

سنسورهای آلتراسونیک  
و کاربری آن در اندازه گیری فاصله



طراحی و ساخت مدار فاصله یاب آلتراسونیک



میشم فنودی - کارشناس الکترونیک



[meisamfanoody3319@gmail.com](mailto:meisamfanoody3319@gmail.com)

Mob: 09151495755



بِسْمِ خدا

## مقدمه

امروزه سنسورها نقش بسیار مهمی را در بسیاری از جنبه‌های زندگی روزانه ما دارد. سنسورها در کارخانجات، صنایع، اتومبیل‌ها، ربات‌ها، تجهیزات پزشکی و ... به کار برده می‌شوند. نظارت و کنترل عملیات مختلف در زمینه‌های بسیار بدون بکارگیری انواع زیادی از سنسورها تحقق نمی‌یابد. سنسور اطلاعات راجع به محیط از قبیل درجه حرارت، فشار، نیرو و غیره را به یک سیگنال الکتریکی می‌کند. وظیفه پردازش سیگنال‌های خروجی سنسورها را مدارات هوشمند انجام می‌دهند. سنسور مورد بحث ما سنسور یا مبدل‌های (ترانسدیوسر) آلتراسونیک هستند. که کاربردهای بسیاری در صنعت، پزشکی، نظامی و الکترونیک دارند. که در فصل مهندسی آلتراسونیک به طور مفصل توضیح داده شده است. در فصل دوم اصول عملکرد سنسورهای آلتراسونیک و ساختمان داخلی آنها و مبدل‌های پیزوالکتریک توضیح داده شده است.

فصل سوم به شرح مشخصات الکتریکی و ساختمانی سنسورهای استفاده شده مدل باز پرداخته شده است. یکی از کاربردهای سنسور آلتراسونیک استفاده جهت فاصله‌یاب است. مدار ساخته شده یک فاصله‌یاب آلتراسونیک است. در فصل چهارم تمام بخش‌های این مدار توضیح داده شده است. و در این مدار از میکروکنترلر PIC جهت پردازش اطلاعات و نمایش بروی 7-Seg استفاده کردیم. که در بخش پایانی فصل چهارم برنامه مورد استفاده میکرو را بررسی کردیم.

در پیوست برگه‌های اطلاعاتی آی‌سی‌های مورد استفاده در این مدار قرار دارد.

## فهرست مطالب

## ۱. مقدمه ..... III

## ۲. فصل یک

۱-۱- مهندسی آلتراسونیک و کاربردهای آن ..... ۱

## ۳. فصل دو

۱-۲- سنسورهای آلتراسونیک و اصول کاربرد پیزوالکتریک ..... ۵

## ۴. فصل سه

۱-۳- شرح سنسورهای آلتراسونیک ..... ۱۱

۲-۳- مقایسه ویژگی‌های دو نوع ترانسدیوسر نوع  $pt$  و  $Ep$  ..... ۱۲

۳-۳- اصول کلی عملکرد ترانسدیوسر ..... ۱۲

۴-۳- انتشار صوت ..... ۱۳

۵-۳- شرایط راه‌اندازی فرستنده ..... ۱۴

۶-۳- استفاده از راه‌اندازهای متفاوت فرستنده ..... ۱۵

۷-۳- مشخصه‌های امپدانس فرستنده ..... ۱۶

۸-۳- مشخصه‌های گیرنده آلتراسونیک ..... ۱۷

۹-۳- مسافت‌یابی با انعکاس آلتراسونیک ..... ۱۹

## ۵. فصل چهار

۱-۴- شرح مدار فاصله‌یاب آلتراسونیک ..... ۲۱

۱-۱-۴- مدار گیرنده سیگنال آلتراسونیک ..... ۲۱

۱-۲-۴- مدار آشکار ساز ..... ۲۲

۱-۳-۴- مدار نگهدارنده سیگنال ..... ۲۳

۱-۴-۴- مدار فرستنده سیگنال ..... ۲۴

۱-۵-۴- مدار نمایشگر ..... ۲۴

۱-۶-۴- مدار تغذیه ..... ۲۵

۱-۷-۴- میکروکنترلر  $PIC16F873$  ..... ۲۶

۲-۴- بررسی نرم‌افزار میکروکنترلر ..... ۳۰

## ۶. پیوست‌ها

## ۷. منابع

## ۱-۱- مهندسی آلتراسونیک و کاربردهای آن

مهندسی آلتراسونیک عبارت است از کاربرد و کاربری امواج مکانیکی با فرکانسی بالاتر از حد شنوایی انسان. در واقع امواج آلتراسونیک امواج مکانیکی هستند که فرکانس آن بالاتر از حد شنوایی انسان ( $20\text{KHz}$  تا  $10^{13}\text{KHz}$ ) است. امروزه از لغت مگاسونیک برای امواج با محدوده بالاتر از  $1000\text{ dBKHz}$  نیز به کار برده می‌شود. ذرات موجود در محیط، بر اثر برخورد با امواج ما فوق صوت در محلشان به جلو و عقب رانده می‌شوند، به طوریکه انرژی تابشی در جهت موازی با ارتعاش ذرات، از ماده عبور می‌کند. با متابعت از انرژی تابشی در جهت موازی با ارتعاش ذرات، ذرات داخل ماده تنها با حرکات محدود جلو و عقب رانده می‌شود، به صورتیکه از انرژی تحمیلی کار انجام می‌دهند. انرژی تحمیلی از امواج مافوق صوت ضمن عبور سبب به هم خوردن نظم و تعادل ماده می‌شود. بدون اینکه هیچ‌گونه تحولی در جنس ماده بوجود بیاورد.

سرعت انتشار صوت در سیالات بستگی به فشار ( $Y$ )، چگالی ( $\rho$ ) و دمای سیال ( $T$ ) دارد.

$$C = \frac{\sqrt{Y.P}}{\rho}$$

روابط زیاد دیگری نیز بر این امواج و انتشار آنها در محیط‌های مختلف حاکم است.

■ سرعت صوت در یک ماده تابعی است از مشخصات آن ماده و وابسته به دامنه موج صوتی می‌باشد. رابطه بین سرعت صوت در یک ماده جامد، چگالی و ثابت‌های آلاستیک به صورت زیر است.

$$V = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}}$$

$V$  سرعت صوت،  $C$  ثابت آلاستیک و  $\rho$  چگالی ماده است.

■ اگر موج صوتی از یک محیط عبور کند، دامنه آن بر اساس رابطه زیر تضعیف می‌شود.

$$A = A_0 e^{-\alpha Z}$$

$A_0$  دامنه انتشار موج

$\alpha$  ضریب تضعیف حرکت موج در محیط در جهت  $Z$

$Z$  فاصله از موقعیت اولیه

■ امپدانس صوتی یک ماده ( $Z$ ) حاصلضرب چگالی ( $\rho$ ) در سرعت صوتی ( $V$ ) آن ماده است.

$$Z = \rho.V$$

## ۱-۲- کاربردهای امواج آلتراسونیک:

یکی از کاربردهای مهم امواج آلتراسونیک، استفاده از ضربه ناشی از کاریتاسیون ایجاد شده توسط آن، در فرآیند شستشوی آلتراسونیک می‌باشد. اصول کلی این روش مبتنی بر غوطه‌وری قطعات مورد نظر در یک مایع واسط می‌باشد. که این مایع، توسط یک مولد موج آلتراسونیک با

فرکانس و شدت بسیار بالایی مرتعش شده و کاریتاسیون به وجود آمده، عمل شستشو و پاک کردن قطعه را انجام می‌دهد. کاریتاسیون عبارتست از شکل‌گیری و انهدام مرتب حباب‌های بخار درون مایع به خاطر خلاء ناشی از عقب‌نشینی سطح و موج فشار ناشی از برگشت سطح است. در این پدیده به خاطر خلاء نسبی، جوشش حجمی ولی بدون افزایش دمای مایع صورت می‌پذیرد. هر چند برگشت سطح و ایجاد موج فشار، دمای محلی در حدود ابعاد مولکولی در نزدیکی محل ترکیدن حباب بسیار زیاد است. محاسبات نشان می‌دهد که در این محل، دمایی بیش از  $5500^{\circ}\text{C}$  و فشاری بیش از  $67\text{Mpa}$  تولید می‌شود.

اما از دیگر کاربردهای امواج آلتراسونیک می‌توان از موارد زیر صحبت نمود.

### صنعت:

- ✕ عملیات اتصال: جوشکاری مواد غیر هم جنس، دوختن، آب‌بندی و لحیم‌کاری
- ✕ عملیات ماشینکاری: سوراخکاری، حفره‌زنی و ایجاد سطوح آزاد به کمک فناوری CNC
- بروی مواد تُرد
- ✕ کمک به عملیات شکل‌دهی: آهن‌گری، ریخته‌گری مداوم، اکستروژن و کشش عمقی
- ✕ کمک به عملیات ماشینکاری سنتی: تراشکاری، فرزکاری، سوراخ‌کاری و سنگ زنی
- ✕ کمک به فرآیندهای نوین تولید: در ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، لیزر و تخلیه الکتریکی برای بهبود خواص سطحی و افزایش نرخ بار برداری.
- ✕ عملیات آئروسول: رطوبت‌سازی، خشک‌کردن افشانه‌ای، سردسازی با تبخیر، احتراق بهتر سوخت از طریق اتمیزه کردن آن
- ✕ بهبود پوشش دهی بدنه خودرو و قطعات صنعتی توسط روش الکتروفوریز
- ✕ آزمون‌های مخرب و غیر مخرب
- ✕ آزادسازی تنش‌های پس ماند، پلیسه‌زدایی، شناورسازی، کف‌زایی و کف‌زدایی،
- ✕ باستان‌شناسی (تمیز کردن سفال‌های شکسته و سنگواره‌ها و ترمیم آنها)

### بهداشت و پزشکی:

- ✕ پاک کردن شیر و دیگر مایعات غذایی از میکروب
- ✕ طب تشخیصی سونوگرافی و تهیه مواد دارویی و...



✕ جراحی توسط چاقوی آلتراسونیک؛ تخریب سلول‌های بدخیم؛ عمل آب مروارید چشم؛ پیشگیری از پوسیدگی، جرم‌گیری و عصب‌کشی دندان‌ها؛ شکستن سنگ کلیه، مثانه و کبد؛ برداشتن چربی اضافی بدن (لیپوساکشن)؛ برداشتن بافت‌های مرده و مواد خارجی زخم و نیز در سونوگرافی

### الکترونیک:

✕ استفاده از رادارهای آموزشی، سونار و نقشه برداری دریایی  
 ✕ هدایت کشتی‌ها و تعیین محل و سرعت و جهش حرکات زیر دریایی  
 ✕ اندازه‌گیری زاویه، مسافت‌یابی و تست‌های غیر مخرب و مخرب  
 ✕ اندازه‌گیری جریان (*Flow Meter*)، رباتیک، فوکوس اتوماتیک در دوربین‌ها، کنترل فاصله در پارک‌کردن اتومبیل، سیستم‌های امنیتی و آشکارسازی اجسام.  
 از کاربردهای مهم امواج آلتراسونیک در الکترونیک که توسط انواع مختلف سنسورهای آلتراسونیک محقق می‌شود کنترل و اندازه‌گیری می‌باشد. (شکل ۱)

