Chen, T.-L. Liao, High accuracy ultrasonic air temperature measurement using multi-frequency continuous wave, Sens. Actuators A: Phys. ۱۳۲ (۲) (۲۰۰۶) ۵۲۶-۵۳۲.
۷. F. Cegla, Energy concentration at the center of large aspect ratio rectangular waveguides at high frequencies, J. Acoust. Soc. Am. ۱۲۳ (۶) (۲۰۰۸) ۴۲۱۸-۴۲۲۶.
۸. A. Gajdacs, High Accuracy Ultrasonic Degradation Monitoring, Imperial College London, ۲۰۱۵.
۹. Y.A. Cengel, Heat and Mass Transfer: A Practical Approach with EES CD, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, New York, ۲۰۰۶.