

الذبح  
الحرم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه فیزیک - حالت جامد

مطالعه حسگرهای گاز دی اکسید کربن و بررسی نقش فناوری نانو در بهبود

عملکرد آنها

نگارنده

صادق حیدری

استاد راهنما

دکتر حمید هراتی‌زاده

بهمن ۹۷

تقدیم به

مقدس ترین واژه‌ها در لغت‌نامه دلم...

تقدیم به خدایی که آفرید جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را و به

کسانی که عشقشان را در وجودم دمید.

مادر مهربانم، دریای بی‌کرانی که زندگی‌ام را مدیون مهر و عطوفت آن می‌دانم.

همسر عزیزتر از جانم که از بدو ورود به زندگی من، عشق به علم و عشق به زندگی را در

من پروراند و همچنین تکیه‌گاهی بزرگ و مشوق من در ادامه تحصیل می‌باشد.

روح پدرم که دعاگو برای موفقیت‌های من بوده است و با تمام وجود الطاف دعاهایش را

حس کردم و روح خواهر عزیزم که انگیزه‌ی تمام زندگی من بوده است و خاکش توتیای

چشم من.

برادر و خواهران، همراهان همیشگی و پشتوانه‌های زندگی‌ام

و همه کسانی که دوستشان دارم.....

## تقدیر و تشکر

اکنون که به یاری خداوند موفق به دفاع از پایان‌نامه‌ی خویش شدم بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌منت، بی‌وقفه و خالصانه‌ی پدر علمی من، استاد گران‌قدر جناب آقای دکتر حمید هراتی‌زاده که راهنمایی این‌جانب را بر عهده داشته‌اند، کمال تشکر را بنمایم. از آقای محمدیان، خانم باقری و دیگر دوستان در تیم تحقیقاتی نانو فناوری دکتر حمید هراتی‌زاده و کارکنان شرکت نانو شات شاهرود که فضایی صمیمانه‌ای با سطح علمی خوب به بنده کمک کرده‌اند، آقای شهیدی و آقای عسگری که نهایت همکاری در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود با بنده داشتند، بسیار تشکر می‌کنم. همچنین از همسر و خانواده عزیزم و تمامی اساتید و دوستانی که با الطاف صمیمانه‌ی خود طی این مسیر را بر من هموار کردند تشکر می‌نمایم. از زحمات داوران محترم آقای دکتر مرتضی ایزدی‌فرد و آقای دکتر مجید محمدی که زحمت داوری این پایان‌نامه را بر عهده گرفته و کمک به هرچه بهتر شدن این کار کردند؛ تشکر می‌کنم.

## تعهد نامه

این جانب صادق حیدری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مطالعه حسگرهای گاز دی اکسید کربن و بررسی نقش فناوری نانو در بهبود عملکرد آنها** تحت راهنمایی آقای دکتر حمید هراتی زاده متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت‌های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن ( مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

حسگری گاز دی اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ ) علاوه بر حوزه‌ی سلامت و محیط زندگی در بسیاری از صنایع و کارخانجات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ولی در حسگری این گاز و گازهای دیگر مانند متان چالش‌هایی وجود دارد. حسگری گاز متان و دی اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ ) با استفاده از حسگرهای مقاومتی به دلیل سیگنال ضعیف آن که در حدود چند میلی‌ولت (۰/۰۰۵ ولت) است و تداخل با نویزهای الکترونیکی سیستم بسیار دشوار است. این در صورتی است که ولتاژ قطعه حسگری برای حسگری گازهای دیگر معمولاً حدود ۵ ولت می‌باشد. با وجود اینکه، با استفاده از مدار تقویت کننده این ولتاژ را می‌توان به ۱۰۰ میلی‌ولت رساند باز این سیگنال (سیگنال ناشی از  $\text{CO}_2$ ) با نویزهای مربوط به مدار سنسور به راحتی قابل تشخیص نمی‌باشد. به همین دلیل حسگرهای مقاومتی برای تشخیص گاز دی اکسید کربن، به نظر می‌رسد که حسگرهای مناسبی نیستند. از طرفی دیگر برای تشخیص  $\text{CO}_2$  می‌توان از طیف جذبی حسگرهای نوری استفاده کرد که دارای خطوط جذبی قوی می‌باشند. اما در رابطه با مطالعه و ساخت این حسگر دو چالش اساسی وجود دارد. چالش اول: از آنجا که خطوط طیف جذبی مناسب برای مولکول دی‌اکسید کربن در ناحیه‌ی مادون قرمز است. از این رو تهیه‌ی گسیل‌کننده و آشکارساز آن دشوار می‌باشد. چالش دوم: هزینه‌ی آنها تا حدودی بالا است. برای اینکه حسگرهای  $\text{CO}_2$  با قیمت ارزان تولید انبوه شوند و برای استفاده در صنایع مختلف توسعه یابند. در این پروژه تصمیم گرفته شد که با استفاده از مواد نانو ساختار، محدودیت‌های حسگری گاز  $\text{CO}_2$  در حسگرهای مقاومتی کاهش یابد و به عبارتی دیگر حساسیت به نحوی افزایش یابد که سیگنال حسگری از نویز سیستم قابل تشخیص باشد.

علاوه بر آن، حسگر گاز مادون قرمز غیرپراکنده (NDIR) برای تشخیص گاز دی‌اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ ) در دو حوزه‌ی عمومی نیز مورد مطالعه‌ی قرار گرفت: الف) طراحی مدار الکترونیکی ساطع‌کننده‌ی نور و آشکارساز فوتودیود مادون قرمز و سایر قطعات مربوطه. ب) مطالعه‌ی تئوری تعامل بین گاز دی‌اکسید کربن و نور مادون قرمز.

در بخش دیگر پروژه، حسگر مقاومتی گاز  $\text{CO}_2$  برپایه‌ی نانو ساختارهای نیم رساناهای اکسید فلزی  $\text{ZnO}$  و  $\text{SnO}_2$  مورد مطالعه و ساخت قرار گرفت. حسگری گازی دی‌اکسید کربن با دو نوع ساختار اکسید روی ( $\text{ZnO}$ ) و اکسید قلع ( $\text{SnO}_2$ ) با غلظت ۱/۵ درصدی این گاز در دمای ۳۰۰ درجه‌ی سانتیگراد نیز انجام شد. برای تهیه‌ی مواد فعال قطعه‌ی حسگری، نانو ذرات  $\text{ZnO}$  و  $\text{SnO}_2$  با روش اسپاترینگ سنتز شدند. مورفولوژی سطح نانو ذرات با روش میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مطالعه شد. در نهایت، سه پارامتر حساسیت، زمان پاسخ‌دهی و زمان بازیافت حسگر گازی مادون قرمز با هر دو نوع حسگر گازی مقاومتی اکسید فلزی ( $\text{ZnO}$  و  $\text{SnO}_2$ ) مقایسه شده است.

**کلمات کلیدی:** حسگر گازی مادون قرمز غیر پراکنده (NDIR)، حسگر گازی مقاومتی، اسپاترینگ  
امواج رادیویی، گسیل کننده، فوتودیود، دی اکسید کربن، فیلم نازک

## فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: دی اکسید کربن و نقش آن در سلامت انسان ..... ۱
- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- ساختار و پیوند ..... ۳
- ۳-۱- خواص فیزیکی و شیمیایی مولکول  $CO_2$  ..... ۴
- ۴-۱- گاز دی اکسید کربن چگونه به وجود می آید؟ ..... ۶
- ۵-۱- تاثیرات گاز دی اکسید کربن بر سلامت انسان ..... ۷
- ۶-۱- آیا دی اکسید کربن یک آلودگی در هوای داخل ساختمان به حساب می آید؟ ..... ۹
- ۷-۱- دی اکسید کربن به عنوان یک شاخص از آلودگی اگزوز ..... ۱۱
- ۸-۱- دی اکسید کربن به عنوان یک شاخص خوب آتش ..... ۱۱
- ۲- فصل دوم: انواع حسگرهای گازی تجاری شده دی اکسید کربن ..... ۱۳
- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۳
- ۲-۲- حسگرهای گازی الکتروشیمیایی ..... ۱۴
- ۳-۲- حسگر گازی خازنی یا مقاومت سنجی ..... ۱۶
- ۱-۳-۲- حسگرهای نیمه هادی گازی ..... ۱۷
- ۴-۲- حسگرهای گازی کاتالیستی ..... ۱۹
- ۵-۲- حسگرهای گازی پتانسیل سنجی ..... ۲۱
- ۶-۲- حسگر گازی نوری ..... ۲۳



- ۲۴ ..... ۱-۶-۲ حسگرهای گازی فیبر نوری رنگ‌سنجی و بازتاب‌سنجی
- ۲۵ ..... ۲-۶-۲ حسگرهای گازی مادون قرمز
- ۲۹ ..... ۷-۲ حسگرهای موج آکوستیک
- ۳۳ ..... ۱-۷-۲ حسگرهای گازی موج آکوستیک سطحی (SAW)
- ۳۶ ..... ۸-۲ حسگرهای میکروبالانس کریستالی کوارتزی (QCM)
- ۳۷ ..... ۹-۲ حسگرهای گازی میکروکانتینری
- ۳۹ ..... ۳- فصل سوم: کاربرد حسگری گازی دی اکسید کربن در صنایع
- ۴۰ ..... ۱-۳ مقدمه
- ۴۱ ..... ۲-۳ کاربرد حسگرهای نظارتی گاز در معادن زغال سنگ زیر زمینی و مناطق خطرناک ...
- ۴۴ ..... ۳-۳ نظارت و کنترل بر محیط‌های جوشکاری در صنعت
- ۴۸ ..... ۴-۳ تشخیص آتش با استفاده از حسگرهای دود و گاز
- ۵۲ ..... ۵-۳ کاربرد حسگر گازی دی اکسید کربن در علوم پزشکی
- ۵۲ ..... ۱-۵-۳ فیزیولوژی پایه‌ای دی اکسید کربن
- ۵۳ ..... ۲-۵-۳ کاپنومتری و کاپنوگرافی
- ۵۴ ..... ۶-۳ کاربردهای حسگر گازی دی اکسید کربن در صنایع غذایی و دامپروری
- ۱-۶-۳ استفاده از حسگر گازی دی اکسید کربن در سوله‌های پرورش مرغ (مرغداری-ها)
- ۵۵ ..... (ها)
- ۵۷ ..... ۲-۶-۳ حسگرهای دی اکسید کربن برای کاربردهای بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی ..
- ۳-۶-۳ کاربرد حسگر گازی دی اکسید کربن در شبکه‌های سنسور بی‌سیم برای نظارت در

گلخانه‌ها	۶۰
۷-۳- کاربردهای نظارتی برای ساختمان‌ها	۶۴
۴- فصل چهارم: ساخت حسگر اپتیکی مادون قرمز گاز CO <sub>2</sub> و بررسی نتایج حسگری آن	۶۷
۱-۴- مقدمه	۶۸
۲-۴- طراحی و ساخت مدار الکترونیکی حسگر گازی مادون قرمز غیر پراکنده (NDIR) ...	۷۷
۳-۴- نتایج تجربی برای اندازه‌گیری گاز دی اکسید کربن با حسگر گازی (NDIR) ...	۸۳
۵- فصل پنجم: ساخت حسگر مقاومتی نانوساختار گاز CO <sub>2</sub> و بررسی نتایج حسگری آنها	۸۹
۱-۵- مقدمه	۹۰
۲-۵- اکسید روی (ZnO) و اکسید قلع (SnO <sub>2</sub> )	۹۲
۳-۵- سنتز مواد به روش اسپاترینگ امواج رادیویی [۶۵]	۹۴
۴-۵- سنتز اکسید قلع (SnO <sub>2</sub> ) به روش اسپاترینگ R.F و ساخت قطعه‌ی حسگری آن ..	۱۰۰
۵-۵- نمودار حسگری گاز دی اکسید کربن با استفاده از نیمه‌هادی اکسید قلع	۱۰۴
۶-۵- سنتز اکسید روی (ZnO) به روش اسپاترینگ R.F و ساخت قطعه حسگری آن ....	۱۰۸
۷-۵- نمودار حسگری گاز کربن دی اکسید با استفاده از فیلم‌های نازک اکسید روی	۱۱۵
۸-۵- مقایسه‌ی پارامترهای حسگری بین حسگرهای مقاومتی و حسگر مادون قرمز	۱۲۰
۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات:	۱۲۱
۷- پیوست	۱۲۲



## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: ترکیب کووالانسی مولکول دی اکسید کربن ..... ۳
- شکل ۱-۲: چگونگی تاثیر غلظت‌های CO<sub>2</sub> بر بدن انسان ..... ۸
- شکل ۱-۲: حسگر گازی الکتروشیمیایی ..... ۱۵
- شکل ۲-۲: حسگر گازی مقاومت‌سنجی ..... ۱۷
- شکل ۳-۲: حسگر گازی نیمه‌هادی اکسید فلزی ..... ۱۹
- شکل ۴-۲: حسگر گازی پتانسیل‌سنجی ..... ۲۲
- شکل ۵-۲: نمونه ای از حسگر گازی فیبر نوری ..... ۲۵
- شکل ۶-۲: ساختار نوری پرتو دو زمانه در حسگر گازی مادون قرمز ..... ۲۷
- شکل ۷-۲: ساختار پرتو دو فضایی در حسگر گازی مادون قرمز ..... ۲۷
- شکل ۸-۲: مراحل ساخت حسگرهای آکوستیکی ..... ۳۱
- شکل ۹-۲: یک حسگر آکوستیکی با دو IDT ..... ۳۲
- شکل ۱۰-۲: حسگر آکوستیکی SAW و موج ریلی ..... ۳۴
- شکل ۱۱-۲: منحصر شدن انرژی موج به یک طول موج ..... ۳۵
- شکل ۱-۳: سیستم تشخیص آتش ..... ۵۱
- شکل ۲-۳: سیستم نوری برای تشخیص آتش ..... ۵۱
- شکل ۳-۳: حسگر دی اکسید کربن فیگارو ..... ۶۳
- شکل ۱-۴: موقعیت های ترازهای انتقالی، ارتعاشی و چرخشی ..... ۶۹
- شکل ۲-۴: سطوح انرژی ارتعاشی مولکول دی اکسید کربن ..... ۷۰
- شکل ۳-۴: درصد جذب برخی از باندهای مولکول دی اکسید کربن در دمای اتاق و در وضوح پایین ..... ۷۱
- شکل ۴-۴: دیاگرام مدار الکترونیکی حسگر مادون قرمز غیر پراکنده (NDIR) ..... ۷۸

- شکل ۴-۵: شماتیکی از مدار الکترونیکی بسته شده برای حسگر گازی دی اکسید کربن ..... ۸۰
- شکل ۴-۶: محل ورود گاز دی اکسید کربن و تعامل گاز با موج مادون قرمز ..... ۸۱
- شکل ۴-۷: سیستم تشخیص گاز دی اکسید کربن ..... ۸۲
- شکل ۴-۸: تغییرات غلظت گاز بر حسب زمان برای غلظت ورودی ۶۴ ppm ..... ۸۴
- شکل ۴-۹: تغییرات غلظت گاز بر حسب زمان برای غلظت ورودی ۱۳۰ ppm ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۰: تغییرات غلظت گاز بر حسب زمان برای غلظت ورودی ۱۹۳ ppm ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۱: تغییرات غلظت بر حسب زمان برای غلظت ورودی ۲۵۸ ppm ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۲: تغییرات غلظت بر حسب زمان برای غلظت ورودی ۳۲۲ ppm ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۳: تغییرات غلظت بر حسب زمان برای غلظت ورودی ۳۸۷ ppm ..... ۸۷
- شکل ۵-۱: (a) یک سلول واحد ZnO با ساختار ورت سایز (b) صفحه بلوری متنوع از ساختار ورت سایز  
ZnO ..... ۹۳
- شکل ۵-۲: ساختار تتروگونال روتیل SnO<sub>2</sub> ..... ۹۳
- شکل ۵-۳: شماتیک سیستم لایه‌نشانی کندوپاش ..... ۹۶
- شکل ۵-۴: : نمایی از کندوپاش مغناطیسی که در آن میدان مغناطیسی به موازات سطح کاتد است و باعث می‌شود الکترون‌ها به جای طی مسیر به صورت مستقیم به صورت مارپیچی حرکت کنند و الکترون‌ها پر انرژی‌تر می‌شوند و مسیر بیشتری را طی می‌کنند و اتم‌های بیشتری را یونیزه می‌کنند ..... ۹۸
- شکل ۵-۵: آنالیز SEM در زوم ۷۵۰ میکرون برای الکتروود شاخه‌ای ۱۵۰ نانومتری ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۶: الکتروودگذاری نوع A و B ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۷: تصاویر آنالیز SEM در زوم‌های ۵،۳،۱ و ۰/۵ میکرونی برای سطح اکسید قلع ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۸: حسگر گازی مقاومتی با روش افزایش دما و UV ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۹: نمودار تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای فیلم نازک اکسید قلع در دمای ۳۰۰ درجه

- سانتیگراد ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۰: تصویر آنالیز SEM برای الکتروود شاخه‌ای از جنس طلا با ضخامت ۹۰ نانومتر ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۱: تصویر آنالیز SEM در زوم ۰/۵ میکرون برای قطعه‌ی Z1 ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۲: تصویر آنالیز SEM در زوم ۰/۵ میکرون برای قطعه‌ی Z2 ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۳: تصویر آنالیز SEM در زوم ۰/۵ میکرون برای قطعه‌ی Z3 ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۴: تصویر آنالیز SEM در زوم ۰/۵ میکرون برای قطعه‌ی Z4 ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۵: تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای فیلم نازک Z1 در دما ۳۰۰ درجه سانتیگراد ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱۶: تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای فیلم نازک Z2 در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۷: تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای فیلم نازک Z3 در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۸: تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای فیلم نازک Z4,1 در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۱۹: تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای فیلم نازک Z4,2 در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد ..... ۱۱۷

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱: خواص فیزیکی و شیمیایی دی اکسید کربن ..... ۴ و ۵
- جدول ۱-۲: برخی از حسگرهای گاز دی اکسید کربن تجاری شده..... ۸۷
- جدول ۱-۳: فهرست گازها و محدودیت‌های خطرناک آن در معادن زیر زمینی ..... ۴۴
- جدول ۲-۳: اثرات نامطلوب بر روی سلامتی و محدودیت‌های مواجهه با گازها و بخارات ..... ۴۷
- جدول ۱-۴: همه ی باندهای جذبی در مولکول دی اکسید کربن..... ۷۴ و ۷۵
- جدول ۱-۵: پارامترهای مربوط به اسپاترینگ RF برای سنتز اکسید قلع ..... ۱۰۲
- جدول ۲-۵: پارامترهای مربوط به اسپاترینگ RF برای سنتز اکسید روی..... ۱۰۹
- جدول ۳-۵: پارامترهای حسگری گاز دی اکسید کربن در شرایطهای مختلف سنتز ZnO ..... ۱۱۸





## فصل اول:

# دی اکسید کربن و نقش آن در سلامت انسان

## ۱-۱- مقدمه

کربن یک عنصر شیمیایی در جدول تناوبی با نماد C و عدد اتمی ۶ می‌باشد. کربن عنصری غیر فلزی و فراوان، چهار ظرفیتی و دارای چندین دگر شکل است. و دارای آرایش الکترونی زیر می‌باشد [۱].



اکسیژن نیز یک عنصر شیمیایی در جدول تناوبی با عدد اتمی ۸ است (نماد O). اکسیژن یک عنصر زیستی بوده و در همه جای این کره‌ی خاکی یافت می‌شود. این گاز از نظر ترمودینامیکی ناپایدار است و دارای آرایش الکترونی زیر می‌باشد [۲].



دی اکسید کربن یکی از گازهایی است که در اتمسفر (جو) زمین به طور مکرر به وجود می‌آید. که این گاز حدود ۳/۸ درصد حجمی از هوای بیرونی (محیط) را تشکیل می‌دهد.

دی اکسید کربن یا گاز کربنیک با فرمول شیمیایی CO<sub>2</sub>، از ترکیب کربن با اکسیژن به دست می‌آید. گاز کربنیک بر اثر احتراق زغال و مواد عالی در مجاورت اکسیژن، تخمیر مایعات، متابولیسم طبیعی موجودات زنده و غیره، به وجود می‌آید [۳]. ( به طور بسیار ساده‌تر می‌توان گفت زمانی که کربن می‌سوزد، یا به عبارت دیگر سوختن کامل صورت می‌گیرد، گاز دی اکسید کربن تولید می‌شود.)