**P** اندازه‌گیری سطح و ارتفاع مایعات و جامدات در مخازن و سیلوها.

**P** اندازه‌گیری ابعاد اجسام و پردازش تصویر

**P** حضور یا عدم حضور اجسام

**P** شمارش اجسام روی نقاله‌های خط تولید و یا حتی شمارش افراد عبوری از یک مکان

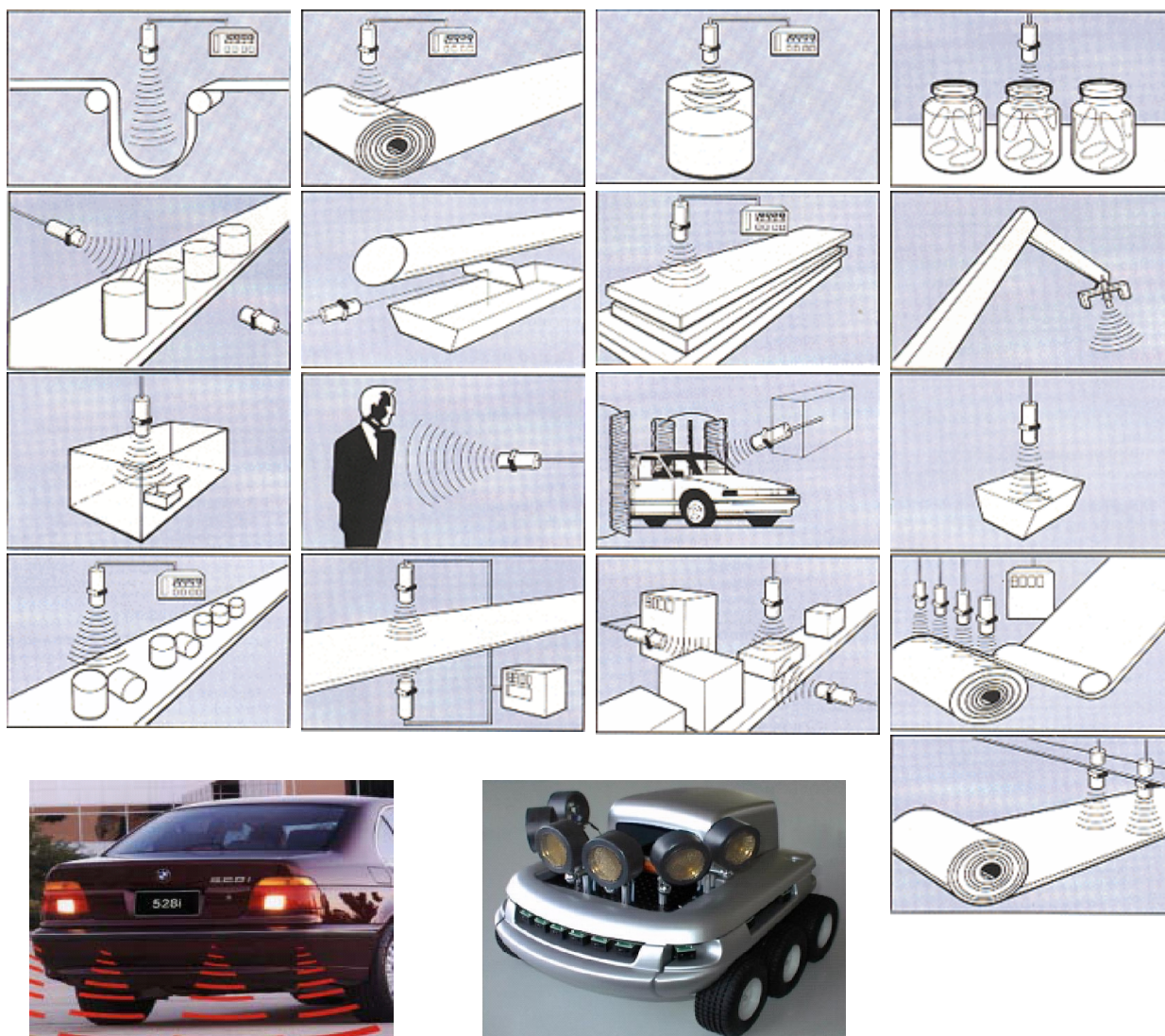
**P** اطمینان‌پذیری از پر یا خالی بودن ظروف در خط تولید مواد غذایی

**P** آشکارسازی قطع شدگی در خط تولید کابل و سیم

**P** اندازه‌گیری زوایا

**P** موارد امنیتی و حفاظتی مانند دزدگیر اتومبیل و منازل

سنسورهای آلتراسونیک با توجه به کاربردهای متفاوت انواع مختلفی دارند. در بخش بعد ابتدا از لحاظ فیزیکی و ساختار بررسی می‌کنیم، سپس به طور نوعی سنسور مورد استفاده را بیشتر بحث می‌کنیم.



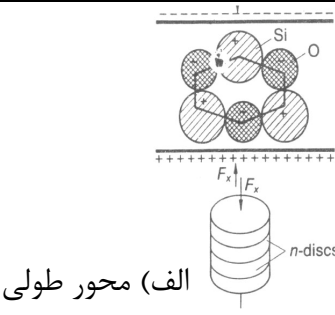
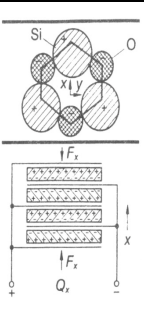
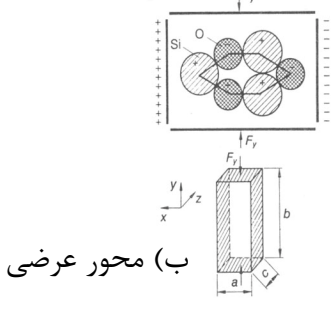
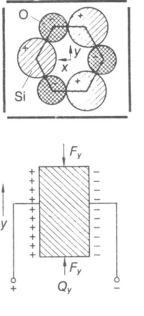
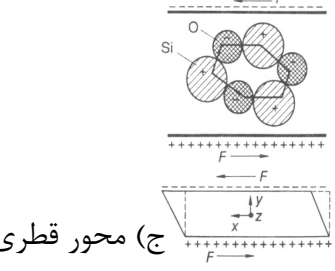
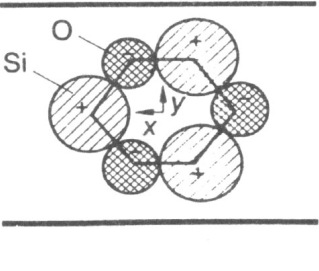
شکل ۱) کاربردهای سنسورهای آلتراسونیک جهت کنترل، اندازه‌گیری و آشکارسازی

## ۲-۱- سنسورهای آلتراسونیک و اصول کار پیزوالکتریک:

طبیعت روش‌های مختلفی برای ایجاد و دریافت امواج مافوق صوت فراهم کرده است. توسعه تکنولوژی به انسان اجازه افزایش روش‌های جدیدی را بر روش‌های طبیعی داده است. در این بین اثر پیزوالکتریک نقش قطعی را ایفا کرده است.

اگر برخی کریستال‌های خاص در معرض فشار مکانیکی قرار گیرند، بارهای الکتریکی تولید می‌شوند و این پدیده به عنوان اثر مستقیم پیزوالکتریک شناخته شده است.

کریستال‌ها با حضور یک محور قطبی یا با عدم وجود یک مرکز تقارن مشخص می‌شوند. کوارتز بهترین نمونه شناخته شده این طبقه است (شکل ۲). اثر مستقیم پیزو الکتریک قابل برگشت است و بنابراین در تولید صدا بکار می‌رود. اگر یک میدان الکتریکی متناوب به کوارتز اعمال شود، نوسانات مکانیکی متناظر تولید می‌شود و به صورت امواج صوتی منتشر می‌شوند.

| فشرده                                                                                                      | ساختار ساده شده کریستال غیر فشرده                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>(الف) محور طولی</p> |   |
|  <p>(ب) محور عرضی</p>  |  |
|  <p>(ج) محور قطری</p>  |  |

شکل ۲) انواع صورت‌های اثر پیزو الکتریک

در قبال کوارتز خواص پیزوالکتریک در برخی مواد پیزوسرامیک از قبیل *Brium titant* یا *Zirconium titant* یا موادی از قبیل سولفات لیتیم وجود دارد. به کار بردن عناصر مبدلی که از این مواد ساخته شده در مایعات گازها و جامدات ممکن است.

در هر حال تفاوت قابل ملاحظه‌ای در رفتار این مواد وجود دارد. اگر این مبدل توسط پالسی تحریک شود، با فرکانس معینی نوسان می‌کند که به سرعت صدا و چگالی قطعه بستگی دارد. تنها قسمتی از انرژی صوتی از محیط قطعه عبور کرده و واحد مرزی می‌شود. این می‌تواند به صورت فاکتور انتقال  $T$  بیان شود.

$$T = 2Z_m / (Z_m + Z_p)$$

که  $Z_m$  و  $Z_p$  امپدانس صوتی محیط،  $Z_m = P_m.C_m$  و ماده پیزوالکتریک  $Z_p = P_p.C_p$  می‌باشند. در مبدل پیزوالکتریک با رابط آب  $T$  تقریباً برابر 0.8 و با رابط هوا مقدار آن حدود  $10^{-5}$  است. روشن است که در مقایسه با محیط آب تنها قسمت کوچکی از انرژی از قطعه پیزوالکتریک به هوای پیرامون منتقل می‌شود. بهبود کارایی انتقال انرژی با بکار بردن لایه‌های تطبیق امپدانس در سطح انتقال قطعه پیزوالکتریک امکان پذیر است.

مبدل‌ها یا ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک ضریب کیفیت بالایی دارند. اگر کریستال پیزوالکتریک تحریک شود، زمان میرایی طولانی خواهد داشت. اگر نوسان‌کننده میرا گردد تنها ایجاد پالس‌های خیلی کوتاه صوتی امکان پذیر خواهد بود. اگر مبدل میرا نشده‌ای در فرکانس تشدید تحریک شود، ضریب کیفیت بالای آن باعث پخش امواج مافوق صوت با شدت بالا می‌گردد. این مزیت نوسان‌سازهای پیزوالکتریک در مبدل گیرنده باند باریک به کار می‌رود. یک ماده جدید و بسیار جالب برای سنسورهای مافوق صوت *PVDF* است. که از یک لایه نازک فیلم پلیمر پلاریزه با ضخامت چند ده میکرو میلیمتر تشکیل شده است.

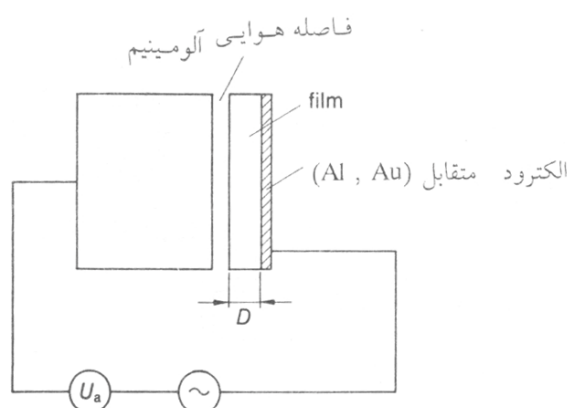
از این ماده برای تولید کردن انواع مبدل انرژی با پهنای باند وسیع می‌توان استفاده کرد. امپدانس صوتی آن از مولد پیزوسرامیک کوچکتر است.

$$(Z_{PVDF} = 4 \times 10^6 \text{ kgs}^{-1} \text{m}^{-2}, Z_{piesoceramic} = 2 \times 10^7 \text{ kgs}^{-1} \text{m}^{-2})$$

گرچه این ضریب کمتر بودن تبدیل انرژی صوتی به انرژی الکتریکی نسبت به مواد پیزوالکتریک را توصیف می‌کند، اما فیلم پلیمر به عنوان گیرنده در هر دو محیط مایع و گاز به طور فزاینده‌ای به کار می‌رود. دلیل اصلی این امر مزایایی است که از پهنای باند وسیع حاصل شده است. فیلم پلیمر اخیراً به عنوان ماده‌ای برای مبدل‌های فرستنده، برای مثال به عنوان عنصر تبدیل انرژی برای ایجاد صدا در هوا بکار می‌رود.

گونه مهم دیگری از سنسورهای مافوق صوت شامل مبدل‌های انرژی الکترواستاتیک، که به عنوان مبدل‌های سل نیز شناخته شده‌اند (شکل ۱)، هستند. یک الکتروود از یک صفحه بزرگ و

سفت و دیگری توسط یک لایه فلزی هادی تشکیل شده که آن هم به صفحه نازک دیافراگم متصل شده است. ما بین فیلم و الکتروود مذکور یک لایه هوا وجود دارد در حین کار ولتاژی ثابتی به خازن اعمال می شود که باعث کشیده شدن فیلم به طرف صفحه می شود. ولتاژی متناوبی با دامنه کمتر از ولتاژ ثابت مذکور باعث تغییر نیرو بین صفحات و تغییر موقعیت دیافراگم می شود. هوای بین الکتروود و فیلم مشابه فنر و دیافراگم به عنوان جرم عمل می کند. سیستم جرم و فنری که اینطور تشکیل شده، فرکانس تشدید و وابسته به لایه هوا و دیافراگم دارد. با تغییرات مکانیکی امکان تنظیم فرکانس تشدید وجود دارد. هر چه صافی سطح بیشتر باشد به همان اندازه پهنای باند مبدل بیشتر و زمان پاسخ آن کوتاه تر است.