در سال ۱۶۴۰ شیمیدان فلاندر یان بابتیست ون هلمونت<sup>۱</sup> [۴]، مشاهده کرد هنگامی که زغال چوب را در یک ردیف بسته سوزاند، توده خاکستر حاصل از آن بسیار کمتر از زغال چوب اصلی بود. تفسیر او این بود که بقیه زغال چوب به یک ماده نامرئی تبدیل شده است که به معنای «گاز» یا روح وحشی<sup>۲</sup> می‌باشد. خصوصیات گاز دی اکسید کربن در دهه ۵۰ از قرن هفدهم به وسیله ی فیزیکدانی

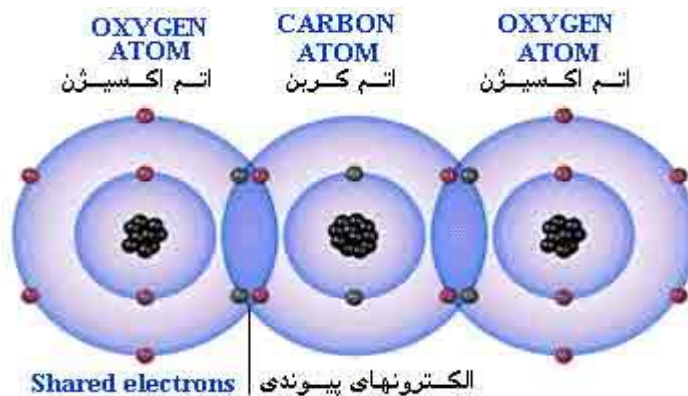
<sup>1</sup> Flemish Jan Baptist van Helmont

<sup>2</sup> spiritus sylvestris

بنام "بلاک"<sup>۱</sup> بررسی شد. او کشف کرد که وقتی کلسیم کربنات سوزانده شود یا با اسید واکنش بدهد، گازی تولید می کند که از هوا سنگین تر است، بلاک این گاز را هوای ثابت نامید. دی اکسید کربن اولین بار در سال ۱۸۲۳ توسط هومفری دیوی<sup>۲</sup> و مایکل فارادی<sup>۳</sup> (تحت فشار بالا)<sup>[۵]</sup>، مایع شد. اولین توصیف دی اکسید کربن جامد توسط آدرین جین پریر تیلور<sup>۴</sup>، که در سال ۱۸۳۵ یک کانتینر تحت فشار از دی اکسید کربن مایع را باز کرد، تنها به این نتیجه رسید که در دمای پایین تر از ۷۸- درجه سانتیگراد متراکم شده و جسم سفید رنگ جامدی به نام یخ خشک را تولید می کند [۶ و ۷].

## ۲-۱- ساختار و پیوند

دی اکسید کربن یک ترکیب کووالانسی مولکولی است که در آن اتم کربن با دو پیوند دوگانه به دو اتم اکسیژن متصل شده است. اتم کربن جفت الکترون ناپیوندی نداشته و در اطراف آن دو قلمرو الکترونی است (هر پیوند دوگانه یک قلمرو الکترونی است)، بنابراین شکل هندسی آن خطی (میله ای) می باشد. تعداد پیوندهای کووالانسی در آن ۴ می باشد [۸].



شکل ۱-۱: ترکیب کووالانسی مولکول دی اکسید کربن [۸].

<sup>۱</sup> Joseph Black

<sup>۲</sup> Humphry Davy

<sup>۳</sup> Michael Faraday

<sup>۴</sup> Adrien-Jean-Pierre Thilorier

مولکول دی اکسید کربن خطی و مرکزی است. طول پیوند اکسیژن-کربن،  $113/36 \text{ pm}$  می باشد، که به طور قابل توجهی کوتاه تر از طول اتصال پیوند تک باند C-O است. از آنجایی که دارای تقارن مرکزی است، مولکول دارای دو قطبی الکتریکی نمی باشد. در نتیجه دو موج ارتعاشی یعنی حالت کششی نامتقارن که در  $2349 \text{ cm}^{-1}$  و یک جفت ناپایدار از حالت خمشی در  $667 \text{ cm}^{-1}$  در طیف مادون قرمز مشاهده می شود. همچنین یک حالت کشش متقارن در  $1388 \text{ cm}^{-1}$  وجود دارد که تنها در طیف رامان دیده می شود [۹].

### ۱-۳- خواص فیزیکی و شیمیایی مولکول $\text{CO}_2$

خواص فیزیکی و شیمیایی دی اکسید کربن در جدول ۱-۱ ذکر شده است. دی اکسید کربن در حالت گاز طبیعی بی رنگ و بی بو می باشد و به راحتی قابل تشخیص نیست. دی اکسید کربن گازی  $1/5$  برابر چگال تر از هوا است و بنابراین در غلظت های بیشتر در سطوح پایین هوا یافت می شوند [۸].

جدول ۱-۱: خواص فیزیکی و شیمیایی کربن دی اکسید [۱۰].

$\text{CO}_2$	فرمول مولکولی
$44/0095 \text{ g/mol}$	وزن مولکولی
$-109/3 \text{ } ^\circ\text{F}$ ( $-78/5 \text{ } ^\circ\text{C}$ )	نقطه ی جوش (1 atm)
$-69/9 \text{ } ^\circ\text{F}$ ( $-56/6 \text{ } ^\circ\text{C}$ )	نقطه انجماد
$87/9 \text{ } ^\circ\text{F}$ ( $31/0 \text{ } ^\circ\text{C}$ )	دمای بحرانی

فشار بحرانی	۱/۰۷۰ Psi (۷۲/۹ atm)
چگالی مایع ۱۱ atm . ۳۷ °C (-۳۵ °F)	۶۸/۷۴ (کیلوگرم بر متر مکعب)
چگالی گاز ۱ atm . ۲۰ °C (۶۸ °F)	۰/۱۱۵ (کیلوگرم بر متر مکعب)
چگالی جامد ۱ atm . ۷۹ °C (-۱۱۰ °F)	۹۷/۴ (کیلوگرم بر متر مکعب)
گرانش ویژه، گاز (۱ = هوا) ۱ atm . ۲۰ °C (۶۸ °F)	۱/۵۳
گرانش ویژه، مایع ۱ atm . ۳۷ °C (-۳۵ °F)	۱/۱۰
حجم معین ۱ atm . ۲۰ °C (۶۸ °F)	۸/۷ Cu.ft. / lb
گرمای خنثی تصعید	۱۰/۹۰۰ Btu/lb mo
حلالیت در آب ۱ atm . ۲۰ °C (۶۸ °F)	۸۷/۸ by volume

در صنایع شیمیایی، دی اکسید کربن عمدتاً به عنوان یک ماده در تولید اوره مصرف می‌شود، با یک کسر کوچک‌تر که برای تولید متانول و طیف وسیعی از محصولات دیگر مانند کربنات‌های فلزی و بی‌کربنات‌ها استفاده می‌شود. مشتقات اسید کربوکسیلیک مانند سدیم سالیسیلات با استفاده از دی اکسید کربن توسط واکنش کلبه-شیمیت<sup>۱</sup> تهیه می‌شوند. علاوه بر فرآیندهای متداول با استفاده از دی اکسید کربن برای تولید مواد شیمیایی، روش‌های الکتروشیمیایی نیز در سطح تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند. به‌طور خاص، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید سوخت از دی‌اکسید کربن (مانند متانول) جذاب است، زیرا این امر می‌تواند به سوخت‌هایی تبدیل شود که می‌توانند به راحتی در

<sup>1</sup> Cottage-chemistry

تکنولوژی‌های احتراق معمولی حمل و استفاده شوند، اما بدون دی اکسید کربن این امر میسر نمی‌شود.

## ۱-۴- گاز دی اکسید کربن چگونه به وجود می‌آید؟

دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) توسط تمام موجودات هوایی بر اثر تنفس تولید می‌شود. دی اکسید کربن در طول فرآیند فروپاشی مواد آلی و تخمیر قند در نان و در نوشیدنی‌های گازدار تولید می‌شود. همچنین این گاز توسط احتراق چوب و دیگر مواد آلی و سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی تولید می‌شود. از سوی دیگر، در بسیاری از فرآیندهای اکسیداسیون در مقیاس بزرگ، به عنوان محصول جانبی ناخواسته (به عنوان مثال تولید اسید اکریلیک بیش از ۵ میلیون تن در سال) می‌باشد. همچنین، امروزه به دلیل پشرفت‌های زیاد در صنعت و شکل‌گیری کارخانه‌های بزرگ، این کارخانه‌ها در حال تولید می‌توانند گاز دی اکسید کربن انبوهی را تولید کنند. با تولید انبوهی از ماشین‌ها، غلظت زیادی از دود و دی اکسید کربن از آگروزهای این ماشین‌ها خارج می‌شود [۱۰].

دی اکسید کربن مهمترین گازهای گلخانه‌ای پایدار در جو زمین می‌باشد. با توسعه‌ی فرآیندهای صنعتی، و استفاده از سوخت‌های فسیلی و جنگل‌زدایی، غلظت آن در جو به سرعت در حال افزایش است و منجر به گرم شدن کره زمین می‌شود. دی اکسید کربن، که در نتیجه استفاده از سوخت‌های فسیلی به عنوان گاز کارخانه‌ای به اتمسفر وارد شده موجب افزایش دمای کره‌ی زمین می‌گردد. دی اکسید کربن همچنین باعث اسیدی شدن اقیانوس‌ها می‌شود، زیرا در آب برای تشکیل اسید کربنیک حل می‌شود. در فرآیندهای دیگر صنعتی همچون، صنعت جوشکاری، صنایع غذایی و دیگر صنایع نیز این گاز تولید می‌شود.

هنگامی که انسانی عمل تنفس انجام می‌دهد، یعنی اکسیژن را به داخل ریه‌ها می‌کشد و گاز دی اکسید کربن را خارج می‌کند. هنگامی که دی اکسید کربن خارج می‌شود، به سرعت با هوای اطراف حتی در داخل یک فضای محصور، مخلوط می‌شود. و با توجه به اینکه تهویه‌ی مناسبی در این فضاهای

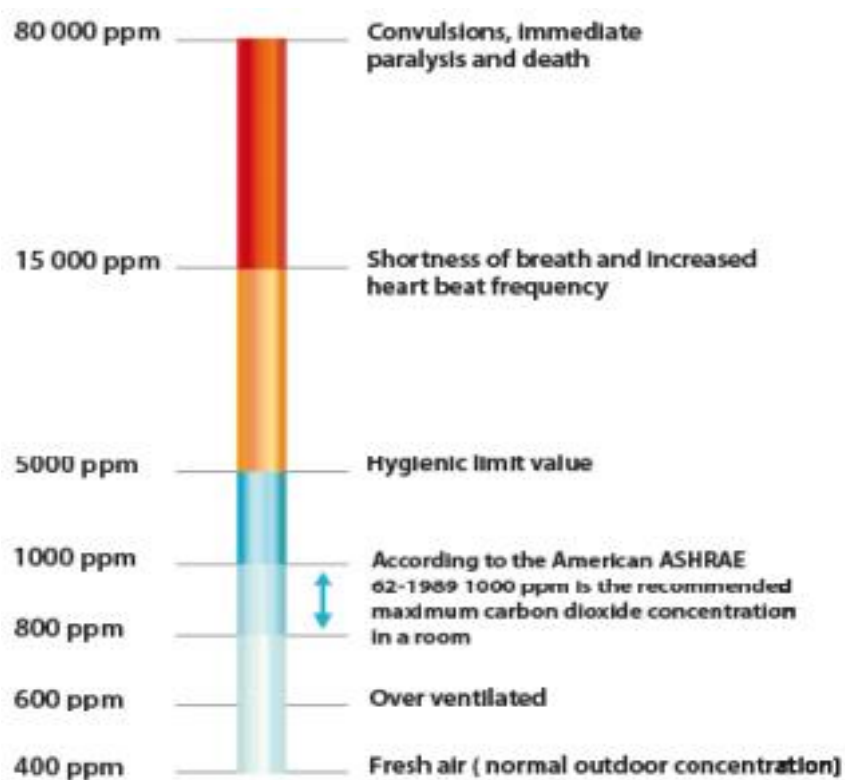
محصور (خانه‌ها، ساختمان‌ها، معادن زیر زمینی و غیره) وجود دارد، غلظت دی اکسید کربن به سطوح بی‌ضرر آن کاهش می‌یابد. سطوح دی اکسید کربن در این فضاهای محصور، معمولاً بین ۴۰۰ ppm تا ۱۲۰۰ ppm متغیر می‌باشد. سطوح دی اکسید کربن در فضاهای باز معمولاً بین ۳۵۰ ppm تا ۴۵۰ ppm است. مناطق صنعتی یا آلوده ممکن است به‌طور دوره‌ای دارای مقدار دی اکسید کربن ۸۰۰ ppm باشد. سطوح دی اکسید کربن در فضای باز در مناطقی که ترافیک ماشین‌ها بسیار سنگین است، می‌تواند بالاتر هم برود. باید توجه داشت که گاز دی اکسید کربن را با منو اکسید کربن که یک گاز سمی می‌باشد و محصول جانبی از احتراق ضعیف در خودروها و شومینه‌ها است، اشتباه نگیریم. منو اکسید کربن در غلظت‌های بسیار پایین ۲۵ ppm تا ۵۰ ppm خطرناک می‌باشد [۱۰].

## ۱-۵- تأثیرات گاز دی اکسید کربن بر سلامت انسان

اثرات فیزیولوژیکی دی اکسید کربن منحصر به فرد است. زیرا محصول متابولیسم پایدار، یک جزء حیاتی از مکانیسم پایه‌ی اسیدی که pH خون را کنترل می‌کند، و همچنین یک ماده‌ی رسانای فعال در ارتباط با تنفس، گردش خون و پاسخ عروقی می‌باشد. مایعات خون و سلول‌ها در واقع محلول‌های بی‌کربنات سدیم و سایر مواد هستند. قرار گرفتن در معرض شدید دی اکسید کربن، اسید کربنیک را در خون تشکیل می‌دهد که بیش از ظرفیت بافر از بی‌کربنات سدیم می‌باشد. کاهش pH دارای اثر سریع سمی است، چرا که سیستم‌های عصبی کنترلی، بیش از حد تحریک می‌شوند. این اثرات مستقل از اکسیژن موجود در جو می‌باشد.

مطابق با شکل ۱-۲، غلظت پایین دی اکسید کربن را می‌توان برای مدت قابل توجهی و بدون اثر قابل ملاحظه‌ای تحمل کرد و یا فقط باعث ایجاد احساس غیر طبیعی در تنفس می‌شود. قرار گرفتن در معرض ۵ درصد دی اکسید کربن باعث ایجاد سریع اختلال و استرس در تنفس می‌شود. هنگامی که میزان دی اکسید کربن بیش از ۷ درصد برسد، تنفس خیلی سخت می‌شود و بی‌قراری، ضعف، سردرد

شدید و خستگی رخ می‌دهد. در ۱۵ درصد، به‌طور ناگهانی همراه با سفتی و لرزش در کمتر از یک دقیقه رخ می‌دهد و در محدوده‌ی ۲۰ درصد تا ۳۰ درصد باعث تشنج در کمتر از ۳۰ ثانیه می‌شود. این اثرات به سرعت اتفاق می‌افتد. زیرا دی‌اکسید کربن در مایعات بافت پخش می‌شود. و میزان آن تقریباً ۲۰ برابر سریع‌تر از اکسیژن است. غلظت‌های بالای از دی‌اکسید کربن بدون هشدار، بدون صرفه‌جویی و بدون در نظر گرفتن غلظت اکسیژن می‌تواند به سرعت باعث خفگی و مرگ انسان شود [ ۱۱].



شکل ۱-۲: چگونگی تاثیر غلظت‌های CO<sub>2</sub> بر بدن انسان [۱۱].

## ۱-۶- آیا دی‌اکسید کربن یک آلودگی در هوای داخل ساختمان به حساب می‌آید؟

دی‌اکسید کربن به عنوان یک آلودگی هوا در داخل محسوب نمی‌شود، اما یک گاز مناسب ردیابی برای نشان دادن میکروارگانیسم‌های ممکن تولید شده توسط ساکنین می‌باشد که باعث کاهش آسایش



و راحتی می‌شود. در محیط‌های صنعتی که در آن فرآیند تولید دی اکسید کربن غلبه می‌گیرد، به عنوان مثال در کارخانه‌های آب گرم‌کن، صنعت بسته‌بندی، انبارهای فریز و غیره، حداکثر میزان دی اکسید کربن بر اساس اکثر استانداردها در حد یک دوره‌ی کاری ۸ ساعته به ۵۰۰۰ ppm می‌رسد.

چگونه اندازه‌گیری دی اکسید کربن می‌تواند نشان‌دهنده‌ی بازده تهویه در یک اتاق باشد؟

اندازه‌گیری دی اکسید کربن در داخل یک ساختمان به طور پویا رابطه‌ی بین دی اکسید کربن تولید شده توسط ساکنین، و تاثیر رقیق‌شدگی توسط طرح و تهویه مکانیکی داده شده را اندازه‌گیری می‌کند. اگر تفاوت بین غلظت داخلی و خارجی شناخته شده باشد و غلظت داخلی پایدار باشد، این نسبت غلظت دی اکسید کربن برای عملکرد سیستم تهویه مناسب و آسان می‌باشد. یک اختلاف ppm ۷۰۰ مربوط به تنفس هوای ۱۰ لیتر در ثانیه‌ی هر فرد می‌باشد. اغلب، حداکثر مقدار که در ادارات محیط کار در سوئد<sup>۱</sup>، توصیه و استفاده می‌شود، ۱۰۰۰ ppm می‌باشد. این مقدار به طور مستقیم می‌تواند بر اثر رقیق‌سازی مربوط شود که وقتی هوا در فضای باز با سطح ppm ۴۰۰ دی اکسید کربن در یک اتاق قرار می‌گیرد و جریان هوا ۷ لیتر در ثانیه‌ی برای هر فرد می‌شود.

اندازه‌گیری هوای بیرونی می‌تواند توسط منابع زیادی از احتراق محلی مانند آتش‌سوزی‌های خروجی یا وسایل نقلیه در حال حرکت تحت تاثیر قرار بگیرد. یک اندازه‌گیری دی اکسید کربن در داخل، یک اندازه‌گیری پویا از تعادل بین تولید دی اکسید کربن در فضا فراهم می‌کند که نشان‌دهنده اشغال و مقدار پایین غلظت دی اکسید کربن در هوای خروجی برای تهویه فراهم می‌کند.

هوای کم یا هوای زیاد در داخل یک ساختمان می‌تواند یک مشکل باشد. نتیجه‌ی تهویه‌ی بیش از حد استفاده‌ی انرژی بالا و هزینه‌های بالاتری را نسبت به شرایط لازم با تهویه مناسب دارد. و به طور

---

<sup>۱</sup> Air-Conditioning Heating Refrigeration(AHR)

بالقوه‌ای منجر به مشکلات کیفیت هوای داخل ساختمان<sup>۱</sup> در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب می‌شود. تهویه کم باعث کیفیت پایینی از هوا می‌شود که می‌تواند بر سلامتی ساکنین تاثیر بگذارد [۱۳].

## ۱-۷- دی اکسید کربن به عنوان یک شاخص از آلودگی آگروز

با استفاده از تهویه مطبوع که در آن شما اطمینان پیدا کنید که غلظت دی اکسید کربن پایین نگه داشته می‌شود، انتشارات سمی نیز به صورت خودکار تهویه می‌شود. وقوع گازهای مختلف در آگروز خودروهای فعلی در یک زمان خاص، دی اکسید کربن نسبی را به دست می‌دهد. این مقدار را می‌توان برای محاسبه‌ی تغییرات زمانی هر غلظت گاز در طول کل سیستم که حسگرهای دی اکسید کربن نصب شده اند، استفاده کرد [۱۲].

## ۱-۸- دی اکسید کربن به عنوان یک شاخص خوب آتش

حسگر دی اکسید کربن نیز می‌تواند به عنوان یک آشکارساز آتش عمل کند. در مورد آتش، غلظت بسیار بالای دی اکسید کربن در یک فاصله‌ی زمانی کوتاه منتشر می‌شود. غلظت بسیار بالاتری نسبت به آنچه که از موتورهای احتراق داخلی تولید می‌شود، می‌تواند باشد. غلظت‌های بالای گاز دی اکسید کربن داغ توسعه داده می‌شود و به سرعت با دود آتش گسترش می‌یابد. در بخش ۳-۴ به طور مفصل‌تری به این موضوع پرداخته می‌شود. آزمون‌های آتش‌نشانی، نشان می‌دهد که ابر دی اکسید کربن در واقع سریع‌تر از دود ممکن، گسترش می‌یابد.

در سال‌های اخیر، خطرات بهداشتی دی اکسید کربن سبب شده است که سازمان‌های دولتی و سازمان‌های ایمنی محیطی در سراسر جهان قوانین سخت‌گیرانه‌ای را برای جلوگیری از انتشار دی

---

<sup>1</sup> Indoor air quality (IAQ)

اکسید کربن که از منابع مهم انسانی بوده، به کار گیرند. تشخیص گزینشی و کارآمد دی اکسید کربن از اولین گام‌های موثر برای کاهش انتشار این آلاینده‌ی گلخانه‌ای می‌باشد.

خطرات ممکن از گاز دی اکسید کربن را می‌توان به طور موثر با کنترل میزان انتشار دی اکسید کربن در جو و در هر مکان ممکن کاهش داد. از این رو، نیاز به دستگاه‌های تشخیص گاز دی اکسید کربن با حساسیت بالا و کارآمد است که بتواند به طور موثری غلظت‌های پایین را حس کند [۱۳].

دی اکسید کربن می‌تواند در فرآیندهای زیادی تولید و یا مصرف شود و کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف دارد. و این باعث می‌شود که تعیین غلظت آن بسیار مهم و کارآمد باشد. انواع حسگرهایی که این گاز را تشخیص می‌دهند، در فصل ۲ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل ۳ کاربرد این حسگرها در صنعت‌های مختلف شرح داده شده است.