شکل ۳) مبدل الکترواستاتیک

با وجود اینکه سنسورهای مافوق صوت مدت زیادی است که در بخش های بسیار از قبیل آزمایش غیر مخرب مواد و به طور روزافزون در وسایل پزشکی، مثلاً توموگراف مافوق صوت، به کار می روند. اما فقط در سالهای اخیر است که سنسورهای مافوق صوت نقش مهمی ایفا می کنند. دلیل این مسئله فقدان عناصر مبدل مافوق صوت مناسب با قابلیت استفاده در محیط های صنعتی، با حضور اصوات فرکانس بالا و مزاحم با شدت بالا، است.

قابلیت تحلیل اطلاعات با تکنولوژی میکروالکترونیک عامل مهمی برای بیرون کشیدن اطلاعات با بکارگیری الگوریتم های مناسب شده است. برخی از کاربردهای سنسور مافوق صوت شامل اندازه گیری فاصله ها، آشکارسازهای صنعتی، طبقه بندی اشیاء و اندازه گیری فرآیند است. نسبت به انتشار امواج مافوق صوت دو پارامتر اصلی وجود دارد که در ادامه با استفاده از مثالی، در مورد فشار صوت متناوب  $P=P(x,t)$ ، نشان داده می شود:

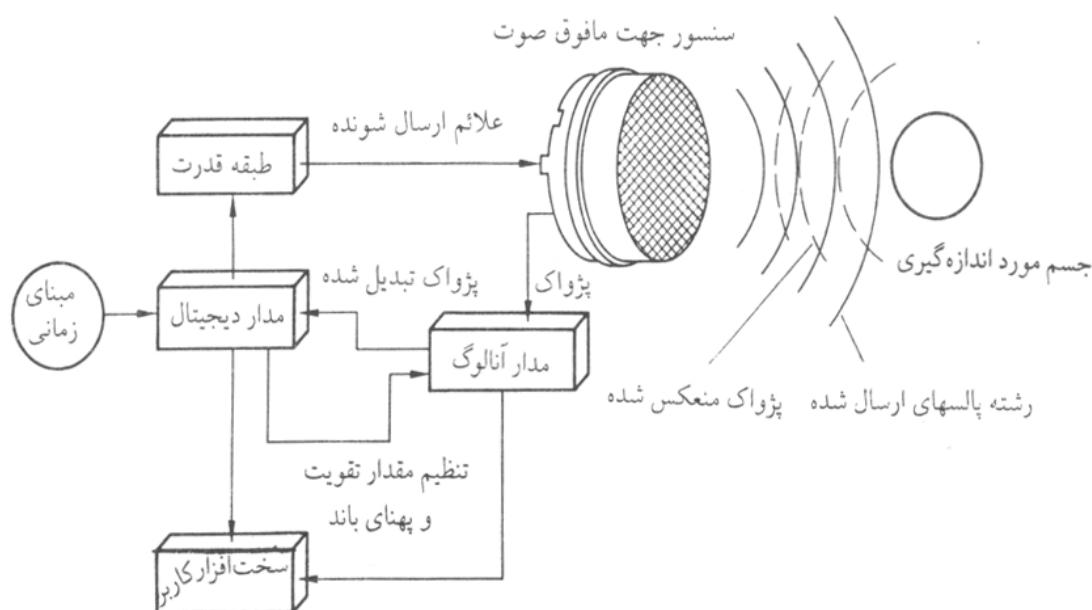
$$P = P \exp(j\omega(t - \frac{x}{c})) \exp(-\alpha x)$$

$c$  سرعت صوت،  $\alpha$  جذب صوت،  $x$  فاصله طی شده،  $t$  زمان و  $\omega$  فرکانس زاویه ای است. خصوصیات محیطی که صوت توسط آن انتقال می یابد بر هر دوی  $c$  و  $\alpha$  اثر می گذارد.

سنسورهای مافوق صوت به عنوان سنسورهای مسافت یا تفکیک کننده در ابتدا به صورت انتشار پالس صوتی و دریافت انعکاس آن در هوا به کار گرفته می شدند. پالس صوتی به وسیله فرستنده ای منتشر می شد و توسط جسمی که مورد نظر اندازه گیری بود منعکس می گردید و با مبدل دیگری دریافت می شد. زمان انتقال برای تعیین مسافت بکار می رفت:

$$L = c.t$$

همین اصول می تواند برای اندازه گیری ارتفاع از سطح بکار رود. انواع زیادی از این نوع سنسورهای مسافت به صورت تجاری در دسترس هستند. یکی از نمونه های شناخته شده سیستم اندازه گیری مسافت به طریق مافوق صوت پولاروید<sup>۱</sup> برای دوربین عکاسی است. که در آنها سنسورهای الکترواستاتیک بکار رفته است. (شکل ۴) اصول ارسال و دریافت را نشان می دهد. کمترین فاصله قابل اندازه گیری ۱۱ میلیمتر است. در کارکرد عادی اجسام با فاصله ۱۰/۷ متر قابل آشکارسازی است.



شکل ۴) نحوه عمل ارسال و دریافت در سیستم اندازه گیری مافوق صوت مسافت پولاروید

به طور کلی، حدود اندازه گیری، تحلیل و دقت این نوع سنسور مسافت بستگی به فرکانس و شکل هندسی مبدل صوتی دارد. مبدل های با فرکانس بالا پرتو صوتی را بهتر متمرکز کرده و بدین ترتیب دقت بیشتری را بدست می آورند و در عین حال مقدار تضعیف آن بیشتر بوده و فاصله های قابل اندازه گیری کوتاه تر می شود. عموماً این نوع مبدل در فرکانس حدود ۲۰ الی ۴۰۰ کیلو هرتز به کار می رود. در زمان کاربرد لازم است که اطلاعات پایه از پارامترها محیط نظیر درجه حرارت، فشار، رطوبت و یا آلودگی هوا که در اندازه گیری موثرند، در نظر گرفته شود.

<sup>۱</sup> polaroid

سنسورهای مافوق صوت به عنوان آشکارساز حضور جسم به کار می‌روند. اگر بین فرستنده و گیرنده مسیر صوتی برقرار باشد و جسمی از میان آن مسیر عبور کند خروجی سنسور عبور جسم را در زمان قطع پرتو صوتی نشان می‌دهد.

کاربرد سنسور مافوق صوت به عنوان تفکیک اشیاء و آشکارسازی اجسام بسیار جالب است. بر عکس سنسورهای نوری که لبه‌های سطوح را با دقت بالا تشخیص می‌دهند، سنسورهای مافوق صوت لبه‌های سه‌بعدی را می‌توانند آشکار کنند. نتایج عالی با جمع اصول این دو سنسور یعنی به عبارت دیگر با تلفیق ماتریس سنسورهای مافوق صوت با دوربین ویدویی حاصل می‌شود. حساسیت بالای مواد پیزوالکتریک آنها را بویژه برای ساختار بندی این نوع ترکیب توزیع شده سنسورها مناسب کرده است.

چنین سنسوری در ربات‌های رنگ پاش، که برای رنگ کردن سطوح بزرگ و نسبتاً پهن بکار می‌روند، استفاده می‌شود. کاربردهای بسیاری وجود دارند که در آنها علاوه بر تحلیل سرعت و جهت جسم در حال حرکت نیاز به طبقه‌بندی جسم نیز هست. نمونه‌ای از این کاربرد، انتخاب اجزاء منفرد برای یک ربات مونتاژ کار است. این ربات باید دقیقاً تشخیص بدهد که کدام جزء ترکیب‌کننده برای مونتاژ به او انتقال داده شده است.

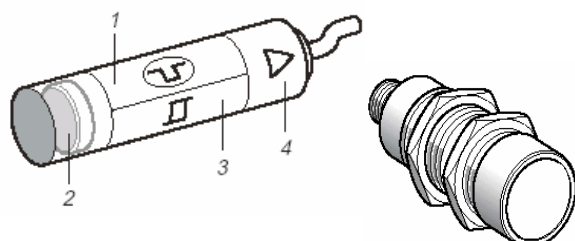
همچنین سنسورهای مافوق صوت که میزان انتشار صوتی را آشکار می‌کنند مهم بوده و اطلاعات مربوط به تمام انواع شکست‌ها و پارگی‌ها را فراهم می‌کنند. یکی دیگر از حیطه‌های کاری برای سنسورهای مافوق صوت، حیطه گسترده اندازه‌گیری فرآیند است. اگر خودمان را محدود به مشاهده سیستم‌های مایع کنیم می‌توانیم بین دو بخش نحوه انتشار صوت، یعنی بین انتشار در مایعات ساده و انتشار در سیستم‌های پیچیده متشکل از بیش از یک ماده را تشخیص بدهیم ابتدا داریم:

$$C^2 = \frac{1}{\rho b}$$

$$a = \frac{w^2}{\rho C^3} (hB + \frac{4}{3}hS)$$

که  $\beta$  قابلیت تراکم،  $\rho$  غلظت و  $\eta B$  و  $\eta S$  به ترتیب ویسکوزیتی حجم و چسبندگی هستند. اگر امکان اثبات تعیین رابطه بین پارامترهای اندازه‌گیری شده  $C$  و  $\alpha$  و ویژگی‌های سیستم باشد، آنگاه امکان بدست آمدن اطلاعات جالب جدید درباره سیستم‌های پیچیده، پیشرفت واکنش‌ها و ناپایداری فرآیند خواهد بود. توسط تلفیق سنسورهای دیگر ساخت سیستم‌های سنسور، در برگیرنده کاربردهای جدید در شیمی، صنایع داروسازی، صنایع غذایی و بیوتکنولوژی ممکن خواهد بود.

در مطالب گذشته کاربردها و اصول کلی کار سنسورهای مافوق صوت را گفتیم. اما می‌خواهیم به صورت متمرکز یکی از انواع سنسورهای آلتراسونیک و کاربرد آن را بررسی کنیم. سنسورهای آلتراسونیک عمدتاً دو نمونه هستند. یک نمونه از این سنسورها، فرستنده و گیرنده در یک یک قرار گرفته‌اند. و حتی در نمونه‌ای ابزارهای پردازشی نیز در داخل این یک وجود دارد. (شکل ۵)



۱. مولد ولتاژ بالا

۲. مبدل پیزوالکتریک (فرستنده و گیرنده)

۳. طبقه پردازش سیگنال

۴. طبقه خروجی

شکل ۵) سنسور آلتراسونیک مدل ۱

اما در نمونه‌ای از فرستنده‌های آلتراسونیک فرستنده و گیرنده در دو یک مجزا قرار دارند. این فرستنده‌ها خود به دو نوع هستند و دارای مشخصات منحصر به فردی هستند، که در بخش بعدی مفصلاً بررسی می‌کنیم. (شکل ۶)

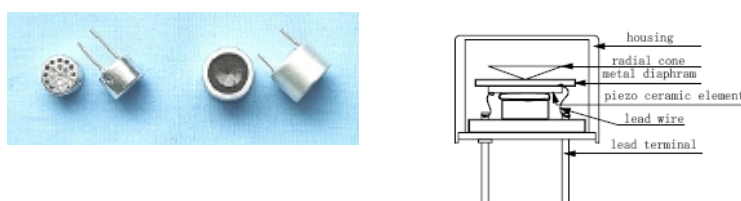


شکل ۶) سنسورهای فرستنده و گیرنده آلتراسونیک

### ۳-۱- شرح سنسورهای آلتراسونیک

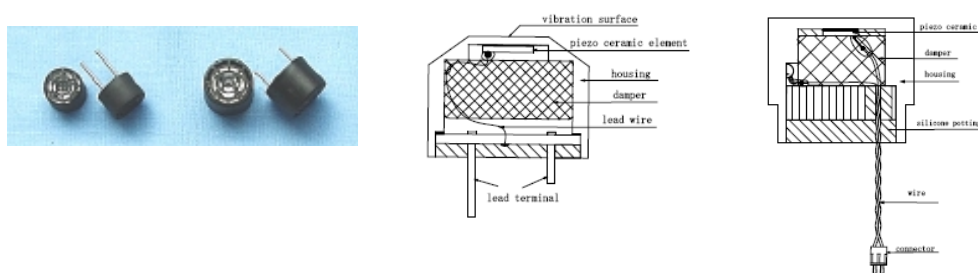
مبدلها یا ترانسدیوسرهای<sup>۱</sup> متداول از یک صفحه سرامیکی پیزو بهره می گیرند، و طراحی آنها بر اساس اصول کارکرد پیزوالکتریک است. این صفحه با فرکانسی بین 20kHz تا 60kHz تشدید می کند و انرژی آلتراسونیک را تشعشع و یا دریافت می کند.

این نوع ترانسدیوسرها در دو مدل ساخته می شوند. ۱. ترانسدیوسر آلتراسونیک نوع باز<sup>۲</sup> که به صورت بی حفاظ طراحی شده اند و فقط یک پوشش توری شکل بروی بدنه خارجی قرار گرفته است. پیزو سرامیکی خم شده با یک فلز مخروطی در پشت این توری محافظ نصب شده است. این نوع ترانسدیوسرها دارای فشار صوتی و حساسیت بالایی با ساختمان مخروطی یک شکل هستند. همچنین به طور خاص برای کاربردهای متوسط انتشار در هوا به کار گرفته می شوند. (شکل ۷)



شکل ۷) ساختمان ترانسدیوسر نوع باز

۲. ترانسدیوسر نوع بسته<sup>۳</sup> دارای پیزوی سرامیکی خمیده ایست که به طور مستقیم بر روی سطح زیرین بالای بدنه سوار شده است. و در فرکانس تشدید مطلوب تنظیم شده است. این نوع ضد آب و ضد گرد غبار است. تمام اجزا و المانها در داخل یک پوشش فلزی قرار دارد و با این پوشش فلزی در شرایط محیطی سخت قابل استفاده است. (شکل ۸)



شکل ۸) ساختمان ترانسدیوسر نوع بسته

<sup>۱</sup> عموماً سنسورهای آلتراسونیک چون انرژی الکتریکی را به آلتراسونیک (مکانیکی) و بالعکس تبدیل می کنند، بجای عنوان سنسور از ترانسدیوسر یا مبدل نیز یاد می شود.

<sup>۲</sup> Open Aperture Type (PT)

<sup>۳</sup> Closed Aperture Type (EP)

در این نوع سنسورها دمپرهای داخلی (تنظیم کننده جریان هوا) برای کاهش لرزش، در مواقعی که فرستنده و گیرنده در یک مدت زمان کوتاه در وضعیت نوسانی یا در حالت دریافت و سوئیچینگ است، وجود دارد.

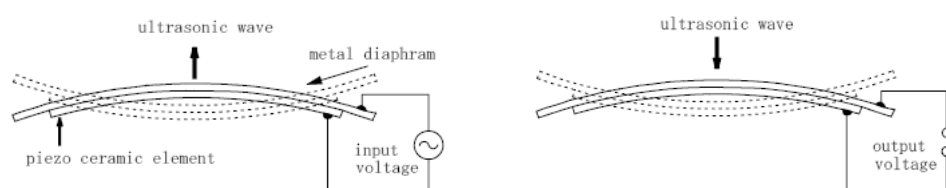
### ۳-۲- مقایسه ویژگی های دو نوع ترانسدیوسر $PT$ و $EP$

در مقایسه با ترانسدیوسر نوع  $Closed$  گیرنده نوع  $Open$  خروجی الکتریکی بیشتری را در یک سطح فشار صدای معین از خود نشان می دهد و آشکار می کند. (حساسیت بسیار بالا) همچنین کمترین کاهش خروجی، در انحراف فرکانس کاری از فرکانس تشدید نرمال را از خود نشان می دهد. (پهنای باند وسیعتر) فرستنده های نوع  $Open$  برای سطح راه اندازی های خاص و متفاوت با خروجی های متعدد تولید می شود. (کارایی بالا) ترانسدیوسرهای نوع  $Close$  برای کاربردهای خارجی و مکان هایی که گرد و خاک بسیار دارند طراحی می شوند.

فرستنده ها با امپدانس پایین در فرکانس تشدید طراحی می شوند تا بازده مکانیکی بالایی داشته باشند. گیرنده ها بیشترین امپدانس را در فرکانس ضد تشدید ( $Anti-Resonat$ ) برای دستیابی به بازدهی بالای الکتریکی ساخته می شوند.

### ۳-۳- اصول کلی عملکرد

هنگامی که یک منبع ولتاژ متناوب با فرکانس مناسب جهت راه اندازی به سنسور اعمال می شود. عنصر پیزو الکتریک قطبیده شده، و به صورت مکانیکی متناسب با ولتاژ اعمالی از حالت اولیه خارج شده و یک میدان صوتی تولید می کند. (شکل ۹) از طرفی دیگر المانی که در معرض میدان صوتی قرار می گیرد یک ولتاژ متناسب با شدت آن تولید می کند. این اثر را می توان با چسباندن المان پیزو الکتریک به دیافراگم فلزی که یک ساختمان هم شکل داشته باشد، افزایش داد.



شکل ۹) نحوه عملکرد سنسور گیرنده و فرستنده

وقتی که سیگنال ولتاژ به ویبراتور هم شکل اعمال می‌شود، خمیدگی در سطح دیافراگم ایجاد می‌شود. در صورتیکه فرکانس سیگنال اعمالی متناسب با فرکانس تشدید مکانیکی باشد، ارسال موج آلتراسونیک در حین نوسان بسیار کارآمد خواهد بود. این عملکرد در فرستنده‌های آلتراسونیک استفاده می‌شود.

در لحظه‌ای که موج آلتراسونیک ویبراتور را در فرکانس تشدید مکانیکی می‌لرزاند خمیدگی دیافراگم به طور موثر ولتاژ الکتریکی در الکترودهای ویبراتور تولید می‌کنند. که این عملکرد در گیرنده آلتراسونیک استفاده می‌شود.

### ۳-۴- انتشار صوت

جهت استفاده از ترانسدیوسرها بسیار مهم است که نوع آن با توجه به کاربرد خاصی که در نظر داریم انتخاب شود. از طرف دیگر باید با اصول انتشار صوت در محیط‌های مختلف آشنا بود. از این رو صوت یک پدیده موجی است، انتشار موج به طول موج نیز وابسته است. پترن قدرت تشعشع نمونه برای هر یک از مواد یا گیرنده موج در شکل ۱۰ دیده می‌شود. جهت مقایسه و تطابق ارسال و دریافت، شکل هر دو توان تشعشع شده در طول یک مسیر خاص (در وضعیت تولید موج) و حساسیت در طول یک مسیر خاص (در وضعیت دریافت موج) تجسم شده است.

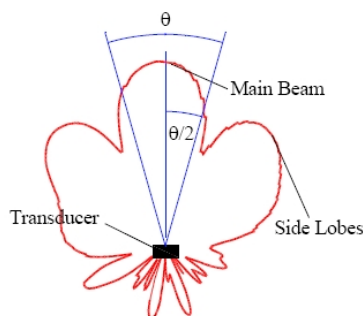
نیم زاویه بیم اصلی (شعاع) از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\sin(q/2) = l/D = C/DF$$

$D$  قطر موثر دیافراگم خمیده،  $C$  سرعت صوت در  $20^\circ \text{C}$  ( $344 \text{ m/s}$ )،  $F$  فرکانس کار و  $\lambda$  طول موج است.

$$q/2 = \sin^{-1}(0.51 \frac{l}{D}), \text{ For } -3\text{dB}$$

$$q/2 = \sin^{-1}(0.7 \frac{l}{D}), \text{ For } -6\text{dB}$$

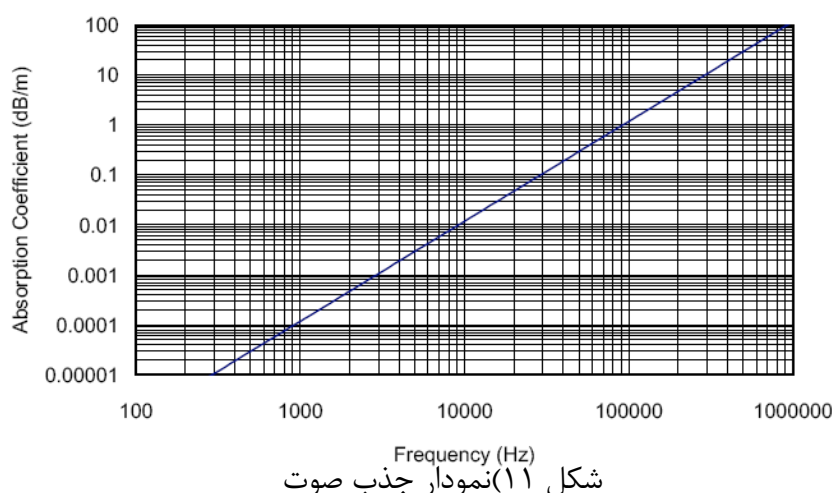


شکل ۱۰) پترن تشعشع ترانسدیوسر آلتراسونیک

رابطه فوق در صورتی صحیح می‌باشد که  $\lambda < D$  باشد. برای  $l \geq D$  پترن قدرت به کروی شدن میل می‌کند. همچنین برای دستیابی به بیم‌های باریک و پایداری بالا باید  $D$  را خیلی بزرگتر از  $\lambda$  در نظر گرفته شود.

به طور مثال برای یک وضعیت خاص، ترانسدیوسر مدل 400ET250 که قطر موثر  $D=23\text{mm}$  دارد، بیم اصلی را  $(-6\text{dB})$  با عرض کامل  $\theta$  با فرکانس  $40\text{kHz}$ ،  $30^\circ$  تولید می‌کند. در ترانسدیوسرهای نوع Open بیم با زاویه و قطر مخروط وابسته به خمیدگی داخل بدنه (استوانه) تعیین می‌شود. و این به سادگی قابل محاسبه با قطر بدنه و استوانه نیست.

کاهش شدت موج صدا با فاصله گرفتن از منبع صدا، را می‌توان برای هر پدیده موجی انتظار داشت. این کاهش ناشی از ترکیب دو عامل عمده است. اولین عامل قانون مربع معکوس یا دایورژانس کروی در شدت افت  $6\text{dB}$  بر فاصله دو برابر است، این میزان در تمام اثرات موجی صرفنظر از فرکانس مشترک است. عامل دوم که سبب کاهش شدت می‌شود جذب صوت بوسیله هواست. (شکل ۱۱)



عامل‌های جذبی با میزان رطوبت و گرد و خاک هوا متغیر است و بسیار با اهمیت است. و همچنین این عامل‌ها با فرکانس موج نیز متغیر است. جذب در  $20\text{kHz}$  حدوداً  $0.02\text{dB}/30\text{cm}$  است. کاملاً روشن است که فرکانس پایین‌تر برای انتشار محدوده بزرگ بسیار مناسب می‌باشد. البته بخشی از فرکانس پایین‌تر در پایداری کمتر نتیجه خواهد داشت.