## فصل دوم:

انواع حسگرهای گازی تجاری شده‌ی دی اکسید

کربن

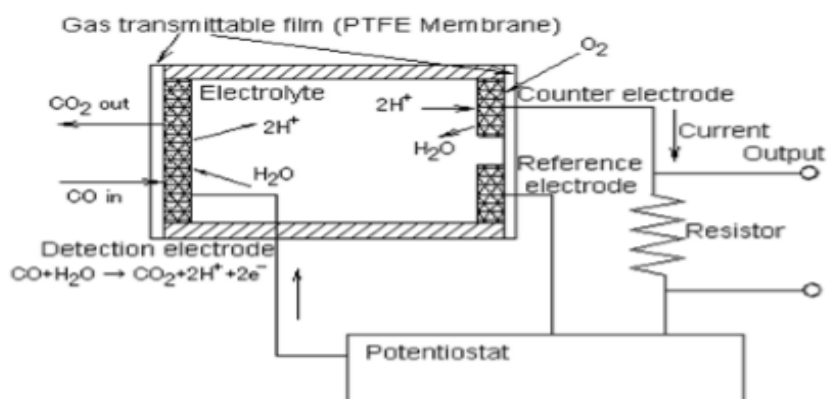
## ۲-۱- مقدمه

حسگرهای گازی دی اکسید کربن به چند دسته تقسیم می‌شوند: حسگرهای گازی الکتروشیمیایی، حسگرهای گازی مقاومتی و حسگرهای گازی نوری. تکنیک‌های مختلف سنجش مورد بحث در این فصل شامل حسگرهای گازی الکتروشیمیایی، حسگرهای گازی مقاومتی و حسگرهای گازی نوری و انواع دیگر این حسگرها، می‌باشد. ویژگی‌های یک حسگر ایده‌آل با استفاده از برخی از متغیرها مانند حساسیت، محدوده‌ی تشخیص، گزینندگی، زمان پاسخ بالا و زمان بازیابی سریع تعریف می‌شود. هر یک از تکنولوژی‌های حسگری در حال تلاش برای به دست آوردن خواص مطلوب یک حسگر ایده‌آل هستند. به این ترتیب، اخیراً تمام حسگرها از تکنیک‌های میکروسازه برای تولید حسگری استفاده می‌کنند. با اتخاذ این تکنیک، بسیاری از این راه‌حل‌های ارائه شده از جمله اندازه کوچک، هزینه‌ی کم، مصرف انرژی کم و همچنین داشتن تمام ویژگی‌های است که آنها را به عنوان یک حسگر ایده‌آل طبقه‌بندی می‌کند [۱۲].

بیشترین تاثیر فناوری نانو در زمینه‌ی تشخیص گاز، روی حسگرهای الکتروشیمیایی و حسگرهای مقاومتی می‌باشد. که می‌توان با به کارگیری از این فناوری پارامترهای حسگری را بهبود بخشید.

## ۲-۲- حسگرهای گازی الکتروشیمیایی

یک حسگر الکتروشیمیایی شامل یک مبدل و یک لایه‌ی فعال برای تبدیل اطلاعات به شکل دیگری از سیگنال الکترونیکی مانند تغییر فرکانس، تغییر جریان یا تغییر ولتاژ است. این حسگرها متشکل از یک الکتروود حساس (کار) و الکتروودهای متقابل که توسط یک لایه‌ی نازک از الکتروولیت / کاتالیزورها جدا شده است، می‌باشد.



شکل ۱-۲: حسگر گازی الکتروشیمیایی [۱۲].

گازی که در تماس با حسگر قرار دارد، ابتدا از طریق یک سد هیدروفوبیکی منتشر می‌شوند و در نهایت به سطح الکتروود می‌رسد. این روش برای اجازه دادن به مقدار مناسبی از گاز برای واکنش در الکتروود حسگر، برای تولید سیگنال الکتریکی کافی، در حالی که مانع از خروج الکتروولیت از حسگر می‌شود، اتخاذ می‌گردد. گاز از طریق سد منتشر می‌شود و در سطح الکتروودهای حسگری شامل اکسیداسیون  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  یا مکانیزم کاهش ( $\text{NO}_2$  و  $\text{Cl}_2$ ) واکنش می‌دهد. این واکنش‌ها توسط مواد الکتروود به طور خاص برای گاز مورد نظر توسعه داده می‌شود. الکتروود متقابل به واکنش الکتروود حساس تعادل می‌دهد. اگر الکتروود سنجشی، گاز را اکسید کند، الکتروود متقابل باید برخی از مولکول‌های دیگر را برای تولید یک جریان معادل آن تولید کند. مسئولیت اصلی مدار پتانسیل ثابت این است که اطمینان حاصل کند که جریان کافی به الکتروود متقابل تغذیه می‌شود و الکتروود متقابل می‌تواند با پتانسیل ترجیحی آن عمل کند [۱۳].

برای یک حسگر که نیاز به ولتاژ درایو خارجی دارد، پتانسیل الکتروودهای حسگر به دلیل واکنش الکتروشیمیایی مداوم که روی سطح الکتروود اتفاق می‌افتد، ثابت نخواهد بود. این امر موجب وخامت عملکرد حسگر در طولانی مدت می‌شود. برای بهبود عملکرد حسگر، یک الکتروود مرجع تعریف می‌شود. الکتروود مرجع مقدار این ولتاژ ثابت را در الکتروود حسگر حفظ می‌کند. هیچ جریانی به الکتروود مرجع و

یا از آن عبور نمی‌کند. گاهی اوقات یک فیلتر اسکرابر در مقابل حسگر برای فیلتر کردن گازهای ناخواسته نصب می‌شود.

اولین حسگرهای الکتروشیمیایی توسط کلروش<sup>۱</sup> در سال ۱۸۸۵ و هابر<sup>۲</sup> در اوایل دهه‌ی ۱۹۰۰ گزارش داده شده است. از آنجایی که پس از آن بسیاری از محققان در حسگرهای گازی الکتروشیمیایی برای تشخیص گازهای مختلف کار کرده‌اند. آقای کری<sup>۳</sup> و همکاران [۱۴]، حسگرهای الکتروشیمیایی حالت جامد میکروماشینی نازک را برای تشخیص همزمان NO<sub>2</sub> و SO<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> را توسعه دادند.

تیان جان<sup>۴</sup> و شنگ هوی هو<sup>۵</sup> [۱۵]، یک مقاله برای حسگرهای الکتروشیمیایی براساس مواد گرافینی برای تشخیص گازهای مختلف منتشر کردند. در بین انواع حسگرها، حسگرهای الکتروشیمیایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. اما مهم‌ترین ضعف این حسگرها در زمان پاسخ آنها است. اما این نقص با پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی این حسگرها کاهش پیدا کرده است. و بیشترین حسگرهای موجودی هستند که از سیستم‌های میکروالکترونیک<sup>۶</sup> و فناوری نانو برای نظارت بر گاز دی اکسید کربن استفاده می‌کنند. لو<sup>۷</sup> و همکاران [۱۶]، از سیستم‌های میکروالکترونیک برای طراحی میکروکنترلرهای الکتروشیمیایی استفاده کردند و تلاش‌هایی برای افزایش حساسیت آنها انجام دادند. آنها توضیح دادند که حساسیت بهبود یافته را می‌توان با پوشش نانو حسگرهایی که از نانولوله‌های کربنی با پلیمر ساخته شده است، بدست آورد.

حسگرهای الکتروشیمیایی طیف گسترده‌ای از گازها را می‌تواند شناسایی کند و گازهای سمی را در غلظت‌های نسبتاً پایین را اندازه‌گیری می‌کند. اما از معایب این سنسورها این است که در مواقعی که

---

<sup>۱</sup> Klaros

<sup>۲</sup> Haber

<sup>۳</sup> Currie, J. F.

<sup>۴</sup> Tian John

<sup>۵</sup> Sheng Hui Ho

<sup>۶</sup> MicroElectroMechanicalSystems(MEMS)

<sup>۷</sup> Lou

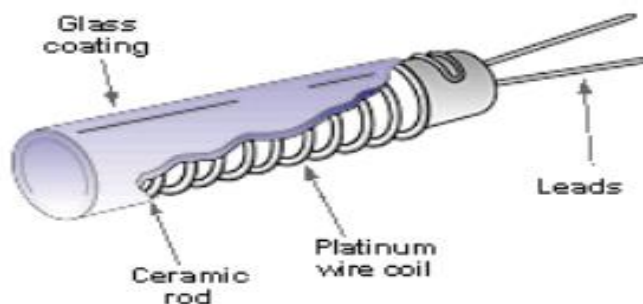


دچار نقص می‌شوند، بدون در نظر گرفتن ملاحظات پیشرفته‌ی نظارتی، استفاده می‌شوند.

## ۲-۳- حسگر گازی خازنی یا مقاومت‌سنجی

حسگرهای گازی الکتروشیمیایی می‌توانند غلظت را براساس نوع تغییرات پارامترهای الکتریکی مانند تغییر مقاومت یا خازن در حضور گاز هدف، شناسایی کنند. حسگرهای مقاومت‌سنجی با یک ولتاژ ثابت کار می‌کند و سیگنال حسگر یک جریان محدود شده‌ی انتشار است. که این شامل دو الکتروود، الکتروود کار و الکتروود متقابل و الکتروود مرجع برای ثابت نگه داشتن ولتاژ، در محلول الکتروولیت غوطه‌ور شده‌اند.

حسگرهای مقاومت‌سنجی معمولاً با استفاده از پیکربندی دو الکتروودی ساخته می‌شوند، اما با توجه به محدودیت‌های غلظت گاز واکنش‌دهنده، این حسگرها از سه الکتروود ساخته می‌شوند. در تنظیمات سه الکتروودی، جریان الکتروود حسگر را می‌توان در یک پتانسیل ثابت اندازه‌گیری کرد، که پتانسیل ترمودینامیکی را برای تمام واکنش‌ها می‌دهد، در این صورت الکتروود مرجع در واکنش دخیل نیست. در اینجا پاسخ حسگر به طور مستقیم در پارامتر مقاومت یا خازن که متناسب با غلظت گاز است، می‌تواند در هر یک از پتانسیل الکتروودهای ثابت و متغیر اندازه‌گیری شود.



شکل ۲-۲: حسگر گازی مقاومت‌سنجی [۱۲].

در سال ۱۹۶۲، سیاما<sup>۱</sup> و تاگوشی<sup>۲</sup> [۱۷]، نشان دادند که  $SnO_2$  هنگامی که به شدت در دمای بالا حرارت داده شود، حساسیت قوی نسبت به گازهای واکنشی مانند تولوئن، بنزن، اتیلن، پروپان و دی اکسید کربن نشان می‌دهد. پس از این موفقیت چشمگیر، حسگرهای نیمه هادی گازی به طور گسترده‌ای برای هشدار نشت گاز، نظارت بر آلودگی، کنترل فرآیندهای صنعتی و غیره مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۳-۱- حسگرهای نیمه‌هادی گازی

حسگرهای نیمه‌هادی گازی، دستگاه‌هایی هستند که از اکسیدهای فلزی داغ تشکیل شده‌اند، که برای اندازه‌گیری غلظت گاز هدف با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها براساس فرآیند جذب گاز برگشت‌پذیر در سطح اکسید گرم شده، معمولاً اکسید قلع، بر روی یک سیلیکون با روش رسوب بخار شیمیایی کار می‌کنند. جذب گاز نمونه بر روی سطح اکسید همراه با اکسیداسیون کاتالیزوری باعث تغییر در مقاومت الکتریکی مواد اکسید شده می‌شود که به غلظت گاز نمونه مربوط و با اندازه‌گیری آن نظارت می‌شود.

دستگاه تولید گرما در پایه، برای گرم کردن حسگر در دمای ثابتی حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد به منظور افزایش سرعت واکنش استفاده می‌شود. یک نیمه‌هادی ذاتی نوع n برای تشخیص گازهای کاهش یافته به علت تغییر رسانایی بالا به عنوان یک نتیجه از الکترون‌های تزریق شده، مناسب است. به طور مشابه، یک نیمه‌هادی ذاتی نوع p برای تشخیص گازهای اکسید کننده مناسب است. در نیمه‌هادی نوع n در گازهای اکسید کننده، مقاومت افزایش می‌یابد. و در گازهای کاهش دهنده، مقاومت کاهش پیدا می‌کند. اما در نیمه‌هادی نوع p این اتفاقات برعکس انجام می‌شود.

---

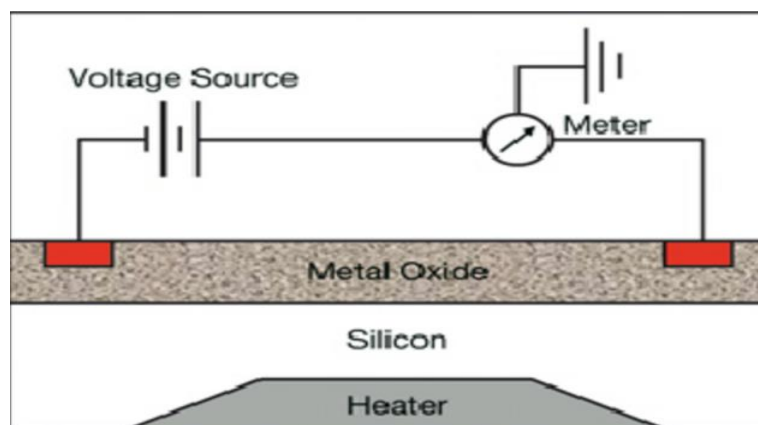
<sup>۱</sup> Siamaya

<sup>۲</sup> Tagushi

حسگرهای نیمه هادی اکسید فلزی برای اولین بار توسط سیاما و تاگوشی پیشنهاد شدند.

مکانیزم تشخیص گاز این حسگرها مبتنی بر واکنش‌های شیمیایی است که روی سطح حسگر اتفاق می‌افتد. در حضور گاز، اکسید فلزی باعث می‌شود که گاز به یون یا مجتمعی از شارژ متصل شود، که منجر به انتقال الکترون‌ها می‌شود. این باعث ایجاد تغییر در مقاومت یا رسانایی لایه‌های سطحی در هنگامی که در معرض آنالیت قرار می‌گیرد، می‌شود. در محیط، این تغییر رسانایی مربوط به مقدار دی اکسید کربن است [۱۸].

حساسیت و گزینندگی در این نوع حسگرها می‌تواند با افزودن مقدار اندکی از فلزات نجیب مانند عنصر Pd بهبود یابد. حسگرهای نیمه‌هادی دارای ساختار قوی هستند و در شرایط با رطوبت بالا کار می‌کند. از معایب این حسگرها این می‌باشد که بسیار حساس به آلاینده‌ها و تغییرات با توجه به شرایط محیطی می‌باشند و از پیچیدگی اثرات پاسخ خطی رنج می‌برند.



شکل ۲-۳: حسگر گازی نیمه‌هادی اکسید فلزی [۱۸].

لی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۹]، فیلم‌های میکروکریستالی تیترواکسید تیتانیات باریم قطبی شده با ضخامت ۲ تا ۵ میکرون ساختند، که حساسیت بالایی نسبت به حضور دی اکسید کربن دارد. همچنین مارسال<sup>۲</sup> و همکاران [۲۰]، نشان دادند که یک حسگر مبتنی بر ترکیبات لانتانیم، توانایی تشخیص دی اکسید کربن را دارد.

تعدادی از مواد نیمه هادی اکسید فلزی برای تشخیص دی اکسید کربن که مورد بررسی قرار گرفته‌اند، عبارتند از: اکسید قلع، تیترواکسید تیتانیات باریم، ترکیبات لانتانیم که برای انجام این کار ترکیبات لانتانیم مناسب‌تر می‌باشد.

## ۲-۴- حسگرهای گازی کاتالیستی

حسگرهای گازی کاتالیستی برای تشخیص گازهای قابل احتراق تقریباً برای یک قرن استفاده شده است. اولین نوع حسگر احتراق کاتالیستی توسط جونز<sup>۳</sup> [۲۱]، در سال ۱۹۸۷ کشف و برای تشخیص گاز متان در معادن استفاده شد. اکثر اکسیدهای فلزی و ترکیبات آنها دارای ویژگی کاتالیستی می‌باشند. مخلوطی از گازهای قابل احتراق تا زمانی که در یک درجه حرارت خاصی به وجود می‌آیند، سوختگی ندارند. اما در حضور یک فرآیند شیمیایی خاص، گاز حتی در دماهای پایین شروع به سوختن می‌کند. این فرآیند به عنوان احتراق کاتالیستی شناخته می‌شود. حسگر گازی که براساس اصول کاتالیستی ساخته می‌شود، حسگر گازی کاتالیستی نامیده می‌شود.

حسگرهای گازی کاتالیستی به دو نوع پلاتوری و ترموالکتریک تقسیم بندی می‌شود. در حسگر

---

<sup>۱</sup>Lee

<sup>۲</sup> Marcel

<sup>۳</sup> Jones

پلاتوری یک تولید گرمای موثر و یک سیگنال قوی برای حسگر گازی استفاده شده است. اما با وجود خواص عالی پلاتین، کاتالیست، کاتالیزور ضعیف برای احتراق گازهای هیدروکربنی می‌باشد. دمای مورد نیاز برای تشخیص هیدروکربن‌ها بین ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد است. در این دما پلاتین شروع به تبخیر شدن می‌کند و به همین ترتیب مقاومت سیم پلاتینی افزایش می‌یابد.

مشکل دیگر این است که سیم پلاتینی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد نرم می‌شود. راه حل این مشکل این است که پلاتین را با سایر اکسیدهای فلزی پوشش دهیم و در نهایت مشکل حسگر را با یک کاتالیزور مانند ترکیبات پلاتین، پلادیوم و غیره حل کنیم. این پوشش باعث می‌شود که حسگر قوی‌تر، پایدارتر و مقاوم در برابر شوک و ارتعاشات، شود.

به تازگی، میکروپلاست‌ها به جای استفاده از سیم پیچ پلاتینی به علت مصرف زیاد برق این سیم-پیچ، در حسگرهای گازی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. این نوع حسگر معمولاً شامل یک سطح کاتالیستی روی یک صفحه داغ با مقاومت Pt است که کاتالیزور را به دمای بسیار بالا می‌کشد، که در آن هر مولکول گاز قابل اشتعال را می‌تواند به وجود آورد. غلظت گازها می‌تواند با نظارت بر تغییر مقاومت پلاتین ناشی از افزایش دما مشخص شود [۲۱].

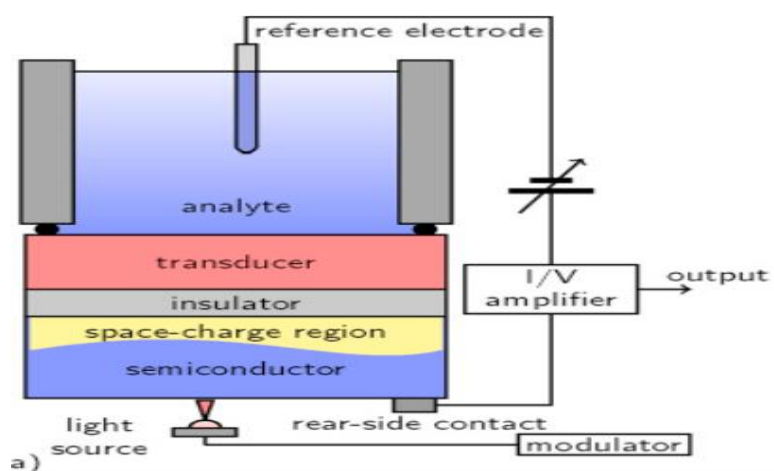
این طراحی اخیراً توسط لی ژو<sup>۱</sup> و همکاران [۲۲]، که در آن یک میکروپلاست دو طرفه برای حسگرهای گازی کاتالیستی طراحی و ساخته شده‌اند. میکروپلاست دو طرفه با استفاده از تکنولوژی MEMS طراحی شده است. حسگرهای کاتالیستی، ساده و یک تکنولوژی کم هزینه‌ای است و می‌تواند اشتعال پذیری گازها را اندازه‌گیری کند. اما برای کار نیاز به هوا دارد و می‌تواند توسط سرب، کلر و سیلیکون مسموم شود.

---

<sup>۱</sup> Li Zhu

## ۲-۵- حسگرهای گازی پتانسیل سنجی

حسگرهای گازی پتانسیل سنجی برای تعیین غلظت تحلیلی برخی از اجزای گاز تجزیه شده استفاده می‌شود. پیکربندی بنیادی حسگر پتانسیل سنجی شامل سه بخش: الکتروود تشخیص، الکتروولیت جامد و الکتروود مرجع می‌باشد. این حسگرها می‌توانند پتانسیل الکتریکی یک الکتروود بدون جریان گردشی اندازه‌گیری کنند. سیگنال به عنوان اختلاف پتانسیل بین الکتروود کار و الکتروود مرجع اندازه‌گیری می‌شود. پتانسیل الکتروود کار به غلظت گاز مورد تحقیق بستگی دارد. از آنجایی که پتانسیل الکتریکی یک ویژگی متمرکز است، عملکرد حسگر مستقل از هندسه یا جرم لایه حساس می‌باشد. این حسگرها معمولاً در بین دماهای ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد عمل می‌کنند. الکتروودها معمولاً از پلادیوم، پلاتین، طلا یا نقره ساخته می‌شود. الکتروولیت‌های مختلف از دو یا ترکیبی از مواد برای تشخیص گازهای مختلف استفاده می‌شود [۲۳].



شکل ۲-۴: حسگر گازی پتانسیل سنجی [۲۳].

حسگرهای پتانسیل سنجی به طور قابل توجهی در عملکرد برای تشخیص گاز دی اکسید کربن با توجه به گزینندگی استثنایی، حساسیت بالا و زمان پاسخ فوق العاده سریع به طور گسترده‌ای استفاده شده است.

آقای لی و همکاران [۲۳]، یک حسگر گازی دی اکسید کربن پتانسیل سنجی را با استفاده از الکترولیت اکسید نیتريد فسفر لیتیومی ایجاد کردند.