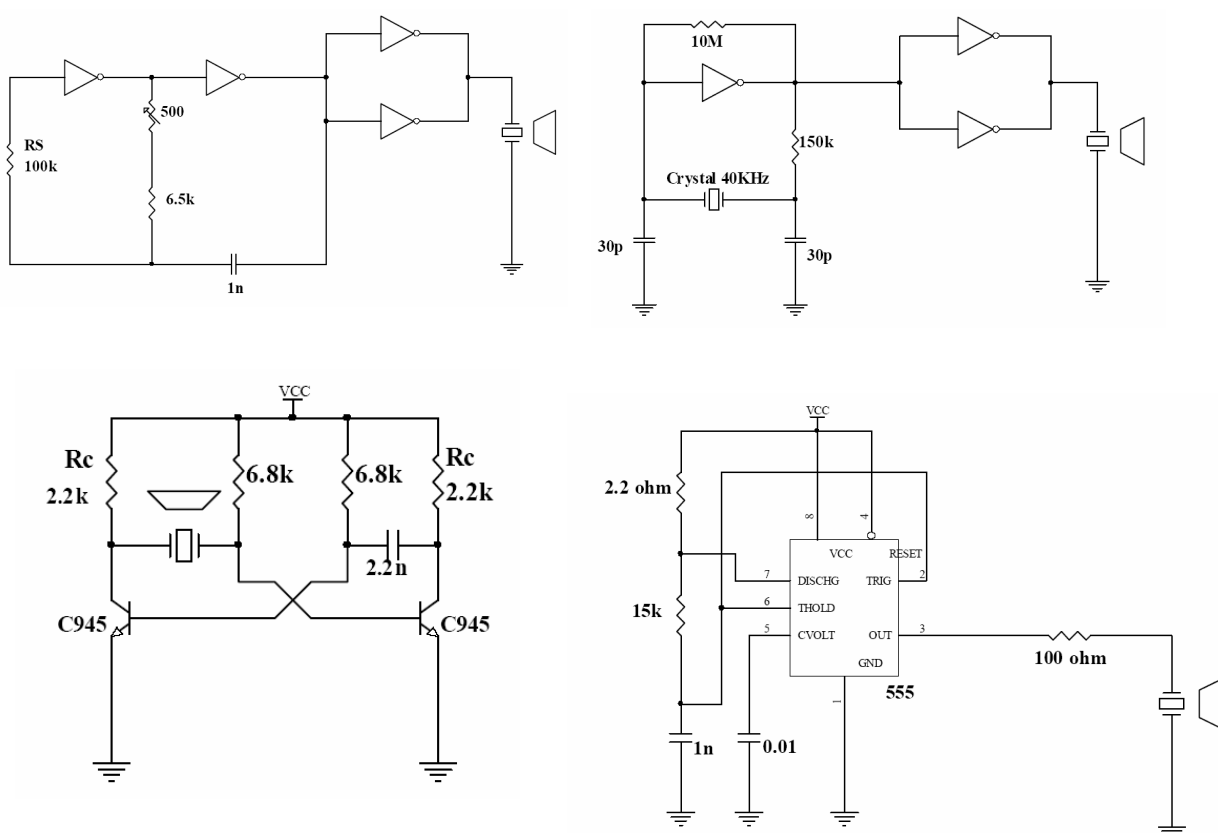
### ۳-۵- شرایط راه‌اندازی فرستنده

فرستنده‌های آلتراسونیک می‌توانند به طور پیوسته  $200\text{mw Rms}$  تلفات داشته باشد. فرض می‌کنیم امپدانس سری می‌نیم  $500\Omega$  باشد، ولتاژ محرک باید منبعی  $20\text{mA}, 10\text{V Rms}$

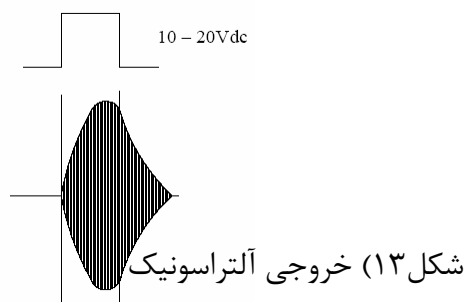
باشد. ولتاژ محرک موج سینوسی باید از کمترین هارمونیک که ممکن است ترانسدیوسر را در حالت *Over tone* تحریک کند، استفاده شود. (فرکانس در یکی از مضارب فرکانس تشدید). برای اغلب مدل‌ها ماکزیمم دامنه موج محرک باید به  $50\text{vpp}$  محدود شود. تلفات فرستنده باید به یک سطح میانگین یا موثر از  $200\text{mw}$  بوسیله کاهش *Duty Cycle* وقتی که فرستنده بیش از  $200\text{mw}$  تلفات دارد، محدود شود. مدارهای نوسان‌ساز متعدهی برای راه‌اندازی فرستنده‌های آلتراسونیک مناسب هستند. که در بسیاری از موارد در سیستم‌های امنیتی، ریموت کنترل و کاربردهای دیگر استفاده می‌شوند. و باید این نکته را در نظر گرفت که این مدارها را می‌توان با توجه به امپدانس، زاویه و فاز، فرکانس تشدید و سایر مشخصه‌های دیگر تغییر داد و بهینه کرد.

### ۳-۶- استفاده از راه اندازه‌های متفاوت فرستنده

اغلب سنسورهای آلتراسونیک با یک موج مربعی راه‌اندازی می‌شوند. استفاده از یک پالس *DC*،  $10\text{-}20\text{V}$  ولتی باعث می‌شود که ترانسدیوسر در فرکانس تشدید انتخابی نوسان کند. خروجی آلتراسونیک به صورت یک شکل موج نوسانی محدودشده با ولتاژ در حد ولتاژ اعمالی خواهد بود. (شکل ۱۳)



شکل ۱۲) مدارهای نوسان ساز برای فرستنده‌های آلتراسونیک

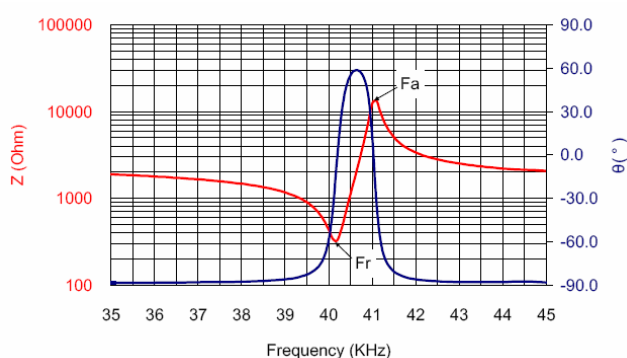


### ۳-۷- مشخصه‌های امپدانس فرستنده

مشخصه‌های امپدانس فرستنده آلتراسونیک با فرکانس کار و درجه حرارت با یک رفتار پیچیده که برای هر مدل از سنسور متفاوت است، متغیر است. به طور کلی برای فرکانس‌های تقریباً نزدیک به 0.1 اکتاو در آن طرف فرکانس تشدید، فرستنده همانند یک خازن دیده می‌شود. جریان عبوری از فرستنده نسبت به ولتاژ ایجاد شده بروی فرستنده به میزان ۹۰ درجه پیش فاز است.

با نزدیک شدن به فرکانس تشدید افت ولتاژ روی فرستنده به مقدار می‌نیم در فرکانس تشدید، کاهش پیدا خواهد کرد (امپدانس سری می‌نیم). و جریان به طور نسبی افزایش پیدا خواهد کرد. فاز پیش‌فاز جریان وابسته به ولتاژ به مقدار صفر در نزدیک فرکانس تشدید کاهش یافته و فرستنده به صورت یک مقاومت صرف عمل خواهد کرد.

با افزایش فرکانس و عبور از نقطه تشدید جریان ممکن است از ولتاژ پس فاز شود و با یک افزایش به میزان ماکزیمم ۹۰ درجه، ولتاژ روی پایه‌های فرستنده تا رسیدن به پیک تعریف شده بروی نقطه ضد تشدید<sup>۱</sup> بالا رود. در طی این حالت گذرا فرستنده یک خاصیت سلفی خواهد داشت. (شکل ۱۴)



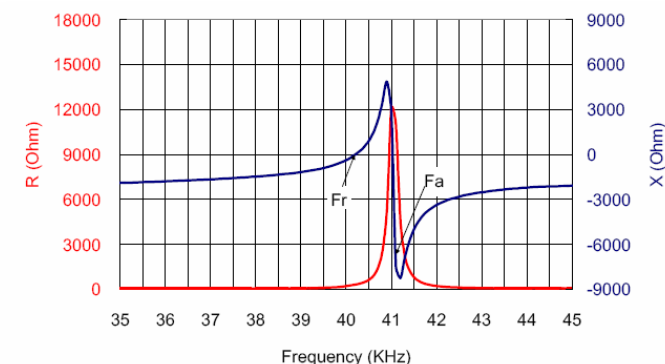
Impedance at resonant Frequency (Fr):

$$Z \angle \theta = 329 \angle -0.5^\circ$$

Impedance at

anti-resonant frequency (Fa):

$$Z \angle \theta = 13300 \angle -34^\circ$$



Impedance at resonant frequency (Fr):

$$R + jX = 329 - j3$$

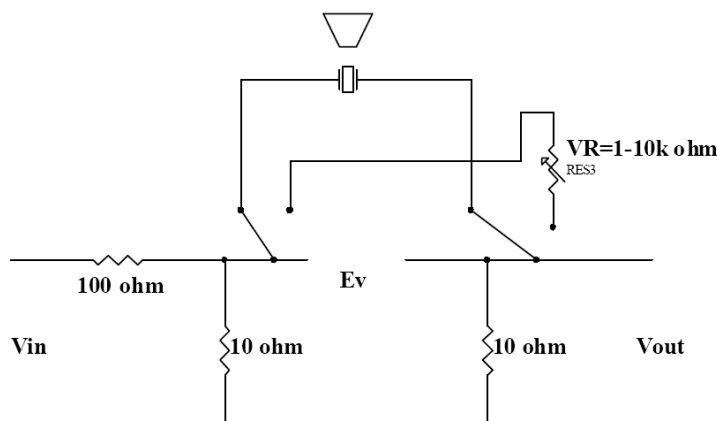
Impedance at anti-resonant frequency (Fa):

$$R + jX = 11026 - j7437$$

شکل ۱۴) نمودارهای امپدانس سنسور آلتراسونیک

<sup>1</sup> Anti Resonant

با افزایش درجه حرارت فرکانس تشدید کاهش پیدا خواهد کرد. و همچنین در این مورد تغییرات فاز نیز اتفاق خواهد افتاد. رنج و اندازه تغییر فاز از فرکانس تشدید پایدارتر است. برای اندازه‌گیری فرکانس تشدید، ضد تشدید و امپدانس ترانسدیوسر آلتراسونیک از مدار تست در شکل ۱۵ می‌توان استفاده



شکل ۱۵) مدار تست و اندازه‌گیری پارامترهای فرکانسی

تنظیم فرکانس ورودی برای بدست آوردن ماکزیمم  $V_{out}$ ، و سوئیچ در وضعیت مقاومت متغیر  $V_r$  و تنظیم برای رسیدن به خروجی یکسان، مقدار مقاومت متغیر  $V_r$  معادل امپدانس سری می‌نیمم است.

تنظیم فرکانس ورودی برای رسیدن به  $V_{out}$  می‌نیمم، سوئیچ در وضعیت مقاومت متغیر  $V_r$ ، مقدار مقاومت متغیر  $V_r$  معادل امپدانس سری ماکزیمم در فرکانس ضد تشدید است. با اندازه‌گیری فاز بین ولتاژهای  $V_{out}$  و  $E_u$  مشخصه‌های امپدانس سنسور تعیین می‌شوند.

### ۳-۸- مشخصه‌های گیرنده‌های آلتراسونیک

گیرنده‌های آلتراسونیک یک خروجی الکتریکی متناسب با سطح فشار صوت در گیرنده تولید می‌کنند. اغلب یک سؤال به طور مکرر در اینجا پیش می‌آید که چه خروجی می‌توان از یک گیرنده در فاصله مشخص انتظار داشت. این سؤال را می‌توان با یک محاسبه ساده بر اساس مشخصه‌های درج شده در برگه‌های اطلاعات ترانسدیوسرهای آلتراسونیک پاسخ داد.

روش اساسی برای تعیین کردن اولین  $SPL^1$  می‌نیمم در گیرنده برای یک ولتاژ راه‌اندازی مشخص فرستنده و فاصله‌ای که بین فرستنده و گیرنده است، وجود دارد. این  $SPL$  سپس باید به واحدهای " $pa$ " (Pascal) یا " $\mu bar$ " (micro Bar) تبدیل گردد.

حساسیت گیرنده باید از واحد  $dB$  به مقدار مطلق  $milliVolts/pa(\mu bar)$  برای بدست آوردن خروجی نهایی تبدیل کرد.

<sup>1</sup> Sound Pressure Level

با فرض، فرستنده مدل 400ST160 با سطح راهاندازی 20Vrms و گیرنده مدل 400SR160 در ۵ متری از فرستنده قرار گرفته است. و یک مقاومت 3.9kΩ به عنوان بار قرار گرفته است. مقدار مقاومت بار با توجه به حساسیت گیرنده تعیین می‌شود.