### حسگرهای گازی رسانایی گرمایی

اندازه‌گیری رسانایی گرمایی برای تجزیه و تحلیل گاز برای چندین دهه استفاده شده است. از این نوع سنسورها معمولاً برای تشخیص گازهایی با رسانایی گرمایی بالا و بالاتر از هوا مانند هیدروژن و متان استفاده می‌شود. در حالی که گازهایی با رسانایی نزدیک به هوا مانند آمونیاک و منو اکسید کربن نمی‌توانند شناسایی شوند. گازهایی با رسانایی گرمایی کمتر مانند دی اکسید کربن و بوتان با استفاده از این روش به صورت دشواری تشخیص داده می‌شوند [۲۴].

اصول عملکرد آنها براساس اندازه‌گیری کاهش گرما از یک جسم گرم‌تر به عنصر سرد از طریق رسانایی گرمایی است. اصول مفهومی مکانیزم تشخیص این است که هنگامی که مقاومت در معرض مخلوط گاز هدف قرار می‌گیرد، که بسته به نوع رسانایی گرمایی گاز هدف نسبت به گاز مرجع، بالاتر یا پایین‌تر است، گرما از دست می‌رود. با این وجود، تغییر مقاومت آن به عنوان عدم تعادل در پل پنبه‌ای، اندازه‌گیری می‌شود.

این حسگر بیشتر برای مخلوطی از گازها که بیشتر دی اکسید کربن در آن گازها مخلوط شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای این حسگر، تنومند با ساختاری ساده بودن، آسان به کار در غیاب اکسیژن و محدوده‌ی اندازه‌گیری بسیار گسترده‌ای دارد. اما این حسگر می‌تواند با سیم گرمایی واکنش می‌دهد. از پیشگامان که در این حسگر کار کرده‌اند، آقای پاسکال<sup>۱</sup> و آقای تاردی<sup>۲</sup> [۲۴] بودند. آزمایشات انجام شده، عملکرد خوب این حسگر که توسط این مدل پیش بینی شده بود را نشان داد.

---

<sup>۱</sup> Pascal

<sup>۲</sup> Tardy

## ۲-۶- حسگرهای گازی نوری

این نوع حسگر نوعی از حسگرهای موج‌بر با استفاده از فیبر نوری است که به طور معمولی در زمینه‌ی حسگرهای فیزیکی به کار می‌رود. این حسگر با نمونه‌های قبلی متفاوت است. زیرا اطلاعات الکتریکی و شیمیایی را به کار نمی‌گیرد. یک نمونه از حسگرهای نوری تغییرات سیگنال در سطح رزونانس پلاسمایی که متناسب است با ضریب شکست سطح حسگر را حسگری می‌کند، بنابراین حسگر، مقدار مولکول‌های گاز در یک باند را آشکار می‌کند. نمونه دیگر این سنسور optode می‌باشد، که می‌تواند تغییرات ویژگی‌های نوری از قبیل جذب، بازتاب، تابناکی، پلاریزاسیون نور، پراش رامان و غیره، را اندازه‌گیری کند [۲۵].

## ۲-۶-۱- حسگرهای گازی فیبر نوری رنگ‌سنجی و بازتاب‌سنجی

در طی چند دهه‌ی گذشته، بسیاری از گزارش‌های مربوط به استفاده از حسگرهای دی‌اکسید کربن فیبر نوری رنگ‌سنجی و بازتاب‌سنجی با توجه به سهولت در تشخیص در ابتدا با چشم غیر مسلح و اخیراً با اسپکتروفوتومتری ساده، مشاهده می‌شود. تجزیه و تحلیل رنگ‌سنجی بستگی به تغییر شدت در یک طول موج خاص به عنوان یک تابع از تغییر رنگ دارد. حسگرهای دی‌اکسید کربن رنگی به طور گسترده‌ای در کاپنوگرافی استفاده می‌شود که یک تکنیک نظارتی غیر تهاجمی است و امکان تشخیص در کاربردهایی مانند تهویه، گردش خون متابولیسم را فراهم می‌کند.

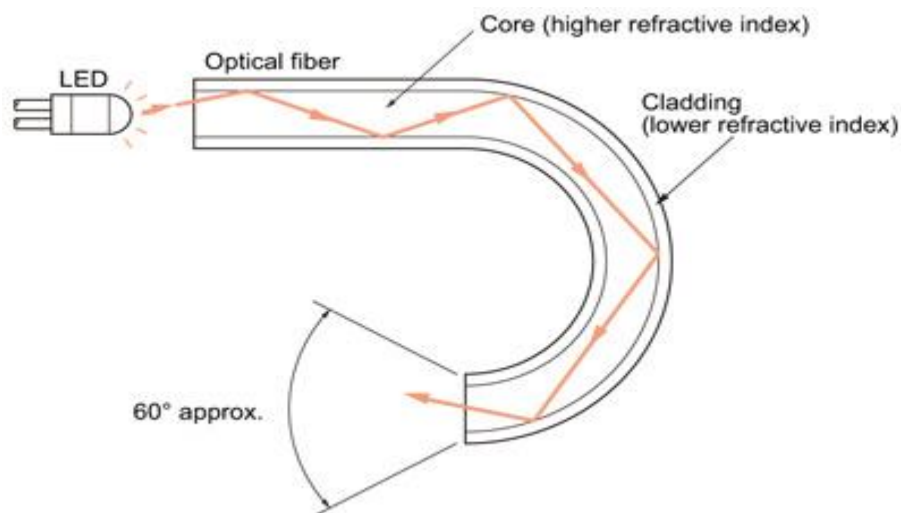
پیکربندی این حسگرها، شامل یک منبع تابش نور، فیبر نوری که این تابش را از طریق گاز هدف منتقل می‌کند. که معمولاً برای بهبود در کارایی این سنسور، سطح فیبر را با ژل سیلیکا پوشش می‌دهند. تجزیه و تحلیل بازتاب‌سنجی بستگی به اصول فیزیکی شکست نور دارد (قانون اسنل<sup>۱</sup>). این روش براساس مقدار اندازه‌گیری غلظت به عنوان یک تابع تغییر در شاخص شکست منجر به تغییرات فرکانس

---

<sup>۱</sup> Snell theory



رزونانس‌های نوری می‌شود. با توجه به ابعاد کوچک برای محصور شدن نور، این حسگرها به تغییرات کوچک در شاخص شکست حساس هستند [۲۶].



شکل ۲-۵: نمونه‌ای از حسگر گازی فیبر نوری [۲۶].

با این حال، محدودیت‌های عمده‌ی دستگاه‌های فیبر نوری رنگ‌سنجی و بازتاب‌سنجی عبارتند از: عدم اطمینان، مسائل آلودگی، حساسیت ضعیف.

## ۲-۶-۲- حسگرهای گازی مادون قرمز

حسگرهای مادون قرمز شامل یک آشکارساز است که انرژی تابشی الکترومغناطیسی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. آشکارسازهای مختلفی از قبیل: ترموالکتریک، بولومتر میستوری، آشکارساز پیروالکتریک و آشکارساز فوتونی هستند. همچنین شامل یک منبع مادون قرمز می‌باشد که می‌تواند یک نور معمولی رشته‌ای یا یک رشته سیم گرم باشد که می‌تواند برای تشخیص دی اکسید کربن و سایر هیدروکربن‌ها استفاده شود.

جز دیگری فیبر نوری است که می‌تواند از دو نوع باشد: پراکنده و غیرپراکنده. انواع غیرپراکنده از

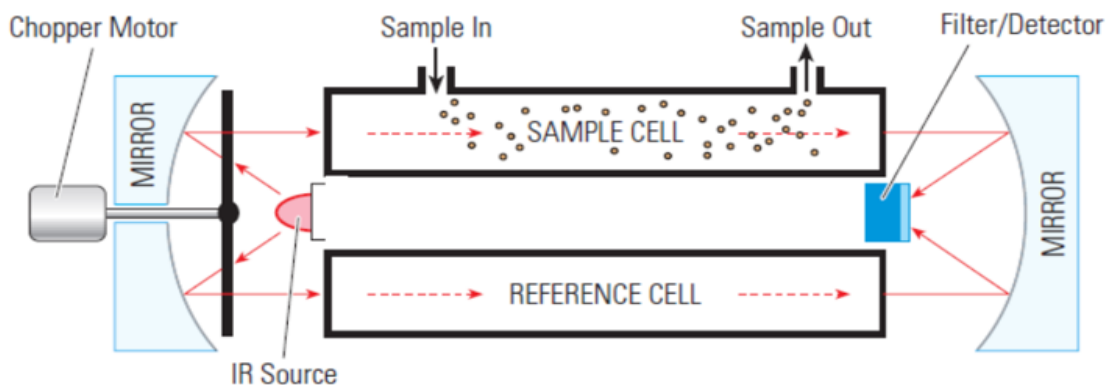
فیلترهای باند نوری گسسته استفاده می‌شود و اغلب برای کاربردهای حسگر گازی استفاده می‌کنند. در حالی که، انواع پراکنده از یک دستگاه نوری نظیر یک منشور استفاده می‌کنند.

سلول‌های گازی به مسیر نوری اجازه می‌دهد که با گاز هدف تعامل داشته باشد. اصول پایه‌ای شامل یک لامپ مادون قرمز است که برای هدایت مجموعه‌ای از امواج نور که از طریق یک سلول گازی محدود شده‌ی پر از هوا به سوی آشکارسازهای نوری مادون قرمز، که اندازه‌گیری موج‌های ضعیف شده را از طریق یک فیلتر نوری به آن می‌رسد، استفاده می‌شود.

تقریباً تمام مولکول‌های گاز دی اکسید کربن ، نور مادون قرمز را در طول موج مشخص که نوع اتصال را نشان می‌دهد، جذب می‌کنند. در نتیجه حالت‌های ارتعاشی، خم شدگی و کشش متقارن یا کشش نامتقارن را نشان می‌دهد. در طول فرآیند، یک مقدار مشخص از نور مادون قرمز جذب می‌شود که متناسب با غلظت گاز است. این تغییر در نور مادون قرمز به عنوان پاسخ حسگر اندازه‌گیری می‌شود. جالب توجه است که حساسیت و محدودیت تشخیص بسیار وابسته به شدت نور مادون قرمز، طراحی مسیر نوری و آشکارساز است. گاز دی اکسید کربن نور مادون قرمز را در طول موج‌های ۴/۲۶ ، ۲/۷ و ۱۵ میکرون جذب می‌کند [۲۷].

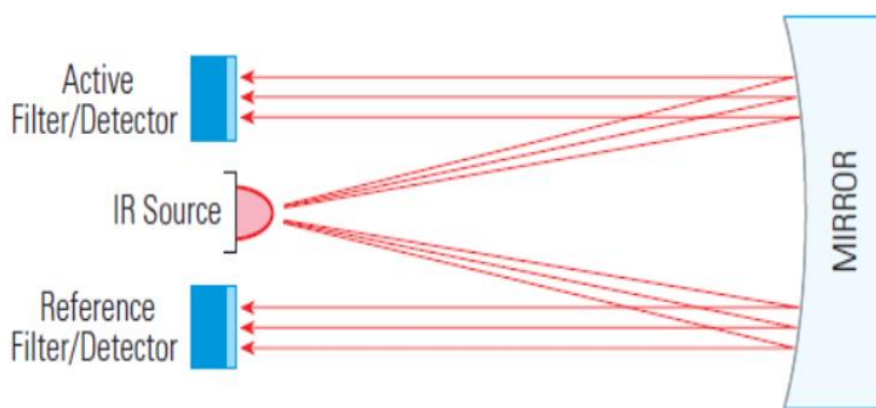
دو نوع ساختار نوری وجود دارد که برای ساخت حسگرهای گازی مادون قرمز دی اکسید کربن استفاده می‌شود:

پرتوهای دو زمانه و پرتوهای فضا-دو طرفه: ساختار نوری پرتو دو زمانه تنها یک پرتو مادون قرمز که از منبع مادون قرمز منتشر می‌شود. اما آشکارساز، دو پرتو مادون قرمز را با طول موج‌های مختلف و در زمان‌های مختلف دریافت می‌کند [۲۷].



شکل ۲-۶: ساختار نوری پرتو دو زمانه در حسگر گازی مادون قرمز [۲۷].

درحالی که، ساختار دو فضایی دارای یک پرتو مادون قرمز است که از منبع مادون قرمز منتشر می‌شود و به طور همزمان وارد دو آشکارساز در صفحات موازی در این طرح می‌شود. پرتو دو فضایی به منظور بهبود ساخت و استفاده از یک محفظه‌ی هوای مخروطی طراحی شده است.



شکل ۲-۷: ساختار پرتو دو فضایی در حسگر گازی مادون قرمز [۲۷].

دو راه تشخیص توسط این آشکارسازها عبارتند از: مولکول‌های گاز دی اکسید کربن از تعدادی اتم که به یکدیگر متصل هستند، ساخته می‌شوند. این پیوندهای بین اتمی شبیه به چشمه‌ها می‌باشند که اتم‌های مختلف را به هم متصل می‌کنند. این پیوند با یک فرکانس ثابت به نام فرکانس طبیعی ارتعاش می‌کند. هنگامی که تابش مادون قرمز با مولکول‌های گاز دی اکسید کربن در ارتباط قرار می‌گیرد، بخشی از انرژی که دارای فرکانس مشابه با فرکانس طبیعی مولکول دی اکسید کربن است، جذب می‌شوند و مابقی آن انتقال پیدا می‌کنند. همان‌طور که مولکول‌های گازی این تابش را جذب می‌کنند. مولکول‌ها انرژی بیشتری دریافت می‌کنند و با انرژی بیشتری ارتعاش می‌کنند.

این ارتعاش باعث افزایش درجه حرارت مولکول‌های گاز می‌شود. این افزایش دما توسط آشکارساز اندازه‌گیری می‌شود. از سوی دیگر، تابش جذب شده توسط مولکول‌های گاز در طول موج خاصی موجب کاهش طول موج اولیه می‌شود. این کاهش انرژی می‌تواند به عنوان یک سیگنال نیز شناسایی شود.

قانون بیر، رابطه‌ی دقیق بین شدت نور مادون قرمز و غلظت گاز را توضیح می‌دهد.

$$I = I_0 e^{KP} \quad 1-2$$

I شدت نور در معرض آشکارساز،  $I_0$  شدت نور اندازه‌گیری شده از یک محفظه‌ی نمونه خالی، K

یک ثابت وابسته به سیستم و P غلظت گاز اندازه‌گیری شده می‌باشد.

گارسیا رومئو<sup>۱</sup> و همکاران [۲۸]، حسگرهای گازی مادون قرمز غیر پراکنده<sup>۲</sup> را برای اندازه‌گیری غلظت گاز دی اکسید کربن برای شبکه‌های حسگری بی‌سیم با مصرف انرژی کم، طراحی کرده‌اند. به منظور تولید یک حسگر کوچک شده، گانگیام ژانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۲۹]، یک حسگر دی اکسید کربن براساس جذب مادون قرمز با ابعاد کوچک را توسعه دادند.

<sup>۱</sup> Garcia Romeo

<sup>۲</sup> Non-dispersed infrared gas sensors(NDIR)

<sup>۳</sup> Gangmiam Zhang

اگرچه حسگرهای مادن قرمز دقت بالایی را نشان می‌دهند و حسگرهای نسبتاً کوچکی هستند، این حسگرها همچنان با معایب اصلی مواجه هستند که فرصت‌های زیادی برای توسعه‌ی حسگرهای جدید دی اکسید کربن به‌جود می‌آورند. و از معایب این حسگر این است که همه‌ی گازها جذب مادون قرمز ندارند، نظارت متوالی در تجزیه و تحلیل چند نقطه کندتر است و همچنین نیاز به تخصص بیشتری برای کاربرد دارد.

## ۲-۷- حسگرهای موج آکوستیک

حسگرهای موج آکوستیکی به این دلیل نامگذاری شده‌اند، که مکانیزم تشخیص آنها یک موج مکانیکی یا صوتی است. حسگرهای آکوستیکی از یک موج مکانیکی (آکوستیکی) برای اندازه‌گیری استفاده می‌کنند. زمانیکه یک موج آکوستیکی در سطح ماده منتشر می‌شود، هر تغییری در مسیر انتشار موج می‌تواند باعث تغییر در سرعت و/یا دامنه‌ی موج شود. تغییرات سرعت موج می‌توانند با اندازه‌گیری فرکانس و فاز موج نظارت شوند و سپس با ارتباط دادن این تغییر به کمیت فیزیکی مورد نظر، اندازه‌گیری توسط حسگر صورت می‌گیرد. حسگرهای آکوستیکی عمدتاً از مواد پیزو الکتریک برای تولید امواج آکوستیکی استفاده می‌کنند. حسگرهای آکوستیکی مبتنی بر پیزو الکتریک با اعمال یک میدان الکتریکی نوسانی، امواج مکانیکی تولید می‌کنند که این امواج در زیرلایه منتشر می‌شود و پس از آن امواج بازگشتی دوباره تبدیل به میدان الکتریکی شده و از آن برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود [۳۰].

مواد پیزو الکتریک مختلفی در حسگرهای آکوستیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. متداول‌ترین آنها کوارتز ( $\text{SiO}_2$ ) و لیتیم تانتالیت ( $\text{LiTaO}_3$ ) می‌باشد. لیتیم نیوبیت ( $\text{LiNbO}_3$ ) هم به مقدار کمتری مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر کدام از این مواد مزایا و معایب خاص خود را دارند که پارامترهای مورد بررسی می‌تواند شامل مواردی مانند هزینه، وابستگی دمایی، میرایی و سرعت انتشار موج باشند [۳۱].

یکی از خصوصیات جالب کوارتز این است که وابستگی دمایی ماده را می‌تواند از طریق زاویه برش

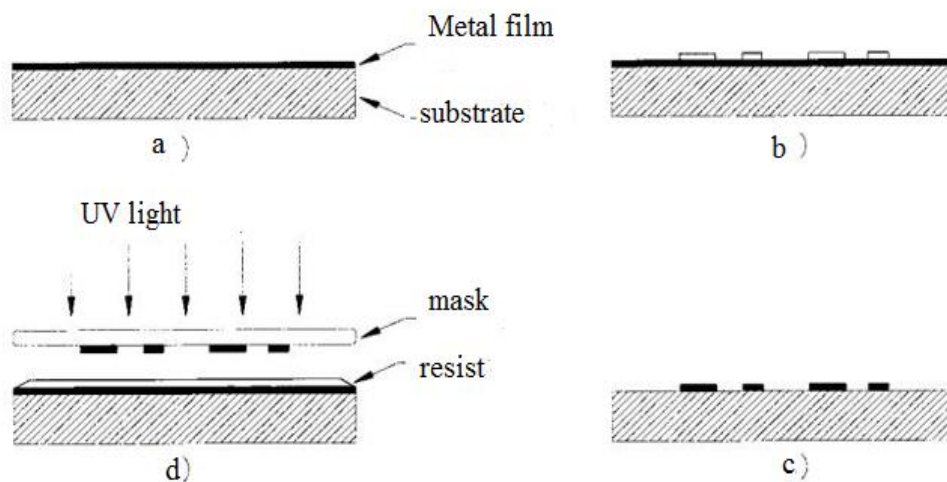
و راستای انتشار موج انتخاب کرد. با انتخاب مناسب، اثرات دمایی مرتبه اول می‌تواند کمینه شود. سنسورهای دمای آکوستیکی می‌توانند با ماکزیمم کردن این اثر طراحی شوند. ارتباط داشتن وابستگی دمایی به راستای برش ماده و انتشار موج برای  $\text{LiNbO}_3$  یا  $\text{LiTaO}_3$  صادق نیست و در این مواد یک وابستگی دمایی خطی همواره و برای همه‌ی برش‌ها و راستاها وجود دارد. علاوه بر این سه ماده‌ی پیزو الکتریک گفته شده، برخی مواد دیگر نیز قابلیت استفاده تجاری در این سنسورها را دارند که از جمله این مواد می‌توان به  $(\text{GaAs})$ ،  $(\text{SiC})$ ،  $(\text{LGS})$ ،  $(\text{ZnO})$ ،  $(\text{AlN})$ ،  $(\text{PZT})$  و  $(\text{PVDF})$  اشاره کرد [۳۱].

حسگرها با استفاده از فوتولیتوگرافی<sup>۱</sup> و در پروسه‌ای که در شکل ۸-۱ قابل مشاهده است، ساخته می‌شود. فرآیند ساخت با پولیش کردن دقیق و پاک کردن لایه‌ی پیزو الکتریک آغاز می‌شود. در ادامه مطابق شکل ۸-۱ (a)، یک لایه‌ی فلز که معمولاً آلومینیوم است، به صورت کاملاً یکنواخت بر روی لایه‌ی پیزو الکتریک قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی بعد یک لایه فوتورزیست روی دستگاه قرار می‌گیرد و پس از آن با استفاده از روش لایه‌نشینی چرخشی<sup>۲</sup>، ماده سفت می‌شود. پس از آن دستگاه در معرض نور فرابنفش قرار می‌گیرد (شکل ۸-۱ (b))، باید توجه داشت که یک لایه ماسک بین نور و دستگاه قرار می‌گیرد. این ماسک شامل قسمت‌های غیرشفاف است که این قسمت‌ها متناظر با سطوحی است که بنا است نهایتاً روی دستگاه با فلز پوشش‌دهی شود. نواحی که در معرض تابش فرابنفش قرار می‌گیرند دچار یک تغییر شیمیایی می‌شوند و با انحلال فلز، از روی سطح خارج می‌شوند (شکل ۸-۱ (c))، مواد فوتورزیست باقیمانده نیز نهایتاً باید از سطح حسگر جدا شوند (شکل ۸-۱ (d)). طرح فلزی باقیمانده مبدل اینتردیجیتال (IDT) نامیده می‌شود. با تغییر طول، عرض، موقعیت و ضخامت IDT، کارایی حسگر می‌تواند ماکزیمم شود [۳۲].