اطلاعات مربوط به 400ST/R160 با توجه به برگه اطلاعاتی به صورت زیر است:

*Transmitting Sound Pressure Level at 40.0Khz, 120dB min.;*

*0dB re 0.0002μbar per 10Vrms at 30cm ,*

*Receiving Sensitivity at 40.0Khz 0dB = 1 volt/μbar -65dB min.*

*SPL Gain for 20Vrms driving voltage = 20 \* log (20V / 10V) = 6 dB*

*SPL Reduction at 5 meters = 20 \* log (30 cm / 500 cm) = -24.4 dB*

*Wave absorption (refer to Figure 2) = 0.1886 dB/m \* 5 = 0.94 dB*

*The SPL at 5 meters becomes = 120 + 6 – 24.4 – 0.94 = 100.6 dB*

*Converting SPL to μbar:*

*100.6 dB = 20 \* log ( X / 0.0002 μbar)*

*X = 21.4 μbar*

*Determining Receiver Sensitivity in Volts/μbar*

*Converting Sensitivity to Volt/μbar:*

*-65 dB = 20 \* log ( X / 1 Volt/μbar)*

*X = 0.56 mV/μbar*

*Voltage generated under 21.4 μbar = 0.56 \* 21.4 = 11.98 mV*

ولتاژ محاسبه شده تحت شرایط فرضی بدست آمده است. خروجی ولتاژ واقعی با شرایط محیطی، جذب یا بازتاب مشخصه‌های مواد هدف داخل یا نزدیک بیم ساع شده متغیر و وابسته خواهد بود. استفاده‌کننده تشخیص می‌دهد که آیا سطح ولتاژ گیرنده برای طبقات پردازش الکترونیک به طور کافی بزرگ است یا خیر.

برای آنالیز و تحلیل این مسئله فهمیدن پایه و اساس آشکارسازی و انتشار موج صوتی لازم و ضروری است، اما قدری از حوصله خارج است. شکل ۱۶ نمودار گرافیکی تحلیل‌های قبلی است که فقط یکبار، امکان دارد در SPL تعریف شده گیرنده استفاده شود.

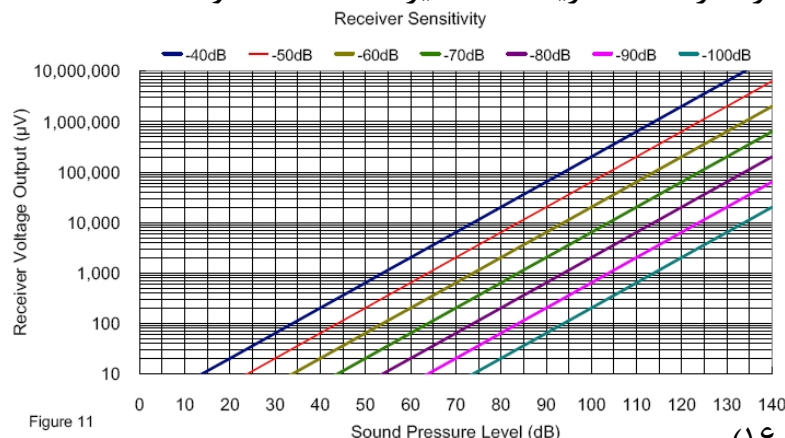


Figure 11

شکل (۱۶)

داخل نمودار از محور  $SPL$  به طرف بالا رفته با قطع با خطوط سطح حساسیت گیرنده بر حسب  $dB$  مقدار پیش فرض  $1V/\mu bar$  خروجی ولتاژ گیرنده که بروی محور  $y$  است را بدست آورد.

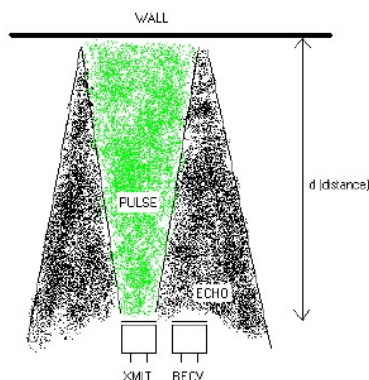
### ۳-۹- مسافت یابی با انعکاس آلتراسونیک

سیستم‌های مسافت یابی آلتراسونیک برای تعیین فاصله یا مانع، از اندازه‌گیری زمان لازم برای پیمودن موج آلتراسونیک تا شیء و برگشت آن به منبع استفاده می‌کنند. این تکنیک را مسافت یابی انعکاس موج<sup>۱</sup> می‌گویند. فاصله نسبت به شیء مربوط به زمانی است که طول می‌کشد پالس آلتراسونیک منتشر شده به شیء برخورد کند و به سمت منبع انتشار برگردد، تقسیم بر کل مسافت با سرعت صدا  $344m/s$  ( $V=x/t$ )

$$2d = V \times (T_{Pulse} - T_{Echo})$$

$V_{sound}$  = speed of sound-travel (343meters/second)

- $T_{pulse}$  = time in seconds of pulse transmission
- $T_{echo}$  = time in seconds of echo detection
- $d$  = distance to object onto which pulse bounces back.

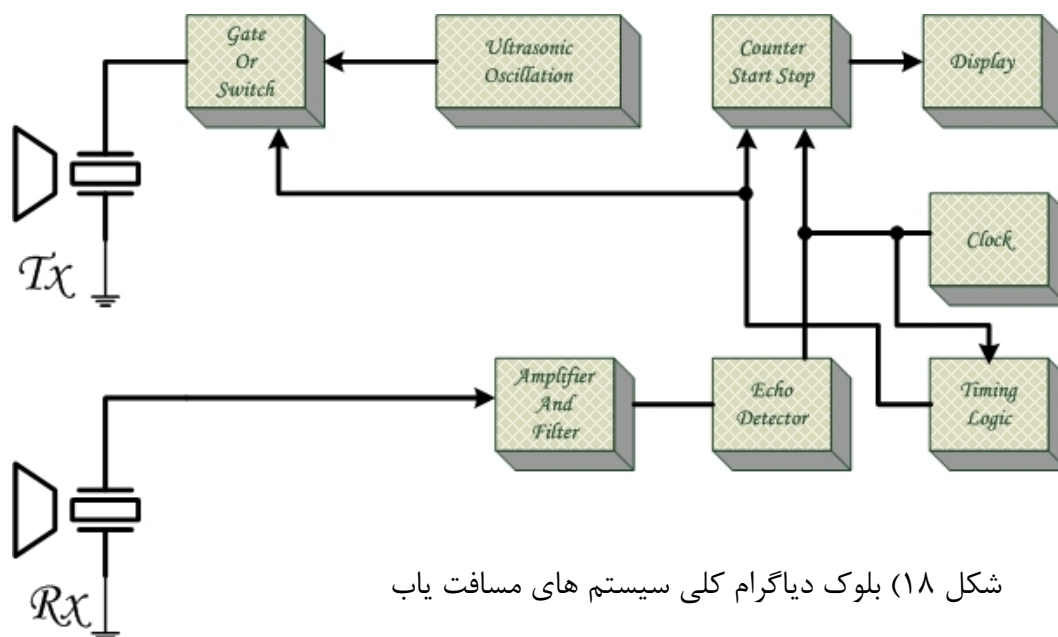


شکل ۱۷) ارسال و دریافت امواج توسط فرستنده و گیرنده

در شکل ۱۸ بلوک دیاگرام خلاصه طرح پایه و عملکرد بخش‌های اصلی در یک سیستم مسافت یابی نمونه شرح داده شده است.

خروجی اسیلاتور به فرستنده آلتراسونیک برای یک مدت کوتاه اعمال می‌شود. در نتیجه یک سیکل کوتاه ارسال انرژی آلتراسونیک خواهیم داشت. شمارنده با آغاز شروع به کار اسیلاتور و اعمال به  $Switch$  شمارش را آغاز می‌کند، زمانی کار شمارنده متوقف می‌شود که یک سیگنال برگشتی آشکار شود. بدین گونه شمارش متناسب با زمان انتشار موج آلتراسونیک است.

<sup>1</sup> Echo Ranging



شکل ۱۸) بلوک دیاگرام کلی سیستم های مسافت یاب

فرکانس کلاک ساعت برای راه اندازی شمارنده جهت تولید یک رقم که نشان دهنده فاصله از شیء در واحدهای مهندسی مطلوب، انتخاب می شود.

سیگنال برگشتی آلتراسونیک معمولاً ضعیف است و از طرفی یک وسیله برای طراحی یک سیستم مسافت یاب خوب استفاده از یک طبقه تقویت کننده تنظیم شده با  $Q$  بالاست. که عمدتاً هر سیگنال با فرکانس موج برگشتی را تقویت کرده، سایر فرکانس های بالا و پایین را از خود عبور ندهد.

تکنیک سودمند دیگر ایجاد بهره برای افزایش تقویت کنندگی موج برگشتی، با زمان است. بدین طریق جبران بهره تقویت کننده برای کاهش توان سیگنال متناسب با فاصله و زمان صورت می گیرد. این تقویت کننده را  $TGC^1$  گویند.

مدارات فیلتر بخش موهومی ترانسدیوسر را تنظیم می کند و پل تطبیق امپدانس برای داشتن ماکزیمم انرژی به کار گرفته می شود.

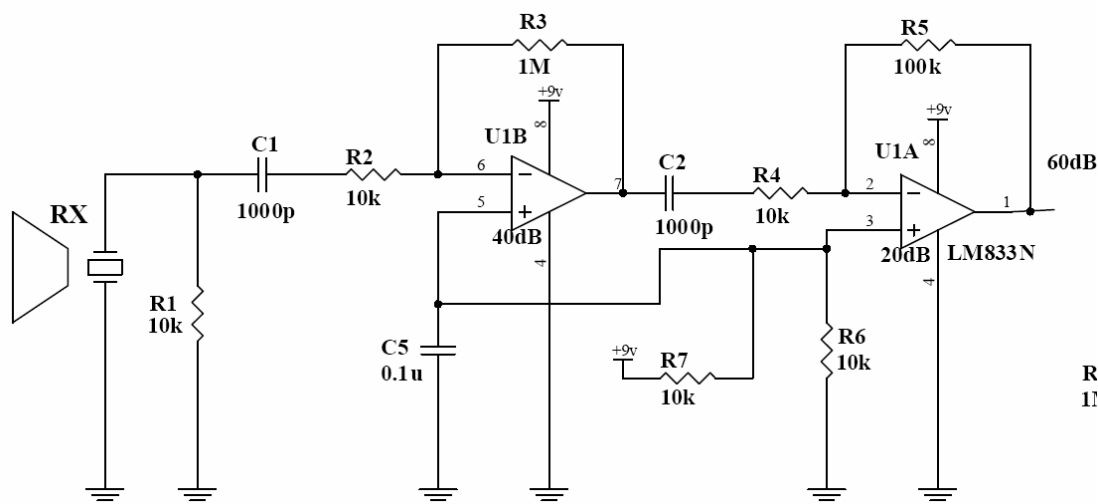
<sup>1</sup> Time Control Gain

#### ۴-۱- شرح مدار فاصله یاب آلتراسونیک

در این فصل قسمت‌های مختلف مدار فاصله یاب آلتراسونیک را توضیح می‌دهیم. در این مدار فاصله یاب از ترانسدیوسرهای فرستنده و گیرنده نوع باز در دو پیک مجزا استفاده شده است. که اطلاعات فنی آن در بخش *Data sheet* موجود می‌باشد. عملیات تولید و شمارش پالس‌ها، پردازش سیگنال گیرنده، محاسبات و نمایش بروی 7-Seg توسط میکروکنترلر PIC16F873 از خانواده PIC شرکت میکروچیپ انجام می‌شود.