---

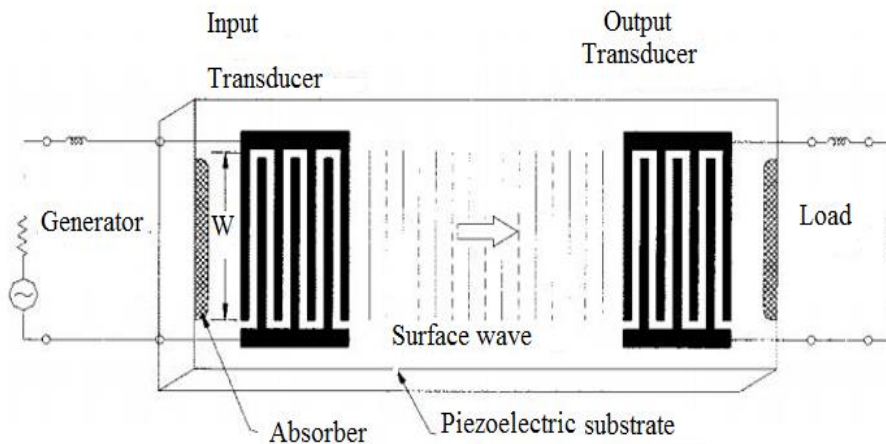
<sup>۱</sup> photolithography

<sup>۲</sup> Spin Coating



شکل ۲-۸: مراحل ساخت حسگرهای آکوستیکی [۳۲].

تجهیزات آکوستیکی به وسیله‌ی مود انتشار امواج در لایه‌ی پیزوالکتریک توصیف می‌شوند. امواج آکوستیکی با سرعت‌ها و راستاهای جابه‌جایی‌شان از هم تمیز داده می‌شوند. بسته به مواد و شرایط مرزی، ترکیبات مختلفی امکان‌پذیر است. IDT در هر حسگر میدان الکتریکی لازم برای جابه‌جا کردن زیرلایه‌ی حسگر برای ایجاد موج آکوستیکی را فراهم می‌کند. امواج در این لایه منتشر شده و توسط IDT دیگر دوباره به میدان الکتریکی تبدیل می‌شود. شکل ۱-۹ پیکربندی متداول تجهیزات آکوستیکی را نشان می‌دهد. امواج عرضی یا برشی، جابه‌جایی‌هایی عمود بر راستای انتشار موج بوجود می‌آورند و می‌توانند برای ایجاد جابه‌جایی در راستای موازی و یا عمود بر سطح مورد اندازه‌گیری پلاریزه شوند (با یک الگوی مشخص مرتعش شوند). حرکت افقی برشی موج نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی عرضی پلاریزه‌شده موازی با سطح اندازه‌گیری است درحالی که حرکت قائم برشی نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی عرضی عمود بر سطح می‌باشد [۳۲].



شکل ۲-۹: یک حسگر آکوستیکی با دو IDT، [۳۲].

زمانیکه موج از طریق کل حجم زیرلایه منتشر شود، موج مورد نظر موج بالک یا موج حجمی نامیده می‌شود. بیشترین کاربرد تجهیزات مبتنی بر امواج آکوستیک حجمی<sup>۱</sup> در رزوناتورهای مود برشی در راستای ضخامت و حسگرهای (SH-APM) است. زمانی موج در سطح زیرلایه منتشر شود، به موج مورد نظر موج سطحی می‌گویند. بیشترین کاربرد تجهیزات مبتنی بر امواج سطحی، حسگرهای سطحی<sup>۲</sup> و حسگرهای (SH-SAW) که حسگرهای موج عرضی سطحی نیز نامیده می‌شوند، هستند. مود انتشار موج می‌تواند تاثیر گسترده‌ای بر کارایی سنسور و نحوه ساخت حسگر داشته باشد. تمام تجهیزات آکوستیکی که به تغییرات پارامترهای فیزیکی حساس باشند را می‌توان به عنوان سنسور مورد استفاده قرار داد. هر تغییری در مشخصه‌های مسیر انتشار موج، می‌تواند منجر به تغییر خروجی شود. تمام حسگرهای آکوستیکی می‌توانند در محیط‌های گازی و یا خلا کار کنند، اما تنها زیرمجموعه‌ای از آنها می‌توانند در تماس با مایعات عملکرد مناسب داشته باشند.

<sup>۱</sup> Bulk Acoustic Wave (BAW)

<sup>۲</sup> Surface Acoustic Wave (SAW)



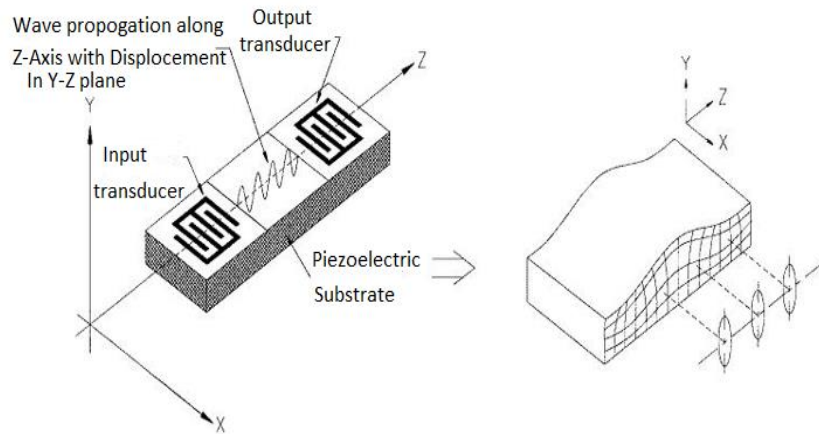
همان‌طور که قبلاً گفته شد، ویژگی عملکرد هر حسگر توسط برخی عوامل از جمله حساسیت، زمان پاسخ، گزینندگی، اندازه‌ی کوچک و مصرف کم انرژی تعیین می‌شود. حسگرهای موج آکوستیک دارای این ویژگی‌ها می‌باشند و یک حسگر خوب و ایده‌آل برای حسگرهای گازی می‌باشد. یکی دیگر از مزیت‌های فناوری موج بلند آکوستیک این است که سنجش گاز می‌تواند به صورت بی‌سیم انجام شود که امکان نظارت مستقیم بر حسگری گاز را فراهم می‌کند و استفاده از کابل‌های سیمی را از بین می‌برد. این ویژگی آن را یک گزینه جذاب برای تشخیص گاز می‌سازد و آن را برتر از دیگر روش‌های سنجش گاز می‌کند.

## ۲-۷-۱- حسگرهای گازی موج آکوستیک سطحی (SAW)

در سال ۱۸۸۷، لورد ریلی<sup>۱</sup> مود انتشار SAW را کشف و خواص آن را پیش‌بینی کرد. به همین خاطر آن را به نام کاشف آن نام‌گذاری کردند. موج ریلی از یک مولفه‌ی طولی و یک مولفه‌ی برشی عمودی تشکیل شده است که می‌تواند با یک محیطی که در تماس با سطح است کوپل شود (شکل ۱-۱۰). این کوپلینگ سرعت و دامنه‌ی موج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این مشخصه حسگرهای SAW را قادر می‌سازد تا به صورت مستقیم برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی و جرمی مورد استفاده قرار بگیرد. حرکت سطحی همچنین دستگاه را قادر می‌سازد تا به عنوان میکرو محرک مورد استفاده قرار بگیرد. سرعت این موج حدود پنج مرتبه کوچک‌تر از موج الکترومغناطیسی متناظر است. این موضوع موج ریلی را در میان کندترین امواج در انتشار در فلزات قرار می‌دهد.

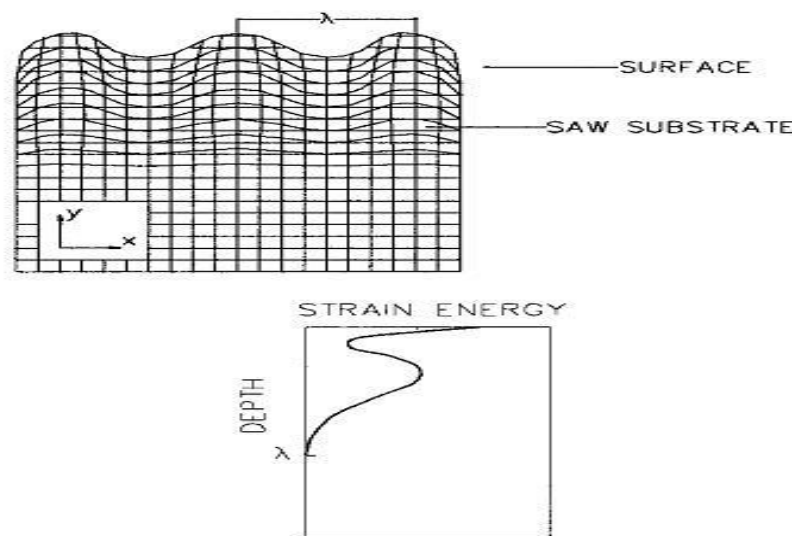
---

<sup>۱</sup> Lourd Riley



شکل ۱-۲: حسگر سطحی آکوستیکی SAW و موج ریلی [۳۳].

شکل ۱-۱۱، جزئیات میدان تغییر شکل ناشی از انتشار SAW در راستای محور Z و توزیع انرژی پتانسیل ناشی از این حرکت را بیان می‌کند. موج ریلی تمام انرژی آکوستیکی خود را درون طول موج سطح قرار می‌دهد. در نتیجه سنسورهای SAW بالاترین حساسیت را در میان حسگرهای آکوستیکی بررسی شده دارد. حسگرهای SAW متداول در رنج فرکانسی ۲۵ تا ۵۰۰ مگاهرتز کار می‌کنند. از این حسگر می‌توان برای اندازه‌گیری گازها به خصوص گاز دی اکسید کربن استفاده کرد. اما حسگر مناسبی برای اندازه‌گیری مایعات نیست. زیرا، زمانیکه حسگر SAW در تماس با یک مایع قرار می‌گیرد، موج فشاری ایجاد می‌شود و موج سطحی دچار میرایی شدید می‌شود [۳۳].



شکل ۲-۱۱: منحصر شدن انرژی موج به یک طول موج [۳۳].

در مورد حسگرهای SAW، پاسخ، نتیجه‌ی پدیده‌های فیزیکی ناشی از مدولاسیون امواج صوتی سطحی است. حسگر یک سیگنال الکتریکی را تحریک می‌کند که از طریق مبدل بین دیجیتال (IDT) به یک موج مکانیکی بر روی یک زیرلایه‌ی کریستالی تکی تحریک می‌شود که به سیگنال الکتریکی در خروجی تبدیل می‌شود. زیرلایه‌ی کریستالی منفرد انتخاب شده بر اساس پیزوالکتریک جفت شده‌ی موثر و حساسیت‌های دمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. و معمولاً از اکسید بیسموت گلانیوم، اکسیدهای روی، لیتیم نیوبات، لیتیم تانتالات، نیوبیوت پتاسیوم، کوارتز ST و غیره استفاده می‌شود.

جالب توجه است که برخی از انواع حسگرهای SAW به منبع تغذیه نیازی ندارند. به این ترتیب، این حسگرها به راحتی در دسترس قرار می‌گیرند که برای نظارت مداوم در برنامه‌های کاربردی در محیط‌های سخت مناسب است. حسگرهای SAW به دلیل محکم بودن، دارای ثبات و حساسیت بالا، وزن کم و پاسخ واقعی بسیار سودمند می‌باشند.

اگرچه حسگرهای دی اکسید کربن مبتنی بر SAW دارای محدودیت استثنایی برای تشخیص می‌باشند، اما پارامترهای دیگر مانند گزینندگی، پایداری و زمان پاسخ و بازیابی که به ندرت گزارش

می‌شوند از دیدگاه امکان‌سنجی حسگر مهم هستند. بنابراین فرصت‌های فراوانی برای تحقیقات بیشتر وجود دارد [۳۴].

## ۲-۸- حسگرهای میکروبالانس کریستالی کوارتزی ( QCM )

حسگرهای میکروبالانس کریستالی کوارتزی<sup>۱</sup> یکی دیگر از انواع مبدل MEMS موج آکوستیک است که بر مبنای تغییر جرم بر روی سطح رزوناتور کریستالی کوارتزی نوسانگر به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. به طور مختصر، پیکربندی QCM شامل یک ویفر کریستالی کوارتزی است که دارای الکترودهایی است که روی هر یک از آنها قرار داده شده و برای استفاده از پتانسیل الکتریکی در سراسر کریستال استفاده می‌شود. پس از اعمال ولتاژ الکتریکی در زیرلایه، کریستال در یک فرکانس خاص نوسان می‌کند، که به شدت، به ضخامت زیرلایه‌ی مورد استفاده بستگی دارد. اندازه‌گیری تغییر جرم با نظارت بر فرکانس QCM امکان‌پذیر است که به‌عنوان پاسخ حسگر خوانده می‌شود.

تای<sup>۲</sup> و همکاران حسگر پلی‌تریمید پوشش داده شده با QCM برای تشخیص دی‌اکسید کربن در هوای خشک و مرطوب برای غلظت گازی در محدوده‌ی ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ppm را گزارش داده‌اند. آنها عدم موفقیت در عملکرد حسگر از لحاظ گزینندگی و تکرارپذیری را نشان دادند. با توجه به وزن مولکولی کم دی‌اکسید کربن، انتخاب استفاده از این حسگر برای کاربردهای بالقوه آن به احتمال زیاد به دلیل عدم حساسیت ارائه شده توسط برنامه‌ی QCM امکان‌پذیر نمی‌باشد [۱۲].

## ۲-۹- حسگرهای گازی میکروکانتینری

حسگر میکروکانتینری متعلق به کلاس برتر است و توانایی تشخیص چند مولکول آنالیت را دارد.

---

<sup>۱</sup> Quartz Crystalline Microbalance(QCM)

<sup>۲</sup> Mr. Tai

کانتینر جز اصلی این نوع حسگر است که ساختار مکانیکی در یک انتهای آن ثابت شده و در انتهای دیگر آن نوسان می‌کند. آنها براساس اصول تغییر جرم کوچک کار می‌کنند. به این ترتیب، جابجایی بیشتر در کانتینرها در فرکانس نوسان تغییر می‌کند. این تغییر جرم یک واکنش برگشت پذیر است که بین لایه‌ی حساس پوشش داده شده روی گاز هدف و کانتینر قرار دارد.

این حسگرها به طور موثری در گاز، مایع و خلا کار می‌کنند و در انتقال سیگنال شیمیایی به فشار مکانیکی با میزان پاسخ بسیار بالا همراه هستند. حالت‌های اندازه‌گیری می‌تواند تحریک الکترومغناطیسی پیزو الکتریک باشد. ترکیبات حساس پوششی معمولاً از پلیمرها استفاده می‌شوند [۱۲].

در جدول ۱-۲ توضیحات مختصری برای چندین حسگر گازی دی اکسید کربن تجاری سازی شده در صنعت آورده شده است.

جدول ۱-۲: برخی از سنسورهای گازی کربن دی اکسید تجاری شده

نام سنسور	نوع سنسور	زمان پاسخ سنسور	محدوده تشخیص سنسور	تصویر سنسور
IRCEL-CO2R	مادون قرمز هیبریدکننده	۰-۵% Vol.CO <sub>2</sub>	تائیه < ۳۵	
T G S 4160	حالت جامد (هیبریدی)	۲۵۰ تا ۳۰۰۰۰ ppm	تقریبا ۲ دقیقه تا نود درصد از حجم گاز	
IRC-A1	مادون قرمز غیبرپراکننده	۰ تا ۵۰۰۰ ppm	تائیه < ۴۰	
MSH-CO2	مادون قرمز هیبریدکننده	۰ تا ۱۰۰۰ ppm تا حدود ۰-۵% حجم CO <sub>2</sub>	تائیه < ۳۰	

## فصل سوم

# کاربردهای حسگری گازی دی اکسید کربن در صنایع

در فصل اول انواع حسگرهای گازی دی اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفت. اما در این فصل در مورد اهمیت و کاربرد این حسگرها بحث خواهد شد. تعیین غلظت دی اکسید کربن در فضای منازل کمک زیادی به صرفه جویی در انرژی مورد استفاده در منازل دارد. همچنین می‌توان کیفیت هوا را بهبود داد. تعیین میزان دی اکسید کربن برای بهبود در صنایع غذایی، از جمله در سالن های پرورش مرغ و همچنین در بسته‌بندی مواد غذایی اهمیت زیادی دارد.

در کارخانه‌های خودروسازی برای تعیین میزان دی اکسید کربن حاصل از احتراق سوخت درون ماشین، از حسگرهای گاز در خروجی اگزوز استفاده می‌کنند. در دودکش کارخانه‌های متفاوتی همچون تولید مواد شیمیایی و پتروشیمی، کارخانه‌های فسیلی و ... از حسگر گاز دی اکسید کربن استفاده می‌کنند تا میزان دی اکسید کربن را اندازه گرفته و فیلتر مناسب برای آن بسازند. حسگرهای گاز دی اکسید کربن همچنین تاثیر زیادی در سنجش گرمایش زمین و تغییرات آب و هوایی دارد و در مکان‌های مختلف جو برای سنجش دی اکسید کربن از حسگر آن استفاده می‌گردد.

تعیین میزان غلظت گاز دی اکسید کربن همچنین کاربرد زیادی در گلخانه‌های پرورش محصولات کشاورزی دارد و تعیین میزان آن برای بهبود فرآیند های رشد و بهبود تولید محصولات کشاورزی اثر قابل توجهی دارد. در هشداردهنده‌های آتش در منازل، ساختمان‌ها و هواپیماها از حسگرهای گازی دی اکسید کربن استفاده می‌شود و حسگرهایی که زمان پاسخ مناسب و حساسیت بالایی دارند استفاده می‌شود.

در معادن زیر زمینی زغال سنگ به منظور ایمنی و کنترل هوای مناسب برای کارگران و همچنین کنترل گازهای موجود در معادن برای جلوگیری از انفجار گازهای اشتعال پذیر از حسگرهای گازی و بخصوص حسگرهای گازی دی اکسید کربن استفاده می‌کنند. از دیگر کاربردهای این حسگر استفاده آن در علوم پزشکی می‌باشد. میزان غلظت گاز دی اکسید کربن در تنفس انسان با استفاده از این



حسگرها اندازه‌گیری می‌شود. که مرسوم‌ترین حسگر گازی در این کاربرد، حسگر گازی مادون قرمز می‌باشد.

در این فصل چندین کاربرد حسگر گازی دی‌اکسید کربن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا نحوه‌ی ایجاد گاز دی‌اکسید کربن و منابع‌ای که این گاز را در مکان‌های مختلف به‌وجود می‌آورد، بررسی می‌شود. سپس چه خطراتی و یا چه تاثیراتی می‌تواند بر محیط و افراد در معرض این گاز، بگذارد. و در انتها اهمیت استفاده و چگونگی به کار گرفتن این حسگرها شرح داده خواهد شد.

## ۳-۲- کاربرد حسگرهای نظارتی گاز در معادن زغال سنگ زیر زمینی و مناطق

### خطرناک [۳۵]

معدن زیر زمینی نیاز به تجهیزات و نیروی انسانی دارد تا زیر سطح زمین کارایی داشته باشد. هوای زیر زمین ممکن است با گازهای سمی آلوده شود که اکسیژن لازم برای تنفس وجود نداشته باشد. یا ممکن است که گازهای قابل اشتعال به‌وجود آید که باعث انفجار و حوادث مرگبار می‌شود و می‌تواند زیان‌های فراوانی را به همراه داشته باشد. بنابراین، برای رشد پایدار صنعت معدن زغال سنگ و ایمنی معدنچیان، باید فن‌آوری‌هایی را توسعه داد یا روش‌هایی پیدا کرد، که خطرات ناشی را برای معادن کاهش دهد. نیاز اولیه برای نگه داشتن فضای مناسب در معدن زیر زمینی، این است که به طور منظم و مداوم سطوح گازهایی مانند اکسیژن، متان، مونو اکسید کربن، دی اکسید کربن و غیره، را نظارت کرد. با انجام این کار می‌توان فضایی مناسب برای معدنچیان ایجاد کرد که بتوانند با کمترین خطرات ممکن از انفجار یا هوای مناسب برای تنفس در معدن حضور پیدا کنند.

مناطق خطرناک:

آتش‌سوزی، آلودگی هوای سمی و گرد و غبار یا انجام گازها، بعضی از خطرات بحرانی هستند. که به طور خاص به معدن زیر زمینی مرتبط می‌شوند. لازم است که مشخص شود که کدام منطقه خطرناک تعریف می‌شود تا به معدنچیان پیش از آن هشدار داده شود.

الف) گازهای اشتعال پذیر: یک منطقه خطرناک براساس سه معیار: نوع گاز، دمای احتراق گاز و احتمال وجود گاز در غلظت‌های قابل اشتعال، تعریف می‌شود.

محدودیت انفجار پایین<sup>۱</sup> (LEL): حداقل غلظت گاز یا بخار مخلوط با هوا که وقتی در تماس با یک منبع آتش‌سوزی قرار می‌گیرد، باعث انتشار شعله‌های آتش می‌شود. در اصطلاح رایج، مخلوط‌های زیر LEL در بیش از حد نشتی برای آتش‌سوزی است.

محدودیت انفجار بالا<sup>۲</sup> (UEL): حداکثر غلظت گاز یا بخار مخلوط با هوا که وقتی در تماس با منبع اشتعال می‌باشد، باعث انتشار شعله‌های آتش می‌شود. در اصطلاح رایج، مخلوطی از UEL در بیش از حد غنی برای حمایت از احتراق می‌باشد.

ب) گازهای سمی: گازهای سمی در سطوح پایین در مدت زمان طولانی و یا در غلظت‌های بالا در طی یک مدت کوتاهی می‌توانند موجب آسیب شوند.

مقدار معین آستانه<sup>۳</sup> موادی که به وسیله‌ی هوا منتقل می‌شود و به آن دسته از غلظت‌هایی که در آن کارکنان ممکن است در معرض اثرات نامطلوب برای سلامتی و یا ایمنی خود قرار گیرند، اشاره می‌کنند. به دنبال آن سه نوع TLV وجود دارد:

الف) وزن زمانی میانگین<sup>۴</sup> (ATW)، میانگین غلظتی است که تقریباً تمام کارگران ممکن است در طول ساعات کاری تغییر شیفت بدون اثرات نامطلوب، شناخته شوند. با این حال، بسیاری از مواد به

---

<sup>۱</sup> Low explosion limit(LEL)

<sup>۲</sup>up explosion limit(UEL)

<sup>۳</sup> Threshold Limit values

<sup>۴</sup> Average time weight(ATW)

اندازه کافی سمی هستند و مواجه شدن با آنها در کوتاه مدت در غلظت بالا ممکن است بسیار مضر یا حتی مرگبار باشد.

ب) محدودیت قرار گرفتن در معرض کوتاه مدت یک غلظت، به طور متوسط با توجه به زمانی است که بیش از چند دقیقه طول نمی کشد. همچنین توصیه می شود که چنین شرایطی نباید چندین بار رخ دهد.

ج) سقف محدود<sup>۱</sup> (LC)، غلظتی است که نباید در هر زمانی در معرض آن قرار گرفت. این مربوط به سمی ترین مواد و یا کسانی است که اثر فوری را تحریک می کنند.

حسگرهای گازی تشخیص حضور گازهای مختلف در یک منطقه، معمولاً به عنوان بخشی از سیستم ایمنی می باشد. حسگرها با توجه به غلظت گاز قابل شناسایی، پاسخ الکتریکی متناسبی را ارائه می دهند. اگر غلظت بیش از حد آستانه باشد، دستگاه حاوی آن یک هشدار را برای کارکنان فراهم می کند یا ممکن است سایر اقدامات اصلاحی مانند افزایش تهویه، قطع برق و غیره را فعال کند. برای کنترل هوای مناسب و بخصوص گاز دی اکسید کربن برای تنفس کارگران در معدن، از حسگرهای گازی دی اکسید کربن استفاده می شود. حسگرهای کاتالیستی برای این کاربرد می تواند مورد استفاده قرار گیرد. اما به دلیل برخی از معایبی از جمله مسمومیت سنسور، ترک خوردگی حسگر و غیره، پیشنهاد می شود که فقط در مصارف خاص استفاده شود. اما حسگرهای الکتروشیمیایی برای اینگونه مصارف مناسب تر است. بزرگترین نقطه ضعف این حسگرها زمان پاسخ می باشد، استفاده ی آن ممکن است باعث برخی مشکلات شود. هرچند که در پیشرفت های اخیر در تکنولوژی این حسگرها، بسیاری از این کاستی ها برطرف شده است. حسگرهای گازی مادون قرمز گزینه ی مناسبی برای این کاربرد می باشد و با وجود گران بودن، مشخصاتی مانند، قابل اعتماد و آسان در نگهداری، این حسگر بسیار کارآمد می باشد. در جدول ۱-۳ انواع گازهای موجود در معادن زیر زمینی و محدودیت گازها و حسگرهای مناسب برای تشخیص هر گاز

---

<sup>1</sup> limit ceiling(LC)

آمده است.

جدول ۳-۱: فهرست گازها و محدودیت‌های خطرناک آن در معادن زیرزمینی [۳۵].

نوع گاز	محدودیت اشتعال در هوا (%)	خطرات	روش‌های تشخیص
اکسیژن		کمبود اکسیژن، ممکن است مخلوط انفجاری با گازهای واکنشی ایجاد کند.	الکتروشیمیایی
نیترژن		راکد	
متان	۵ تا ۱۵	انفجار	رسانایی حرارتی و نوری
کربن دی-اکسید		باعث افزایش میزان تنفس می‌شود.	نوری و مادون قرمز
منو اکسید کربن	۱۲/۵ تا ۷۴/۵	بسیار سمی و انفجاری	نیمه‌هادی، الکتروشیمیایی، مادون قرمز
دی‌اکسید گوگرد		بسیار سمی و تحریک کننده‌ی ریه و گلو	الکتروشیمیایی و مادون قرمز
اکسید نیتریک		به سرعت با NO <sub>2</sub> اکسیداسید می‌شود.	الکتروشیمیایی
اکسید نیترژن		مواد مخدر (گاز خنده‌آور)	الکتروشیمیایی
دی‌اکسید نیترژن		بسیار سمی، مضر و باعث عفونیت ریه می‌شود.	الکتروشیمیایی
سولفید هیدروژن	۴/۳ تا ۴۵/۵	انفجاری، بسیار سمی، سوزش چشم، اختلال دستگاه تنفسی	نیمه هادی و الکتروشیمیایی
هیدروژن	۴ تا ۷۴/۲	بسیار انفجاری	اکسیداسیون کاتالیستی

### ۳-۳- نظارت و کنترل بر محیط‌های جوشکاری در صنعت

فرآیند جوش در صنعت تولیدی به ویژه برای مونتاژ قطعات خودرو بسیار رایج می‌باشد. تقاضا برای وسایل نقلیه در کشورهای در حال توسعه، سیستم‌های مدیریت قطع<sup>۱</sup> را به سمت پیشروی اقتصادی پیش می‌برد. در اینجا باید میزان گازهای سمی و دیگر گازهای تولید شده در فرآیند جوش در SMIها را بررسی کرد و نظارت و کنترل مداوم روی این گازهای ناشی شده را انجام داد. نظارت به عنوان یک

<sup>۱</sup>Systeme Management Interrupt

راه‌حلی از روش ایمنی و بهداشت حرفه‌ای<sup>۱</sup> در فرآیند جوشکاری برای بهبود کیفیت محیط کار، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در کشورهای در حال توسعه به خصوص کشور مالزی، بخش تولیدی قطعات، یک بخش بزرگی از اقتصاد این کشور می‌باشد. آمار نشان می‌دهد که بخش تولیدی دارای پتانسیل بالایی در توسعه‌ی اقتصاد مالزی می‌باشد. در حال حاضر، SMIها تقریباً ۸۴ درصد از موسسات مالزی را تشکیل می‌دهند. اگر چه رشد صنایع کشور مالزی و همچنین گسترش آنها سریع می‌باشد، اما هنوز با چالش‌هایی مواجه هستند که بر رقابت آنها تاثیر می‌گذارد. از سناریو در ایمنی و بهداشت حرفه‌ای، صنایع با چالش‌هایی در مورد آگاهی از OSH در محل کار مواجه هستند [۳۶].

همان‌طور که فرآیندهای تولیدی محصولات و تجهیزات مرتبط با آن در حال توسعه است باید مراحل تشخیص و کنترل خطرات ناشی متناسب با آن توسعه یابد. در حالیکه، اطمینان از یک محیط کاری ایمن و سالم، آسان نیست و شرکت‌ها متوجه شده‌اند که یک محیط کاری سالم، رقابت و هزینه‌های منفی را بهبود می‌بخشد.

در محل کار جوش باید حداقل سطح قرار گرفتن در معرض خطرات ناشی با توجه به استانداردها باید نظارت و ارزیابی شود. فرآیند جوشکاری یکی از منابع آلودگی هوا است و باید گازهای سمی و دیگر گازی ناشی از آن را در محل کار شناسایی، ارزیابی و کنترل کرد.

افراد در سراسر جهان در معرض خطرات ایمنی و بهداشت حرفه‌ای روزانه هستند. در طول سال‌ها، جامعه‌ی جهانی بهداشت به شدت در تلاش‌اند که راه‌های محافظت از کارگران در کشورهای در حال توسعه را گسترش و توسعه دهند.

قرار گرفتن در معرض خطرات شغلی می‌تواند بر بدن انسان تاثیر بگذارد. اثرات جانبی از تغییرات

---

<sup>1</sup> Occupational safety and health(OSH)

فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بدون علائم است که در بعد بیماری‌های حاصل از آن تشخیص داده شده و در نهایت به مرگ ختم می‌شود. راه اصلی قرار گرفتن در معرض ذرات هوا، گازها و بخارات، استنشاق می‌باشد. به این ترتیب که این عوامل به سیستم تنفسی دسترسی پیدا می‌کنند و یا در سیستم گردش خون رسوب می‌کنند.

جوشکاری برای قرن‌های پیش بوده و یک روند صنعتی معمولی است. با استفاده از این روش‌ها و تکنیک‌های جدید، جوشکاری محدودیت‌های صنعتی خود را از دست داده است و اکنون می‌توان آن را عملاً در هر جایی انجام داد.

خطرات ناشی از جوش اثرات حاد و مزمن دارند که عبارتند از: گرد و غبار جوش، گازهای سمی و دیگر گازهای تولید شده، ذرات جامد و اشعه‌ها. ذرات جامد، ذراتی هستند که از مواد جوشکاری، فلزات پایه و هر پوشش روی فلز پایه تشکیل شده‌اند. گازهای سمی و دیگر گازهای ناشی از جوش شامل، اکسید نیتریک، دی اکسید نیتروژن، مونو اکسید کربن، دی اکسید کربن و ازن می‌باشد. فاکتورهایی مانند شیمیایی (گازهای سمی و دیگر گازها)، فیزیکی (تابش، اشتعال‌پذیری و واکنش‌پذیری) و بیولوژی (سم شناسی سرطان‌ها)، مشخصاتی هستند که از فرآیند جوش آشکار می‌شوند [۳۷].

هنگامی که کارگران در معرض این گازها قرار می‌گیرند، دچار آسیب‌های جدی در سلامتی آنها می‌شود.

هریک از این گازهای سمی و دیگر گازهای ناشی دارای غلظت خاصی است که بر سلامت کارگران تاثیر می‌گذارد و تاثیرات متفاوتی بر سلامتی دارد. سیستم‌های وجود دارند و یا می‌توان تولید کرد که می‌تواند این غلظت‌ها را شناسایی کند و همچنین می‌تواند به طور قابل توجهی خطرات ناشی از گازهای سمی و دیگر گازها را کاهش دهد. یک روش انجام این کار، نصب و نگهداری سیستم تشخیص گاز در نقطه‌ی ثابت است. و خواندن گاز از حسگرها از تمام نقاط منتقل می‌شود. یک برنامه کاربردی که از آنها استفاده می‌شود، نظارت بر انتشار گازها به عنوان بخشی از یک روند صنعتی است.

چندین گاز در جدول ۳-۲ و محدوده‌ی آسیب‌رسانی آن طبق گزارشات کشور آمریکا و مالزی آمده است.

جدول ۳-۲: اثرات نامطلوب بر روی سلامتی و محدودیت‌های مواجهه با گازها و بخارات [۳۷].

محدودیت قرار گرفتن در معرض (مالزی) (ppm)	محدودیت قرار گرفتن در معرض (USA) (ppm)	محدودیت قرار گرفتن در معرض (UK) (ppm)	اثرات نامطلوب احتمالی	منبع مشترک	مواد
-	-	-	آسفیکسیت‌ها	گازهای محافظ	آرگون و هلیوم
۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	آسفیکسیت‌ها	گازهای محافظ، احتراق سوخت	کربن دی-اکسید
۲۵(۸-TWA)	۵۰	۳۰(long) ۲۰۰(۱۵ دقیقه)	پیوستن اکسیژن به هموگلوبین را متوقف کنید.	احتراق جزئی از سوخت، تجزیه‌ی محصولات	منو اکسید کربن

یکی از این گازها که از فرآیند جوش به وجود می‌آید، گاز دی اکسید کربن است. که اهمیت تشخیص این گاز در بالا گفته شد. به دلیل اینکه مخلوطی از گازها وجود دارد، می‌توان از حسگر کاتالیستی و دیگر حسگرها استفاده کرد. سنسور کاتالیستی می‌تواند میزان غلظت دی اکسید کربن را در مخلوطی از گازها اندازه‌گیری کند. یک راه دیگر این است که، از حسگرهای جداگانه برای هر گاز استفاده کرد. از حسگر گازی مادون قرمز می‌توان برای تشخیص گاز دی اکسید کربن تولید شده از فرآیند جوش استفاده و میزان مشخص غلظت دی اکسید کربن را شناسایی کرد. و همچنین کنترل مناسبی روی این گاز بی‌رنگ و بی‌بو که باعث بیماری‌های ریوی و تنفسی می‌شود را داشت [۳۸].

متناسب با هر گاز می‌توان حسگر الکتروشیمیایی یا حسگر ایده‌آلی را طراحی کرد که بتواند نظارت مناسبی برای هر گاز داشت. منظور از ایده‌آل این است که، هر حسگر تخصیص داده شده به یک گاز، زمان پاسخ، گزینش‌گری و حساسیت بالایی به گاز مورد نظر را داشته باشد.

### ۳-۴- تشخیص آتش با استفاده از حسگرهای دود و گاز

سیستم‌های هشداردهنده‌ی آتش در منازل، ساختمان‌ها، هواپیما و غیره کاربرد دارد. کاربرد مورد نظر در این بخش استفاده از این سیستم‌ها در هواپیماهای مسافربری می‌باشد. دلایل استفاده از این سیستم و ویژگی‌های این سیستم، و کاربرد و اهمیت حسگر دی‌اکسید کربن در این سیستم توضیح داده می‌شود.

در حال حاضر، عمدتاً سیستم‌های تشخیص آتش در بخش‌های حمل و نقل هوایی، آشکارسازهای دود می‌باشند. آشکارسازهای دود موجود برای تشخیص آتش واقعی همیشه قابل اعتماد بوده است. اما مسائل ایمنی مرتبط با هشدارهای اشتباه وجود دارد. که متأسفانه، علت یک هشدار اشتباه معمولاً شناخته شده نیست. فرمان آن جوری تنظیم شده است که زنگ هشدار در عرض یک دقیقه پس از شروع آتش‌سوزی به صدا در می‌آید. ممکن است خلبان فقط حدود ۱۰ تا ۱۵ دقیقه وقت داشته باشد که هواپیما را قبل از آسیب دیدن به ساختار کنترل کند. کاهش زمان هشدار به خلبان اجازه می‌دهد که آتش را در اولین گام سرکوب کند و زمان بیشتری را برای فرود با خیال راحت داشته باشد [۳۹].

الگوریتم‌های تشخیص آتش پیشین از سنسورهای دما، دود و محصولات قابل احتراق استفاده می‌کردند. برخی از گونه‌های شیمیایی شامل اکسیژن ( $O_2$ )، منواکسید کربن ( $CO$ )، دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ )، بخار آب ( $H_2O$ )، سیانید هیدروژن ( $HCN$ )، اسیتیلن ( $C_2H_2$ ) و اکسید نیتریک ( $NO$ ) می‌باشند.



الگوریتم‌های هشدار ساده‌ی اولیه براساس آستانه برای حداکثر مقادیر افزایش نرخ و ترکیب آنها از حسگرهای مختلف است. الگوریتم‌های هشدار براساس مقادیر آستانه بسیار حساس به سیگنال‌های جبران شده می‌باشد و به اندازه‌گیری با دقت بالا و به کالیبراسیون دقیق و مکرر نیاز است. برای اصلاح برخی از این کمبودها، مقادیر آستانه که با شرایط در حال تغییر محیط سازگار می‌باشند، براساس مقیاس بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در یک بازه‌ی زمانی است. الگوریتم‌های هشدار آتش که از CO و دود استفاده می‌کنند [۴۰]، CO<sub>2</sub> و دود [۴۱]، کاهش‌ی در هشدارهای اشتباه و مزاحم و زمان پاسخ را نشان می‌دهد.

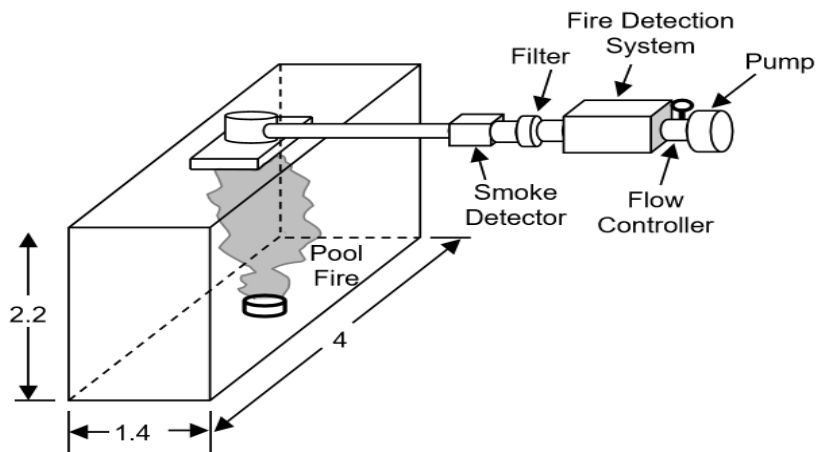
یک سیستم آتش دارای الگوریتم هشدار زنجیره‌ای چند معیاره و سیستم حسگر چند مولفه‌ای که دارای پتانسیل برای کاهش هشدارهای اشتباه تولید شده و توسط آشکارسازهای آتش منحصر به فرد برای کاهش زمان هشدار در حضور آتش می‌باشد. یک روش بالقوه برای کاهش زمان هشدار و همچنین کاهش هشدارهای اشتباه از آشکار ساز در مقاله‌ی [۴۲] شرح داده شده است. یک سیستم تشخیص آتش براساس تشخیص همزمان CO<sub>2</sub> و CO، غلظت دود می‌باشد. میزان افزایش این سه مولفه در الگوریتم زنگ هشدار آتش برای تعیین حضور آتش استفاده می‌شود. الگوریتم میزان افزایش سطح دود را کنترل می‌کند و هنگامی که این میزان از میزان آستانه فراتر رود، میزان افزایش غلظت CO و CO<sub>2</sub> بررسی می‌شود. هنگامی که هر دو میزان غلظت CO و CO<sub>2</sub> افزایش پیدا می‌کند و بیش از میزان آستانه می‌رود، هشدار آتش آغاز می‌شود. سیستم تشخیص آتش نشان داد که بهتر از یک آشکار ساز دود که به تنهایی کار می‌کند، انجام شود. در مواردی که آشکار ساز دود هشدار نداد، الگوریتم توانست آتش را شناسایی کند. با این حال در مواردی که آشکار ساز دود هشدار داد، الگوریتم آتش را در یک زمان بسیار کوتاه تشخیص داد. منابع مزاحم باعث هشدار اشتباه در سیستم تشخیص آتش نشد.

مزیت الگوریتم هشدار آتش این است که نسبت سیگنال به نویز برای مشتقات زمانی از اندازه-گیری‌های سریعتر با افزایش طول بازه‌ی زمانی، به نسبت سیگنال به نویز برای میانگین اصل داده در

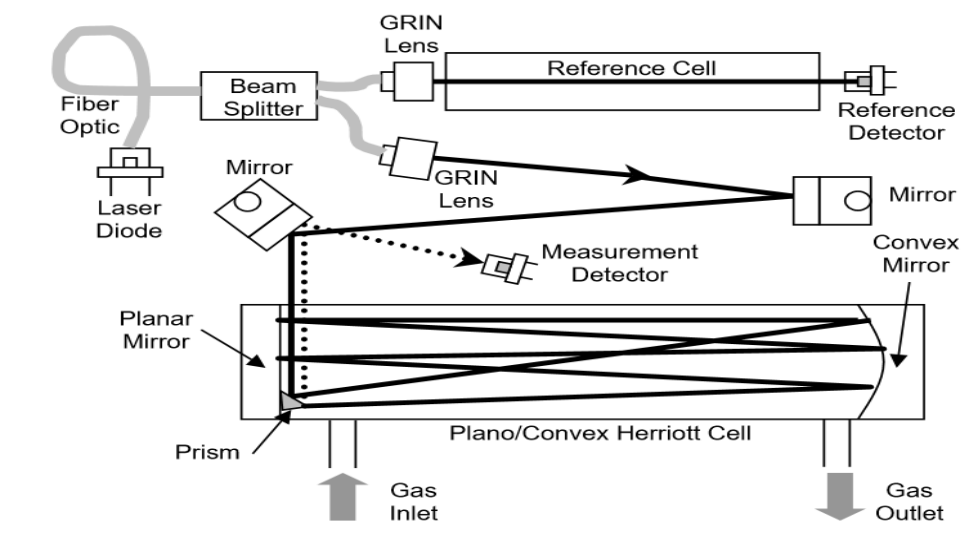
عرض بازه‌ی زمانی بهبود می‌یابد.

این اجازه می‌دهد تا آستانه‌ی زنگ هشدار باعث ایجاد حساسیت بیشتری در هشدارهای اشتباه، شود. مزیت دیگر این است که نقاط هشدار به فواصل ثابت در اندازه‌گیری غلظت گاز غیر حساس است. کارهایی که برای بهبود در عملکرد سیستم تشخیص آتش می‌توان انجام داد این است که حسگرهایی را به کار ببریم که بتواند میزان غلظت‌های  $CO_2$  و  $CO$  را جداگانه اندازه‌گیری کند. که می‌توان از حسگرهای گازی دی‌اکسید کربن استفاده کرد و میزان غلظت  $CO_2$  و همچنین گاز  $CO$  را جداگانه اندازه‌گیری کرد. این اندازه‌گیری‌های جداگانه باعث کاهش بیشتر در هشدارهای اشتباه و همچنین کاهش زمان هشدار می‌شود.