#### ۴-۱-۱- مدار گیرنده سیگنال آلتراسونیک

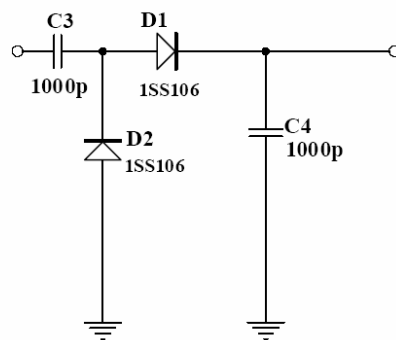
مدار گیرنده همانند سایر مدارات آشکارساز آلتراسونیک است و از میکروکنترلر بهره نمی‌برد. سیگنال آلتراسونیک دریافت شده توسط سنسور گیرنده دارای سطح ولتاژ پایین است، از این رو برای اینکه سطح ولتاژ سیگنال به حد مطلوب برای سایر طبقات مدار برسد، از مدار پیش تقویت کننده‌ای با گین (60dB) 1000 استفاده می‌کنیم. این تقویت کننده از دو طبقه تقویت کننده *OpAmp* تشکیل شده است. طبقه اول با گین (40dB) 100 و طبقه دوم با گین (20dB) 10 تقویت می‌کند. هر دوی این تقویت کننده‌ها از نوع *Inverting* هستند. عموماً در تقویت کننده‌های آپامپی از دو منبع تغذیه مثبت و منفی برای راه اندازی آپامپ استفاده می‌شود، اما در اینجا از یک منبع تغذیه +9V استفاده شده است. ورودی *NonInverting* با یک تقسیم مقاومتی ولتاژ +4.5V دارد و سیگنال خروجی ترانسدیوسر به ورودی *Inverting* اعمال شده است. (شکل ۱۹)



شکل ۱۹) مدار گیرنده و تقویت کننده سیگنال آلتراسونیک

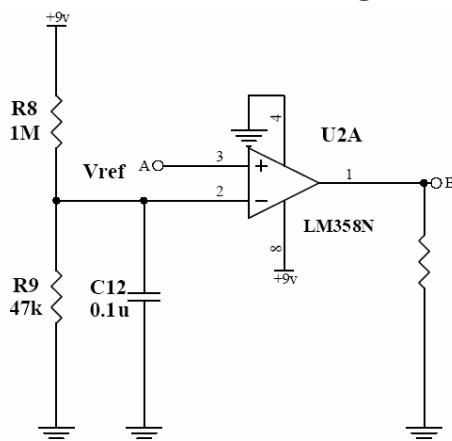
## ۴-۱-۲- مدار آشکار ساز

آشکار سازی با آشکار کردن سیگنال آلتراسونیک دریافتی و تقویت شده صورت می گیرد. برای این کار از یکسو کننده نیم موج که از دیودهای شاتکی 1SS106 تشکیل شده است استفاده می شود. دیودهای شاتکی دارای سرعت سوئیچینگ بالا و مشخصه فرکانسی مطلوبی دارند. اطلاعات مربوط به این دیودها در پیوست وجود دارد. با توجه به دامنه سیگنال آشکار شده یک ولتاژ  $DC$  در دو سر خازن خروجی مدار ظاهر خواهد شد. (شکل ۲۰)



شکل ۲۰) مدار یکسوساز

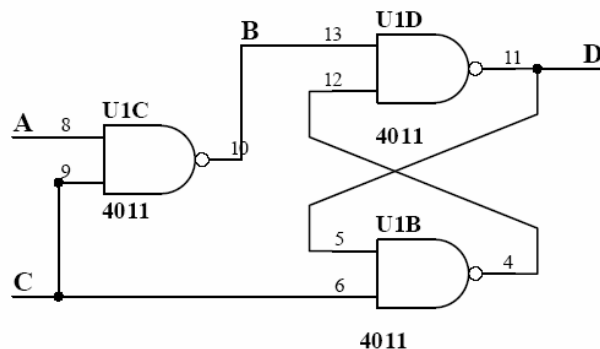
سیگنال آشکار شده و یکسو شده توسط یکسوساز دیودی فوق به ورودی *Noninverting* آپامپ  $LM358$  در آرایش مقایسه کننده اعمال می شود. ولتاژ رفرنس اعمالی به پایه *Inverting* آپامپ برابر  $0.4V$  است (شکل ۲۱). هنگامی که سیگنال آلتراسونیک یکسوشده از  $0.4V$  بیشتر شود، چون دارای فیدبک منفی نیست خروجی به حالت اشباع رفته و ولتاژی در حدود ولتاژ منبع تغذیه  $+9V$  خواهد داشت. در لحظه ای که سیگنال اعمالی کمتر از  $0.4V$  است خروجی آپامپ صفر خواهد بود. سطح ولتاژ خروجی آپامپ با استفاده از یک تقسیم کننده مقاومتی کاهش پیدا کرده تا با ولتاژهای استاندارد  $TTL (0-5V)$  جهت استفاده در مدار نگهدارنده سیگنال در طبقه بعدی مطابق باشد.



شکل ۲۱) مدار مقایسه کننده در قسمت آشکار ساز سیگنال

## ۴-۱-۳- مدار نگهدارنده سیگنال

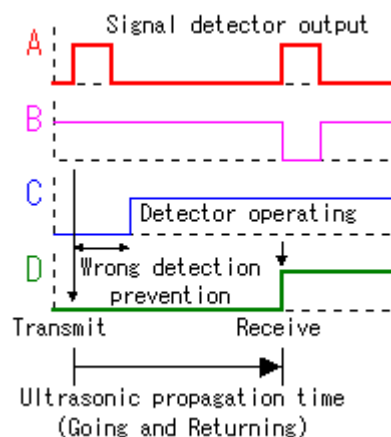
شکل ۲۲ مدار نگهدارنده یا لچ سیگنال را نشان می‌دهد. این مدار یک فلیپ‌فلاپ  $RS$  است که با استفاده از گیت‌های  $Nand$  پیاده سازی شده است. آشکار ساز به گونه‌ای طراحی شده است که در زمان ثابت (حدود  $1.5ms$ ) پس از ارسال پالس انتقال<sup>۱</sup> عمل نمی‌کند. تا از آشکار سازی اشتباه ناشی از تاثیر پالس انتقال جلوگیری شود. این عمل به وسیله‌ی میکروکنترلر برنامه‌ریزی شده است.



شکل ۲۲) مدار لچ سیگنال آشکار شده

مدت زمانی که پس از ارسال موج آلتراسونیک، طول می‌کشد که موج پس از برخورد به هدف باز گردد با یکی از قابلیت‌های میکروکنترلر به نام واقع نگار  $Capture$  (شمارش وقایع در پین مورد نظر) که در میکرو  $16F873$  ماکزیمم ۱۶ بیتی با دقت  $12.5ns$  است می‌توان اندازه‌گیری کرد. در صورتیکه از این قابلیت برای این امر استفاده شود می‌توان از مدار فوق استفاده نکنیم. اما جهت تایید و اطمینان از آشکار سازی سیگنال در زمان آشکار سازی سیگنال برگشتی (حدود  $65ms$ ) استفاده می‌شود. در لحظه ارسال پالس آلتراسونیک بعدی خروجی فلیپ‌فلاپ چک شده و در صورتیکه صفر باشد اعلام خطا انجام می‌شود که سیگنال برگشتی قادر به آشکار سازی نبوده است.

شکل ۲۳ سیگنال‌ها را در قسمت‌های مختلف مدار نگهدارنده نشان می‌دهد.

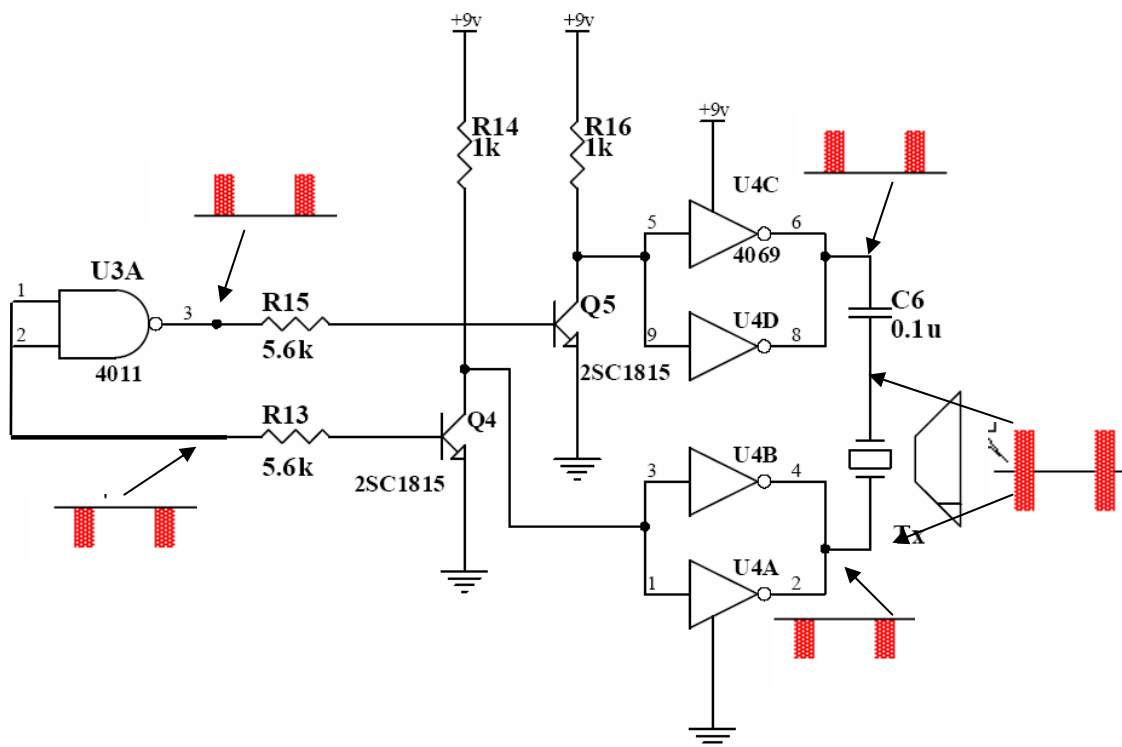


شکل ۲۳)

<sup>1</sup> Transmission Pulse

#### ۴-۱-۴- مدار فرستنده سیگنال آلتراسونیک

پالس  $40KHz$  ایجاد شده توسط میکروکنترلر بروی پایه  $RC4$  جهت ایجاد تغییر فاز به یک  $Not (4011)$  داده شده است. در اینجا دو سیگنال معکوس یکدیگر با سطح ولتاژ  $+5V$  تولید می‌شود. برای افزایش سطح ولتاژ دو سیگنال به مدار سوئیچینگ ترانزیستوری اعمال شده تا سطح ولتاژ تا  $9V$  افزایش یابد. جهت تقویت جریان و تصحیح زمان صعود و نزول پالس‌ها از معکوس‌کننده‌های سرعت بالای  $Cmos$  استفاده شده است. سیگنال  $40KHz$  تقویت شده از طریق یک خازن (حذف جریان  $Dc$ ) و به سر مثبت ترانسدیوسر و سیگنال دیگر با  $180$  درجه اختلاف فاز به سر منفی اعمال می‌شود. حدود دو برابر ولتاژ خروجی معکوس‌کننده به ترانسدیوسر فرستنده اعمال می‌شود. (شکل ۲۴)



شکل ۲۴) مدار فرستنده سیگنال آلتراسونیک

#### ۴-۱-۵- مدار نمایشگر

جهت نمایش فاصله از سه  $7Seg$  آند مشترک برای سه رقم استفاده شده است. پایه‌های  $a, b, c, d, e, f, g$  نمایشگرهای هفت قسمتی به ۷ بیت از پورت  $B$  از طریق مقاومت‌های سری متصل شده است. در صورتیکه یک صفر دیجیتال بروی هر یک از این بیت‌ها قرار گیرد آن سگمنت روشن شده. در واقع برای نمایش یک عدد بروی یک  $7-Seg$  یک مقدار باینری ۷ بیتی بر روی پورت قرار می‌گیرد. جهت نمایش یک عدد سه رقمی باید از طریق میکرو در هر لحظه تنها یک  $7-Seg$  روشن شود. این کار از طریق پایه‌های  $RA1, RA2, RA3$  و سوئیچ ولتاژ آند

[illegible]

شکل ۲۵) مدار نمایشگر

به این مدار باید یک تغذیه  $12V$  اعمال شود. با استفاده از دو آی سی رگولاتور و مدارهای مربوطه ولتاژهای  $5V$  و  $9V$  را ایجاد می کنند. آی سی های رگولاتور جریان  $100mA$  را تامین می کنند. برای تغذیه مدارات فرستنده و گیرنده از  $9V$  و برای تغذیه آی سی میکروکنترلر و نمایشگر از تغذیه  $5V$  استفاده می شود.