شکل ۳-۱، امکان تست آتش را نشان می‌دهد که اتاق آجری با ارتفاع  $2/2$  متری با ابعاد  $4 \times 1/4$  متر مربع است و تا زمانی که هر تست آتش تکمیل نشده باشد، آنالیز نمی‌شود. برای هر تست آتش، سیستم سنجش گاز، غلظت‌های  $CO_2$  و  $CO$  را فراهم می‌کند و سطح دود با یک آشکارساز تجاری گزارش می‌شود. تشخیص  $CO_2$  و  $CO$  با استفاده از طیف‌سنجی جذبی بر پایه دیود لیزر انجام می‌شود. و در [۴۰] به طور کامل توضیح داده شده است. که یک سیستم نوری در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: سیستم تشخیص آتش [۳۹].



شکل ۲-۳: سیستم نوری برای تشخیص آتش [۳۹].

### ۳-۵-کاربرد حسگر گازی دی اکسید کربن در علوم پزشکی [۴۳].

دی اکسید کربن یکی از مهم‌ترین مولکول‌ها به دلیل نقش بسیار آن، در بدن انسان می‌باشد. از آنجایی که تولید و حذف آن به طور ذاتی با حالت متابولیسم گردش خون و تهویه همراه است، با توانایی نظارت بر دی اکسید کربن، می‌توان به ارزیابی و درمان بیماران کمک کرد.

### ۳-۵-۱-فیزیولوژی پایه‌ای دی اکسید کربن [۴۴].

در دما و فشار طبیعی دی اکسید کربن یک گاز بی‌رنگ و بی‌بو می‌باشد. دی اکسید کربن در یک غلظت پایینی از هوا وجود دارد که اگر فشار جزئی صفر باشد، برطرف می‌شود. دی اکسید کربن دارای وزن مولکولی ۴۴ است و با آب واکنش می‌دهد تا یک اسید ضعیف را تشکیل دهد. و به راحتی از یک گونه‌ی موظف خورده و یونیزه می‌شود.

بزرگ‌سالان در زمان استراحت، به‌طور متوسط حدود  $2/5$  میلی گرم بر کیلوگرم در دقیقه دی اکسید کربن تولید می‌کنند. کلسترول دی اکسید کربن کل بدن از طریق تهویه‌ی حفره‌ای و با انتقال خون که در سه فرم اصلی رخ می‌دهد، به دست می‌آید. اکثریت (۶۰-۷۰) درصد به عنوان یون بی‌کربنات پس از تبدیل به سلول‌های خون قرمز با استفاده از آنزیدرکربن حمل می‌شود. (۲۰-۳۰) درصد دیگر دی اکسید کربن مقید به پروتئین‌های خون مانند ترکیبات کربامینی هستند که هموگلوبین پروتئین دارای بیشترین قابلیت اتصال دی اکسید کربن می‌باشد. باقی‌مانده دی اکسید کربن (۱۰-۵) درصد، در محلول فیزیکی در پلاسما حمل می‌شود و توسط فشار جزئی ( $P_{CO_2}$ ) منعکس می‌شود.

مکانیزم تحرک برای انتشار دی اکسید کربن در ریه، اختلاف فشار جزئی بین دی اکسید کربن در مویرگ ریوی و هوای حفره می‌باشد.

فشار جزئی دی اکسید کربن در خون شریانی ( $P_a CO_2$ )، باعث اندازه‌گیری عملکرد تهویه می‌شود. در حالت ناپایدار، تغییرات در  $P_a CO_2$  جلوتر از تغییرات در انبار  $CO_2$  کل بدن است. این به دلیل دوره‌ی

زمانی تعادل تعاملی می‌باشد. و با تغییر در تهویه، تغییرات سریعی در Pa CO<sub>2</sub> رخ می‌دهد.

### ۳-۵-۲- کاپنومتری و کاپنوگرافی [۴۵].

کاپنومتری، اندازه‌گیری غلظت دی اکسید کربن در طول مسیر جریان هوا استنشاقی و بازدم می‌باشد. کاپنوگرافی به نمایش گرافیکی این اندازه‌گیری در طول زمان اشاره دارد. اندازه‌گیری غلظت در انتهای بازدم Pet CO<sub>2</sub> نامیده می‌شود. این مقدار از لحاظ نظارتی بسیار مهم می‌باشد. و جنبه‌های دیگری چون التهاب و انجماد دی اکسید کربن وجود دارد.

اندازه‌گیری دی اکسید کربن در گازهای تنفسی می‌تواند به چهار روش انجام شود. که یک روش به طور مختصر توضیح داده می‌شود. این روش‌ها شامل طیف‌سنجی مادون قرمز، طیف‌سنجی جرمی، طیف‌سنجی رامان و اخیراً یک روش رنگ‌سنجی با استفاده از اوراق فیلتر شده شیمیایی می‌باشد. طیف-سنجی رامان و جرمی برای تجزیه و تحلیل دی اکسید کربن در خارج از بیمارستان استفاده نمی‌شود.

بیشتر واحدهای کاپنومتری یا کاپنوگرافی مستقل از تکنولوژی مادون قرمز است. همان‌طور که در فصل قبل گفته شد، دی اکسید کربن تابش مادون قرمز را در طول موج ۴/۲۶ میکرومتر به صورت قوی جذب می‌کند. هنگامی که نور مادون قرمز فیلتر شده در این طول موج خاص از یک نمونه گاز حاوی دی اکسید کربن عبور می‌کند و همزمان هم یک نور مادون قرمز از یک منبع بدون گاز دی اکسید کربن عبور می‌کند، غلظت گاز در نمونه مورد نظر قابل تعیین است. سپس تفاوت در تابش مادون قرمز بین نمونه و محفظه‌ی مرجع را مقایسه و پردازش می‌کند. سیگنال نشان دهنده‌ی غلظت دی اکسید کربن می‌تواند در حالت‌های مختلف نمایش داده شود. سپس میزان تنفس می‌تواند با اندازه‌گیری در زمان‌های مختلف بین مقادیر پیک‌های متوالی محاسبه شود. در حال حاضر، چندین دستگاه کاپنومتری مادون قرمز در دسترس هستند که به صورت کیفی و نیمه مقیاس و کمی Pet CO<sub>2</sub> را اندازه‌گیری می‌کنند.

یک روش نسبتاً جدید به صورت کیفی و نیمه مقیاس، رنگ‌سنجی دی اکسید کربن با استفاده از ورق‌های فیلتر شیمیایی را آشکارسازی می‌کنند. شاخص فیلتر کاغذی حساس به pH متاکرزوا بنفش (سولفوناتالین) است. هنگامی که کاغذ در معرض دی اکسید کربن قرار می‌گیرد، یون‌های هیدروژن تشکیل می‌شوند و باعث ایجاد تغییرات رنگی مختلفی براساس غلظت دی اکسید کربن می‌شوند.

نظارت دی اکسید کربن در انتهای بازدم می‌تواند پزشک اورژانس را با یک ابزار ارزشمند برای ارزیابی فیزیولوژیک بیماران در تنظیمات مختلف ارائه دهد. با توجه به فیزیولوژی تولید و دفع دی اکسید کربن، نظارت Pet CO<sub>2</sub> می‌تواند اطلاعات مربوط به حالت تهویه، گردش خون و متابولیسم را فراهم می‌کند.

### ۳-۶- کاربرد های حسگر گازی دی اکسید کربن در صنایع غذایی و دام‌پروری

تعیین غلظت دی اکسید کربن در صنعت غذایی در مواردی چون مرغ‌داری‌ها، گلخانه‌ها، و بسته‌بندی مواد غذایی و غیره از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. تعیین غلظت و نظارت بر این گاز در مرغ‌داری‌ها، باعث رشد مرغ‌ها با کیفیت مناسب برای تولیدکنندگان می‌شود. همچنین، در گلخانه‌ها با کنترل این گاز کمک شایان در رشد گیاهان می‌شود. وجود این گاز در بسته‌بندی مواد غذایی نشان فاسد شدن آن بسته غذایی دارد. بنابراین، تعیین غلظت گاز دی اکسید کربن در بسته‌بندی مواد غذایی بسیار ارزشمند می‌باشد.

### ۳-۶-۱- استفاده از حسگر گازی دی اکسید کربن در سوله‌های پرورش مرغ (مرغ‌داری‌ها)

افزایش در هزینه‌های ورودی تولید نوآوری در صنعت طیور، در سراسر جهان است. ادغام تکنیک-

های دقیق تدارکات دامداری در زنجیره‌ی تامین صنعت طیور به تولیدکنندگان کمک می‌کند تا سیستم‌های مدیریتی را بهینه سازند. پارامترهای محیطی مهم که مربوط به تولید مرغ هستند شامل درجه حرارت هوا، رطوبت نسبی، نور و سرعت و کیفیت هوا می‌باشند. ساختمان مرغداری‌ها به منظور کاهش تلفات گرما و بهبود در بهره‌وری انرژی، اما با کاهش تهویه برای جلوگیری از تلفات انرژی گرمایی طراحی و ساخته شده‌اند. این می‌تواند منجر به افزایش آمونیاک، دی‌اکسید کربن، رطوبت و گرد و غبار شود. تعدادی از محققان اشاره کردند که مشکلات کیفیت هوا در مرغداری‌ها در نتیجه‌ی میزان تهویه‌ی کم است [۴۶].

دو منبع اصلی تولید دی‌اکسید کربن در مرغداری‌ها یکی بخارهای گاز و دیگری از خود پرندگان است. در ابتدا دی‌اکسید کربن توسط سیستم‌های گرمایشی تولید می‌شود و در بعد هم به دلیل اینکه پرندگان به پایان دوره‌ی رشد خود می‌رسند، دی‌اکسید کربن نسبتاً زیادی تولید می‌شود.

سطح بالایی از رطوبت نسبی، شرایط رشد میکروب در بستر مرغ را هموار می‌سازد و این جمعیت میکروبی که افزایش پیدا می‌کند، باعث به‌وجود آمدن آلاینده آمونیاک می‌شود. <sup>۱</sup> فایرچید<sup>۱</sup> و <sup>۲</sup> کزاریچ<sup>۲</sup> [۴۷]، اثرات تغییرات دمایی، رطوبت نسبی، آمونیاک و دی‌اکسید کربن را در یک دوره‌ی کوتاه بررسی کردند. در حالی که رطوبت نسبی کمتر از ۶۰ درصد باشد، بیشترین مقدار آمونیاک و دی‌اکسید کربن توصیه شده قابل قبول می‌باشد. اما در رطوبت نسبی بالاتر از ۷۰ درصد دی‌اکسید کربن و آمونیاک به سمت سطحی از مضر بودن صعود می‌کنند. همچنین این دو محقق نشان داده‌اند که سطح بالایی از دی‌اکسید کربن منجر به کاهش وزن در جوجه‌ها می‌شود.

<sup>۳</sup> ژین<sup>۳</sup> و همکاران [۴۸]، معتقدند که در مرغداری‌ها برای حداقل میزان تهویه باید حداقل غلظت

---

<sup>۱</sup> Firecracker

<sup>۲</sup> kzarych

<sup>۳</sup> Jean

ممکن دی اکسید کربن و آمونیاک به عنوان مخالف رطوبت بیشتر باشد. تهویه به عنوان یک کنترل دما و کاهش دهنده‌ی آمونیاک، سطح دی اکسید کربن در یک مرغداری را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد.

در طول تحقیقات بنت<sup>۱</sup> [۴۹]، بر روی نظارت بر تهویه در تابستان در مرغداری در وینیپگ کانادا، یک رابطه‌ی خطی قوی بین سطوح دی اکسید کربن و استانداردهای دمایی در مرغداری‌ها یافت شد. مشخص شد که سطوح بالاتر دی اکسید کربن مربوط به نقاطی است که در مسیرهای مستقیم هوای تازه نمی‌باشند.

به طور کلی، دی اکسید کربن در تاسیسات تجاری به سطوح خطرناکی از غلظت آن نمی‌رسند. مگر اینکه توسط سیستم‌های گرمایشی، بیش از حد دی اکسید کربن تولید شود و سیستم تهویه در سطح بسیار پایینی عمل کند. اندازه‌گیری سطح دی اکسید کربن می‌تواند نشانه‌ی خوبی از موفقیت سیستم تهویه در مرغداری باشد. دی اکسید کربن می‌تواند مانند انسان موجب خواب‌آلودگی و سردرگمی در پرندگان شود. و اگر سطح آن بالا باشد می‌تواند بر الگوی تغذیه‌ی آنها تاثیر بگذارد. و این موضوع باعث کاهش در وزن پرندگان می‌شود که برای تولید کنندگان ایده‌آل نیست [۵۰].

با نصب یک حسگر گازی دی اکسید کربن در نقطه‌ی مناسب در مرغداری‌ها می‌توان به طور مداومی میزان غلظت‌های دی اکسید کربن را اندازه‌گیری کرد و کنترل و نظارت خوبی بر سطوح غلظت دی اکسید کربن داشت. در مواقعی که میزان این گاز رو به افزایش می‌باشد، سیستم‌های تهویه را روشن کند تا به شرایط مناسب برای پرورش پرندگان ایجاد شود.

### ۳-۶-۲- حسگرهای دی اکسید کربن برای کاربردهای بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی [۵۱].

اخیراً، تقاضای کیفیت بالا و سالم بودن مواد غذایی برای مصرف کنندگان، منجر به توسعه‌ی رویکردهای نوآورانه و جدید در تکنولوژی بسته‌بندی مواد غذایی شده است. بسته‌بندی هوشمند ما را

---

<sup>۱</sup> Bennett



قادر به نظارت و انتقال اطلاعات در مورد کیفیت مواد غذایی می‌سازد.

به طور کلی، وقوع سطح بالایی از گاز دی‌اکسید کربن، نشان دهنده‌ی غذاهای فاسد در غذاهای بسته‌بندی شده است و نگهداری آن در سطوح بهینه برای جلوگیری از فساد در مواد غذایی که تحت شرایط بسته‌بندی جوی<sup>۱</sup> بسته‌بندی می‌شوند، ضروری می‌باشد. از این رو، یک حسگر دی‌اکسید کربن مناسب که در بسته‌بندی مواد غذایی قرار دارد، می‌تواند به طور موثری کیفیت محصول را تا زمانی که به مصرف کنندگان منتقل می‌شود، کنترل کند.

اگرچه پیشرفت‌های زیادی در توسعه‌ی حسگرهای کنترل دی‌اکسید کربن انجام شده است، اما اکثر آنها برای کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی چند منظوره یا متنوع نیستند و محدودیت‌هایی مانند هزینه‌ی بالای تجهیزات، کمبود و نیاز به انرژی و از جمله نگرانی‌های ایمنی را متحمل می‌شوند. بنابراین، توسعه حسگرهای دی‌اکسید کربن کارآمد که می‌توانند هوشمندانه کنترل غلظت گاز را در داخل بسته‌بندی مواد غذایی تغییر دهد، ضروری می‌باشد.

به منظور کاهش میزان رشد میکروبی و فساد بعدی، محصولات غذایی اغلب تحت شرایط بسته‌بندی تغییر جوی (MAP) بسته‌بندی می‌شوند. گاز دی‌اکسید کربن می‌تواند به تنهایی یا در ترکیب‌های مختلف با گازهای دیگر مانند نیتروژن و اکسیژن استفاده شود. برای ایجاد فضایی محافظ اطراف مواد غذایی در داخل بسته‌بندی، مقدار اکسیژن را حذف و یا به حداقل می‌رسانند، در نتیجه، عمر مفید مواد غذایی را می‌توان از طریق مهار میکروب‌های فاسد هوازی تعمیم داد.

دی‌اکسید کربن به عنوان یک گاز بسته‌بندی فعال در نظر گرفته می‌شود. زیرا سطح بالای آن باعث کاهش میزان متابولیسم میکروب‌ها حتی در حضور اکسیژن می‌شود. کیفیت مواد غذایی در بسته‌بندی MAP به بی‌عیبی یا درستی بسته بستگی دارد. و بنابراین تشخیص نشت، بخش مهمی از تکنولوژی MAP می‌باشد. در بسته‌بندی مواد غذایی MAP، طراوت و ایمنی غذا می‌تواند با تعیین غلظت

---

<sup>1</sup> Materials under atmospheric packaging(MAP)

دی اکسید کربن محاسبه شود. کاهش غلظت اصلی آن می‌تواند نشانه‌ای از نشت در یک بسته باشد. به‌طور معمول، برای تجزیه و تحلیل گاز با طیف‌سنجی جذبی مادون قرمز برای اندازه‌گیری محتوای دی اکسید کربن برای اطمینان از صحت بسته‌بندی انجام می‌شود. در شرایط بسته‌بندی محیط طبیعی، زمانی که غذا در ظرف بسته‌بندی شروع به خراب شدن می‌کند، چندین ضایعه شکل می‌گیرد و درون آن انباشته می‌شود. بنابراین به لحاظ نظری، می‌توان با شناسایی یک یا چند از این ضایعات فساد را شناسایی کرد.

تولید گرما، اسیدیته، فشار و دی اکسید کربن به عنوان ضایعات غذایی در مواد غذایی دیده می‌شوند. در حالت ایده‌آل، تشخیص فساد باید با همان تعداد زیادی از محصولات غذایی مختلف و بدون نیاز به آشکارسازهای مختلف برای هر نوع مواد غذایی ممکن باشد. مقدار کوچکی از حرارت استخراج شده در طول فرآیند فساد شدگی که احتمالاً تشخیص حرارت عملی نیست. و همچنین pH برای غذاهای مختلف به طور گسترده‌ای متفاوت است و غیر عملی می‌باشد. و همچنین تعیین فشار غیر عملی است. در شرایط غیر MAP، میکروبی‌های هوازی و فیزیکی بی‌هوازی در طول ذخیره‌سازی محصولات غذایی رشد می‌کنند. با این حال، دی اکسید کربن به طور کلی شناخته شده است و در طول هر نوع از رشد باکتری در غذاها تولید می‌شود. بنابراین، برای نشان دادن میزان فساد مواد غذایی، به سادگی تشخیص میزان دی اکسید کربن، راه ایده‌آلی است. و چنین آشکارسازهایی باید بدون دخالت خواص دیگر مواد غذایی مانند pH، خوردگی، فشار یا خلا و غیره عمل کنند. همبستگی بین غلظت دی اکسید کربن و رشد میکروارگانیسم‌ها در سوپ نخود یا گوجه فرنگی بسته شده است که به صورت خاص در هوا یا مخلوطی از ۵ درصد اکسیژن و نیتروژن بسته‌بندی می‌شود. رنگ بریتمول آبی، حساس به pH به عنوان شاخصی برای تشخیص دی اکسید کربن استفاده می‌شود.

حسگرهای دی اکسید کربن پتانسیومتری الکتروشیمیایی با استفاده از الکترولیت‌های جامد یکی از روش‌های امیدوارکننده به دلیل ساختار جمع و جور، توانایی نظارت مداوم، گزینش‌گری بالا و کم

هزینه بودن آن، به شمار می‌آیند. با این حال، آنها نیاز به قدرت برای تولید سیگنال دارند و اغلب نیاز به بیش از ۴۰۰ درجه سانتیگراد دمای کار دارند و بنابراین برای کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی مناسب نیستند. عوامل محیطی از قبیل دما و رطوبت می‌توانند عملکرد سنسورها، به ویژه در مورد حسگرهای اکسید فلزی، با واکنش حساسیت متقابل را تحت تاثیر قرار دهند.

### حسگرهای نوری دی اکسید کربن نوآورانه :

حسگرهای نوری مشخص کننده ترکیب‌های گازی برای محققان جذاب بوده است. به همین دلیل در یک بسته‌ی MAP توسعه داده شده و بسیاری از گازها در این بسته مورد تحقیق قرار گرفته است. حسگرهای نوری می‌توانند به دو نوع تقسیم‌بندی شوند. سنسورهایی که براساس تغییر رنگ شاخص pH مانند تیمول آبی، فنل قرمز، قرمز کریول و غیره و آنهایی که براساس تغییر فلورسانس ناشی از دی اکسید کربن از یک رنگ لومینت مانند مجموعه‌های روتنیم می‌باشند.

همه‌ی حسگرهای مرطوب براساس اصول الکتروود دی اکسید کربن عمل می‌کنند. و بنابراین، انتشار دی اکسید کربن از محیط آزمایشگاهی (گاز یا آب) از طریق یک غشا نفوذی گازی نازک (حدود ۱۰ میلی متر) و ایجاد سریع تعادل با لایه‌ی آبی به دام افتاده شده که حاوی pH حساس به رنگ است، که معمولاً در یک حسگر معمولی مرطوب برای دی اکسید کربن تولید می‌شود. فرآیند تشخیص شامل مخلوط کردن گاز با یک معرف رنگ شیمیایی است که منجر به تغییر انتقال رنگ مواد شیمیایی می‌شود. این تغییر را می‌توان اندازه‌گیری و با یک استاندارد مقایسه کرد. یک شاخص برگشت پذیر دی اکسید کربن حاوی ۵ نوار نشانگر برای استفاده در بسته‌های اصلاح شده با فضای اطراف آن ساخته شده است. این نوارها با مواد شاخص حساس به دی اکسید کربن پوشش داده می‌شوند. هر نوار به گونه‌ای طراحی شده است که رنگ آنها را در زمانی که سطح دی اکسید کربن زیر یک حد معینی می‌رسد، تغییر می‌دهد. شاخص pH از طریق تغییر رنگ قابل مشاهده به دی اکسید کربن به عنوان یک متابولیت فساد

پاسخ می‌دهد و تغییر به خوبی با روند رشد میکروبی در این نمونه‌ها مرتبط است.