#### ۴-۱-۷- میکروکنترلر PIC16F873

پیدایش و گسترش روز افزون علوم الکترونیک و کامپیوتر، تحول عظیم و سریعی را در تمامی شاخه‌های علوم و فنون به دنبال داشته است و موجب توسعه همه جانبه تحقیقات و فناوری گردیده است. در مدار فاصله‌یاب آلتراسونیک بخش عمده پردازش و محاسبات توسط میکروکنترلر PIC16F873 انجام می‌شود. این IC ساخت شرکت *Microchip Technology* می‌باشد. این شرکت کلمه *PIC*<sup>۱</sup> را به عنوان علامت تجاری خود برگزیده و برای مشخص کردن میکروکنترلرهای خود استفاده کرده است.

این میکروکنترلرها دارای مشخصات و مزایای زیر می‌باشند.

- برنامه‌ریزی آسان
  - قابلیت برنامه‌ریزی داخل مدار
  - نیاز به پروگرامر ساده جهت برنامه ریزی
  - عدم حساسیت به نویز
  - زبان برنامه نویسی آسان و دستورالعمل‌ها کم
  - مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، تایمرهای داخلی، منابع وقفه(در بعضی به ۱۵ منبع می‌رسد)، شمارش فرکانس بروی پین‌ها
  - *WDT*
  - *PWM*
  - *DTMF*
  - درگاه‌های سریال و موازی
  - قابلیت هزار بار نوشتن و خواندن از حافظه *Flash*
  - قابلیت ۱۰ میلیون بار نوشتن و خواندن از حافظه *Eprom*
- و قابلیت‌های بسیار دیگر که بسته به نوع آنها متفاوت می‌باشد.
- PIC* ها از نظر تعداد پایه در دسته‌های *8,18,28,40pin* و بسته‌بندی *PDIP* و *QFN* تقسیم می‌شوند.

میکروکنترلرهای خانواده *PIC* از معماری هاردوارد استفاده می‌کنند. این بدین معناست که کل حافظه به دو قسمت عمده تقسیم می‌شود. حافظه داده و حافظه برنامه. مزیت این معماری این است که می‌توان به هر دو بخش حافظه در یک دستورالعمل دسترسی داشت. این امر موجب می‌شود که این نوع معماری سریعتر از معماری استاندارد فون نیومن باشد. این معماری از یک حافظه برای داده‌ها و برنامه استفاده می‌کند.

<sup>۱</sup> Programmable InterFace Controller

اغلب *PIC* ها دارای سه بلاک حافظه داخلی هستند.

۱. *Data Memory* که این حافظه به *Bank 0* ، *Bank 1* و .... تقسیم می‌شوند. هر بانک شامل حافظه *RAM* معمولی (*General Purpose Register*) و رجیسترهای مخصوص (*Status* ، *INTCON* ، *OPTION* و ...) می‌باشد. بعضی از این رجیسترهای مخصوص که در یک بانک قرار دارد ممکن است در بانک‌های دیگر نیز تکرار شوند که این به خاطر دسترسی سریعتر و کاهش کد برنامه می‌باشد. رجیسترهای حافظه *RAM* می‌توانند به طور مستقیم یا به طور غیر مستقیم از طریق *FSR* قابل دسترسی باشند.

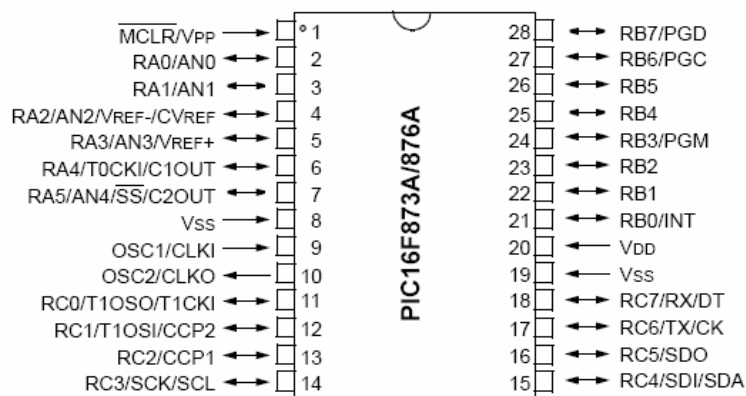
۲. *Eeprom Memory* که برای ذخیره داده‌ها در حین اجرای برنامه بکار می‌رود. این حافظه قابل خواندن و نوشتن می‌باشد. و بر حسب نیاز کاربر از آن استفاده می‌شود.

۳. *Program Memory* برنامه‌ای که توسط کاربر نوشته می‌شود در این حافظه *Load* می‌شود. به عنوان مثال در *PIC16F877* (40 pin) دارای پروگرام کانتر ۱۳ بیتی برای آدرس‌دهی کردن *Flash Program Memory* به حجم ( $8k \times 14bit$ ) می‌باشد. همچنین *PIC16f84* (18pin) دارای پروگرام کانتر ۱۳ بیتی برای آدرس‌دهی کردن حافظه *1Kword* می‌باشد.

سایر مشخصات آی‌سی *PIC16F873* در برگه اطلاعات ارائه شده توسط *Microchip* در پیوست درج شده است.

پایه‌های *PIC16F873* در شکل ۲۶ نشان داده شده است.

28-Pin PDIP, SOIC, SSOP



28-Pin QFN

شکل ۲۶) دیاگرام پایه‌های *PIC16F873*

در این مدار پایه‌های ۱۹ و ۸ میکرو به زمین، پایه‌های ۱ و ۲۰ نیز به  $VCC$  متصل شده است. پایه ۲ ( $RA0$ ) ورودی  $ADC$  است به یک پتانسیومتر جهت اصلاح دما متصل شده است. پایه‌های ۲۱ تا ۲۷ به ترتیب ( $RB0$  تا  $RB6$ ) به  $a$  تا  $g$ ، 7-Seg ها از طریق مقاومت‌ها متصل شده است. همچنین پایه‌های ۳، ۴ و ۵ ( $RA1$ ،  $RA2$  و  $RA3$ ) از طریق مقاومت‌ها  $5.6k$  به بیس ترانزیستورهای سوئیچینگ آند 7-Seg متصل شده است. پین ۱۵ ( $RC4$ ) به ورودی گیت  $Nand$  متصل شده است، که در این پایه فرکانس  $40KHz$  تولید می‌شود.

از طریق پایه‌های ۱۳ ( $CCP1$ ) و ۷ ( $RA5$ ) عملیات آشکارسازی کنترل می‌شود. به پایه‌های ۹ و ۲ ( $OSC1$  و  $OSC2$ ) کریستال  $4MHz$  و خازن‌های  $27nf$  جهت تولید فرکانس نوسان ساز داخلی میکروکنترلر متصل شده است. این فرکانس با توجه به زمان شمارش زمان سنج انتخاب گردیده است. هنگامی که از کریستال  $4MHz$  استفاده می‌شود. زمان شمارش صعودی شمارنده برابر ۱ میکرو ثانیه بر هر شمارش خواهد بود. از شمارنده  $Timer1$  برای واقع نگار ( $Capture$ ) استفاده شده است. و دارای حداکثر مقدار شمارش ۱۶ بیت ( $65535$ ) می باشد. بنابراین حداکثر شمارش  $65.535$  میلی ثانیه را می‌توان ایجاد کرد. سرعت انتشار صوت در هوا در دمای  $20$  درجه سانتی گراد برابر  $343m/s$  است. زمان رفت و برگشت صدا برای فاصله ۱۰ متری برابر خواهد شد با:

$$\frac{20m}{343m/s} = 0.0583s = 58.3ms$$

### ؟ اصلاح خطای اختلاف سرعت در دماهای متفاوت

در بالا گفتیم از یکی از ورودی‌های مبدل آنالوگ به دیجیتال پایه  $RA0$  استفاده کردیم. اما علت استفاده از مبدل آنالوگ به دیجیتال اختلاف سرعت امواج صوتی در دمای‌های مختلف است، که برای تصحیح این خطای محیطی به کار گرفته شده است (شکل).

سرعت انتشار امواج صوتی در فضا با دما تغییر می‌کند، بدین صورت که در دمای صفر درجه برابر  $331.5m/s$  و در دمای  $40^{\circ}C$  برابر  $355.5m/s$  می‌باشد. این فاصله سنج، فاصله را با تقسیم زمان انتشار که به وسیله ویژگی واقع نگار  $Capture$  اندازه گیری می‌شود محاسبه می‌کند. برای مثال اندازه گیری فاصله  $1m$  در محیط  $0^{\circ}C$  توضیح داده می‌شود. مدت زمانی که برای رفت و برگشت موج صدا طول می‌کشد برابر است با:

$$\frac{2m}{331.5m/s} = 0.006033s = 6.033millisecond$$

محتوای شمارنده به وسیله واقع نگار برابر 6033 در یک میکرو ثانیه خواهد بود. برای تبدیل این مقدار به فاصله بر حسب  $cm$  باید آن را بر ۶۰ تقسیم نمود، داریم:

$$\frac{6033}{60} = 100.55$$

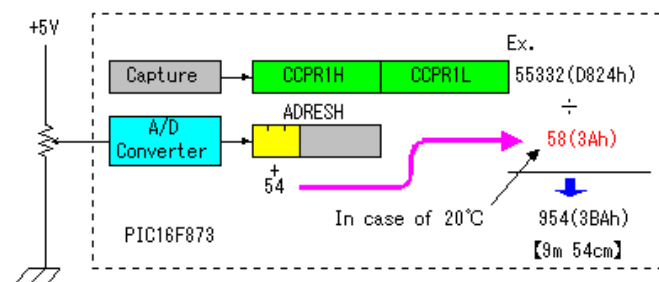
ارقام بعد از ممیز حذف شده و تنها سه رقم نمایش داده می‌شود. و این امر باعث خطای اندازه‌گیری می‌گردد. نسبت تبدیل ۶۰ به دمای محیط بستگی دارد. و به فاصله‌ای که باید اندازه‌گیری شود، ارتباطی ندارد. در حالت 9m داریم:

$$\frac{54298}{60} = 904.9$$

با بزرگتر شدن فاصله خطای تبدیل بیشتر می‌شود. این به دلیل این است که تبدیل کوچکتر از نقطه ممیز امکان پذیر نیست. در دمای 40°C داریم:

$$\frac{2m}{355.5m/s} = 5625ms$$

مقدار تبدیل برابر با ۵۶ می‌شود. مقدار تبدیل باید با دمای محیط تغییر کند. در این مدار، مقدار تبدیل به وسیله ویژگی تبدیل A/D تولید می‌شود. مبدل A/D، ولتاژ ورودی را به داده دیجیتال ۱۰ بیتی تبدیل می‌کند. در اینجا تنها سه بیت بالایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین بازای تغییر ورودی آنالوگ از ۰ تا ۵ ولت، خروجی دیجیتال ۰ تا ۷ نتیجه خواهد شد. به این مقدار عدد ۵۴ افزوده می‌شود. بنابراین محدوده تغییرات مقدار تبدیل از ۵۴ تا ۶۱ خواهد بود.



شکل (۲۷)

## منابع

- [۱] پیتر هاپتمن، دکتر نوید تقی زادگان، دکتر لادن اجلالی - مهندس مهران صالحی، اصول کاربرد سنسورها، انتشارات آشینا، زمستان ۱۳۸۲
- [۲] مهندس حسن مروج، مرجع کامل میکروکنترلرهای PIC، نشر الیاس، چاپ دوم ۱۳۸۴
- [۳] جوین لوین، اصول و راهنمای کار با میکروکنترلرهای PIC، کانون نشر علوم، شهریور ۸۴
- [۴] اینترنت

- [5] [http:// www.prowave.com.tw](http://www.prowave.com.tw)
- [6] [http:// www.mpi-ultrasonic.com](http://www.mpi-ultrasonic.com)
- [7] <http://www.hitechnicstuff.com/URpage.htm>
- [8] <http://www.cs.brown.edu>
- [9] <http://www.alldatasheet.com>