اکثر شاخص‌های نوری رنگ‌سنجی دی‌اکسید کربن براساس سیستم‌های حلال با استفاده از یک عامل انتقال فاز برای حلال کردن رنگ هستند. با این حال، پایداری عمر مفید ناچیز این سیستم‌ها زمانی است که در شرایط تاریک و یا محیطی ذخیره می‌شود. جالب توجه است که شاخص‌های دی‌اکسید کربن مبتنی بر آب، نسبت به همتایان مبتنی بر حلال آنها، عمر مفید بیشتری را نشان می‌دهند.

### ۳-۶-۳- کاربرد حسگر گازی دی‌اکسید کربن در شبکه‌های سنسور بی‌سیم برای نظارت در

#### گلخانه‌ها

در گلخانه‌های مدرن، چندین نقطه برای اندازه‌گیری و برای تعیین پارامترهای آب و هوایی موضعی در بخش‌های مختلف گلخانه‌ای مورد نیاز است تا سیستم اتوماسیون گلخانه‌ای به درستی کار کند. کابل کشی می‌تواند سیستم اندازه‌گیری گران و آسیب‌پذیری باشد. علاوه بر این، پس از نصب، نقاط اندازه‌گیری سخت‌افزاری دشوار است. بنابراین، یک شبکه‌ی حسگر بی‌سیم<sup>۱</sup> که شامل گره‌های حسگری بی‌سیم مجهز به رادیو و یک یا چند حسگر است، یک گزینه‌ی جذاب و ارزان قیمت برای ساخت سیستم اندازه‌گیری مورد نیاز است.

مهم‌ترین عواملی که برای کیفیت و بهره‌وری رشد گیاه مورد نیاز است، عبارتند از: دما، رطوبت، نور و سطح دی‌اکسید کربن. نظارت مداوم این متغیرهای محیطی، اطلاعاتی را برای رشد گیاه به دست می‌دهد تا بهتر بتوان درک کرد که چگونه هر عامل بر رشد و چگونگی مدیریت حداکثر محصول تاثیر می‌گذارد. تنظیم بهینه‌ی آب و هوایی گلخانه‌ای می‌تواند ما را قادر به بهبود بهره‌وری و دستیابی به صرف‌جویی در انرژی قابل توجه، به خصوص در فصل زمستان در کشورهای شمالی کند. در گلخانه‌های

---

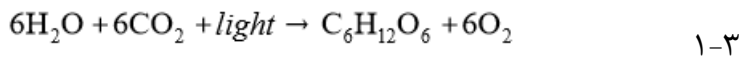
<sup>1</sup> Wireless Sensor Network (WSN)

نسل گذشته، یک نقطه‌ی دقیق در وسط برای ارائه‌ی اطلاعات به سیستم گلخانه‌ای کافی بود. سیستم‌های آن معمولاً ساده بود و بدون دست‌یافتی به کنترل حرارت موضعی، نور، تهویه و دیگر فعالیت‌هایی که بر محیط زیست تاثیر می‌گذارد، بود. اما در گلخانه‌های مدرن سیستم‌ها تغییرات بسیاری داشته‌اند. اندازه‌ی معمولی گلخانه بسیار بزرگ‌تر از قبل است و امکانات گلخانه‌ای، چندین گزینه را برای تنظیم نور موضعی، تهویه، گرمایش و دیگر سیستم‌های حمایت از گلخانه را ارائه می‌دهد. با این حال، داده‌های اندازه‌گیری بیشتری لازم است تا این سیستم اتوماسیون به درستی کار کند. افزایش تعداد نقاط اندازه‌گیری، به طور چشمگیری هزینه‌ی سیستم اتوماسیون را افزایش می‌دهد. همچنین، باید بتوان به راحتی محل نقاط اندازه‌گیری را با توجه به نیازهای خاصی که به گیاهان خاص بستگی دارد، بر تغییرات احتمالی هوای خارجی یا ساختار گلخانه‌ای و محل قرارگیری گیاه در گلخانه، تغییر داد [۵۲].

شبکه‌ی حسگری بی‌سیم (WSN) می‌تواند یک بخش مفیدی از معماری سیستم اتوماسیون در گلخانه‌های مدرن باشد. ارتباطات بی‌سیم می‌تواند برای جمع‌آوری اندازه‌گیری‌ها و برقراری ارتباط بین کنترل متمرکز و محرک‌های موجود در قسمت‌های مختلف گلخانه استفاده شود. در راه‌حل‌های پیشرفته WSN، برخی از بخش‌های سیستم کنترل خود را نیز می‌توان به صورت توزیع شده به شبکه اجرا کرد تا بتوان حلقه‌های کنترل موضعی را تشکیل داد. نصب سیستم WSN در مقایسه با سیستم‌های چند منظوره سریع، آسان و ارزان می‌باشد. علاوه بر این، هنگامی که نیاز به حرکت گره‌های حسگری از یک مکان به مکان دیگر در یک محدوده‌ی ارتباطی دستگاه مختصات استفاده می‌شود و می‌توان از اندازه‌گیری حرکت کرد.

بهره‌وری گلخانه بستگی به عوامل مختلفی دارد. بسیاری از پروژه‌های تحقیقاتی به این عوامل و وابستگی متقابل آنها متمرکز هستند. کشاور می‌تواند مقادیر مرجعی را به برخی از متغیرهای محیطی تنظیم کند و سپس سیستم اتوماسیون گلخانه‌ای هدف قرار دادن متغیرها در این مقادیر است. دی اکسید کربن یک گاز طبیعی است و همان‌طور که در فصل یک گفته شد برای انسان‌ها در غلظت‌های

بالا خطرناک می‌باشد، اما حیاتی برای درختان و گیاهان است. هوا شامل نیتروژن، اکسیژن و دی‌اکسید کربن است. در فرآیند فوتوسنتز گیاهان، دی‌اکسید کربن، آب و نور را به گلوکز و اکسیژن تبدیل می‌کنند. براساس:



بنابراین، دی‌اکسید کربن یک متغیر مهم گلخانه‌ای است که باعث افزایش رشد گیاهان می‌شود. آفتاب و نور باعث افزایش مقدار دی‌اکسید کربن می‌شوند. در تابستان، گلخانه‌ای که نیاز به گاز طبیعی از هوا دارد، هنگامی که تهویه و پنجره‌های سقف باز می‌شود، تولید کننده می‌تواند از دی‌اکسید کربن اضافی خالص استفاده کند و یا می‌تواند دی‌اکسید کربن را با ابزار تولید دی‌اکسید کربن تولید کند. بعضی از سیستم‌های گرمایشی گلخانه‌ای، انتشارهای دی‌اکسید کربن را به درون گلخانه منتقل کنند و مزایای دوگانه را برای تولید کننده ایجاد کنند. استفاده از دی‌اکسید کربن خارجی همچنین راهی برای دی‌اکسید کربن جمع‌آوری شده از برخی فرآیندهای صنعتی به منظور رشد کردن توده‌ای در گلخانه به جای انتشار آن به اتمسفر است. دمای مطلوب گلخانه‌ای بستگی به سطح مورد نیاز فعالیهای فوتوسنتز دارد.

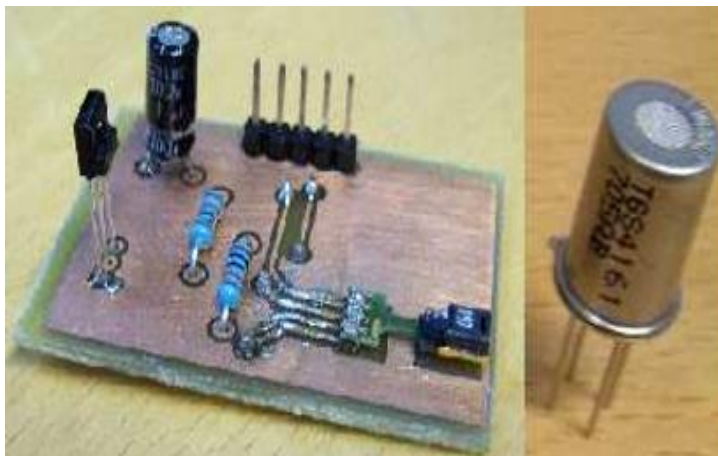
نظارت و کنترل گلخانه‌ها را می‌توان به سه وظیفه‌ی اصلی تقسیم کرد. اندازه‌گیری، محاسبه و تنظیم، که این سه وظیفه دارای ویژگی‌های خاص خود هستند.

مقادیر اندازه‌گیری متغیرهای آب و هوایی گلخانه‌ای ابتدا از آنالوگ به دیجیتال تبدیل شده و سپس به کامپیوتر منتقل می‌شود که معمولاً به دلیل رطوبت بالا، کامپیوتر را در خارج از گلخانه می‌باشد. سینگال ارائه شده توسط حسگرها معمولاً ضعیف هستند. بدون تقویت سینگال، دستگاه حسگر به درستی قادر به انتقال داده‌ها نیست.

زمان پاسخ سریع، مصرف کم انرژی و استحکام در برابر رطوبت هوا، رطوبت نسبی SHT75 ایجاد

شده و سنسور دما، یک راه حل کامل برای محیط گلخانه می باشد. حسگرهایی را برای تابش اشعه، دما و رطوبت را می توان تولید کرد و در شبکه ی بی سیم حسگری استفاده کرد. که می توان این حسگرها را به چهار گره وصل کنیم.

اما حسگر دی اکسید کربن که یک نیاز از این شبکه است را به گره وصل نکردیم چون تنظیمات خاصی را برای ولتاژ ورودی و زمان پاسخ مشخص می کند. حسگر دی اکسید کربن فیگارو<sup>۱</sup> [۵۳]، (شکل ۳-۳) جایگزین خوبی می باشد. چون بیشترین سازگار با گره حسگر ولتاژ پایین دارد. اندازه گیری دی اکسید کربن از زمان های اندازه گیری های دیگر بیشتر طول می کشد و مقدار ولتاژ حسگر دی اکسید کربن باید حدود  $0,1 \pm 0,5$  ولت باشد. و مقدار دی اکسید کربن را می توان از ولتاژ خروجی خواند.



شکل ۳-۳: حسگر دی اکسید کربن فیگارو [۵۳].

---

<sup>۱</sup> Figaro

### ۳-۷- کاربردهای نظارتی برای ساختمان‌ها

با شمار زیادی از اجزای سازنده در ساختمان‌های تجاری بزرگ، برای کارکنان بسیار دشوار است که از شرایط کامل تجهیزات و شرایط سیستم‌ها آگاه باشند. بدون نظارت خودکار و شناسایی خطاها، سنسورها و کنترل‌هایی که بر آن تکیه می‌کنند، عملکرد می‌تواند کاهش یابد. شرایط مطلوب و مناسب برای ساختمان‌های امروزی، جلوگیری از اتلاف انرژی، کنترل اشعه‌های مضر به درون ساختمان و ایجاد یک هوا با کیفیت مناسب می‌باشد. که برای ایجاد یک هوا با کیفیت بالا به تهویه‌های مناسب مربوط می‌شود. یکی از شاخص‌های کیفیت هوا، وجود گاز دی‌اکسید کربن در ساختمان‌ها می‌باشد [۵۴].

همچنین روش‌های کنترل هوا و دیگر شاخص‌های تحت کنترل در ساختمان‌ها باید به صورت بهینه انجام شود. روش‌های کنترل بهینه در سیستم و سطح کل ساخت و ساز مورد نیاز، برای رسیدن به سطح عملکردی که شرایط محیطی با کیفیت بالا در استفاده از انرژی خالص، ارائه می‌شود [۵۵].

برای تعیین عملکرد مطلوب تجهیزات تهویه مطبوع، از حسگرهای محیط زیستی که بیشترین میزان را برای اندازه‌گیری دما، رطوبت نسبی<sup>۱</sup> (RH)، منو اکسید کربن و دی اکسید کربن دارند، استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری دما، هر دو روش مکانیکی (به عنوان مثال، سیم پیچ فلزی گسترش گرما) و وسایل الکتریکی (مثلاً: ترمیستورها، RTDهای فلزی، ترموکوپل‌ها، ترموکوپل‌های مادون قرمز و اتصالات دیجیتال (p-n) دقت کافی را برای نیازهای فعلی را دارند و همچنین نسبتاً قابل اطمینان می‌باشند [۵۶].

شایع‌ترین حسگرهای RH در سیستم‌های گرمایش، تهویه و شرایط هوایی<sup>۲</sup>، تولید خروجی است که متناسب با ظرفیت یا یک مقاومت یک ماده‌ی هیدروکسیدی می‌باشد. با این حال، این حسگرها اغلب

---

<sup>۱</sup> Relative Humidity

<sup>۲</sup> Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC)



به دلیل انحراف قابل توجهی که پس از کالیبراسیون اتفاق می‌افتد، مورد سوال قرار می‌گیرند [۵۷].

تهویه مطبوع کنترل شده با استفاده از سنجش دی اکسید کربن، ترکیبی از دو تکنولوژی است. حسگرهای دی اکسید کربن که سطح دی اکسید کربن را در یک فضای مشروط در داخل ساختمان کنترل می‌کنند و سیستم‌های حمل و نقل هوایی که از داده‌های حسگرها برای تنظیم تهویه استفاده می‌کنند.

حسگرهایی که برای کنترل میزان دی اکسید کربن در کاربردهای محدود برای تهویه مطبوع مورد استفاده قرار می‌گیرند، حسگرهای گازی مادون قرمز غیر پراکنده (NDIR) می‌باشند. که مکانیزم سنجش این حسگر در فصل ۲ و ۴ توضیح داده شده است. در حال حاضر، این حسگرها گران‌تر از حسگرهای دیگر مورد استفاده برای ایجاد برنامه‌های کاربردی هستند. اما این حسگرها قابل اعتماد، دارای حساسیت بالا، زمان پاسخ بالا می‌باشند. دیگر گاز مهم در سیستم کنترل تهویه، گاز منو اکسیدکربن است که با حسگر ایده‌آل این گاز آن را کنترل و نظارت می‌کنند.

تعیین غلظت دی اکسید کربن برای برنامه‌های دیگر از جمله کنترل غلظت دی اکسید کربن در صنایع غذایی (پرورش قارچ)، سفینه‌های فضایی، صنعت نفت، گاز خروجی از آگزوز اتومبیل‌ها، کارخانه‌های تولیدی و غیره بسیار مفید و سودمند می‌باشد.

بنابراین، تعیین غلظت دی اکسید کربن در مصارف‌های زیادی بسیار مهم می‌باشد، پس کنترل و نظارت بر آن بسیار ضروری است. در نتیجه، سیستم‌های از جمله حسگرهای گازی دی اکسید کربن (نوری و الکتروشیمیایی) که می‌توانند نظارت و کنترل مداومی بر این گاز داشته باشند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.



## فصل چهارم

ساخت حسگر اپتیکی مادون قرمز گاز CO<sub>2</sub> و بررسی

نتایج حسگری آن

#### ۴-۱- مقدمه

گازها نیز می‌توانند شبیه جامدات، مطابق با قوانین تابش، تابش را گسیل، عبور و جذب کنند. طیف جذبی و نشری غیر پیوسته است، اما به باندهای حاوی بسیاری از خطوط تک طیفی که به واسطه‌ی تعریف تغییرات عدد کوانتومی مشخص در مولکول گازی ناشی می‌شود، توزیع شده است.

با فرض اینکه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی وجود نداشته باشند، سه نوع گذار کوانتومی

رخ می‌دهد:

- ۱- گذارهای چرخشی
- ۲- گذارهای ارتعاشی
- ۳- گذارهای انتقالی

برای یک مولکول معمولی، تغییر انرژی داخلی  $\Delta E$  مربوط به گذارهای انتقالی بسیار بزرگتر از تغییر انرژی داخلی مربوط به گذارهای ارتعاشی و تغییر انرژی داخلی گذارهای ارتعاشی بسیار بزرگتر از تغییر انرژی داخلی مربوط به گذارهای چرخشی می‌باشد. یا:

$$\Delta E_{\text{انتقالی}} \gg \Delta E_{\text{ارتعاشی}} \gg \Delta E_{\text{چرخشی}}$$

بنابراین، تغییرات در اعداد کوانتومی خاص باعث رخ دادن هر یک از این گذارها در مولکول می‌شود.

محدوده‌ی طول موجی باندها در گذارهای مختلف به این صورت می‌باشند که: باندهای چرخشی

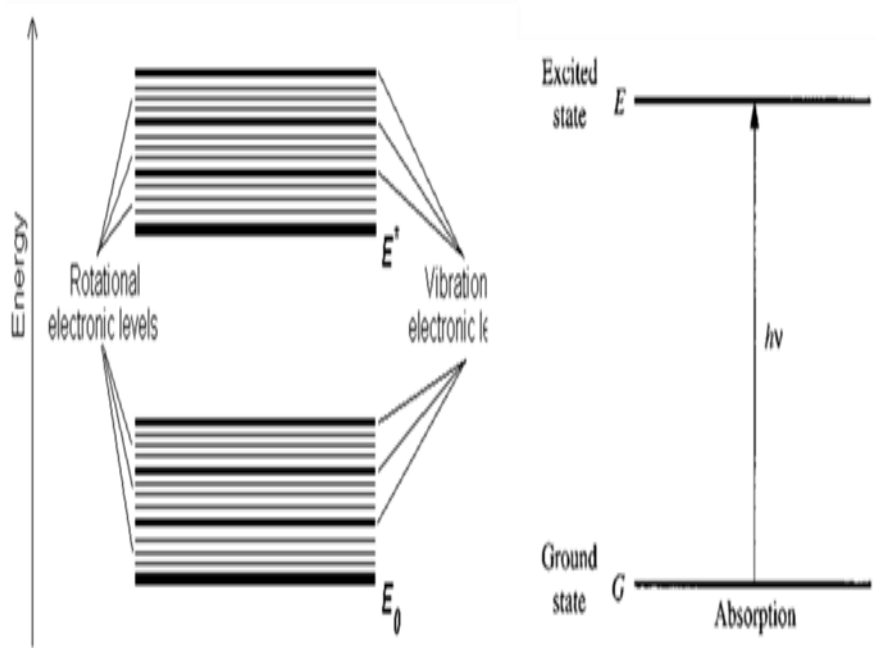
در محدوده‌ی طول موجی  $10^2$  تا  $10^4$  میکرون، باندهای ارتعاشی در محدوده‌ی طول موجی ۱ تا ۳۰ میکرون و باندهای انتقالی، دارای محدوده‌ی طول موجی  $10^{-2}$  تا ۱ میکرون، می‌باشند [۵۸].

باید توجه داشت که گذارهای انتقالی شامل یک انتقال بین دو تراز  $E_0$  و  $E_1$  می‌باشد، که موقعیت

طیفی باند را تعریف می‌کند و همچنین موقعیت گذارهای چرخشی و ارتعاشی که باعث ایجاد تعداد

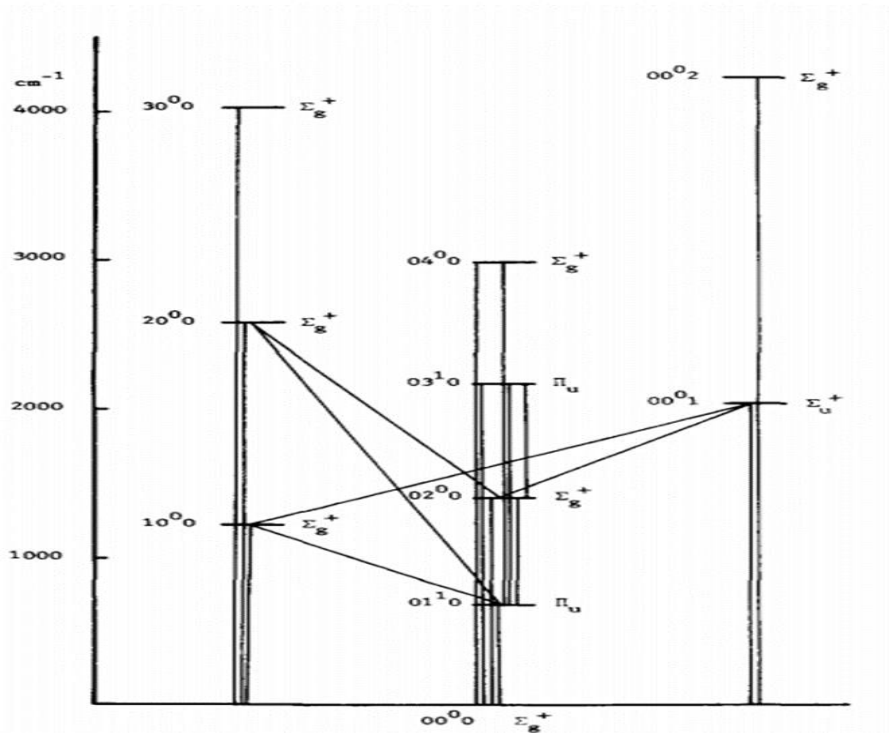
زیادی خطوط طیفی مختلف در نزدیکی موقعیت‌های تعریف شده با گذارهای انتقالی می‌باشند. (شکل

(۴-۱)



شکل ۴-۱: موقعیت‌های ترازهای انتقالی، ارتعاشی و چرخشی [۵۹].

به طور مشابه برای یک باند ارتعاشی، یک تغییر در عدد کوانتومی ارتعاشی موقعیت طیفی را تعریف و مشخص می‌کند. در حالی که خطوط واقعی باند به واسطه‌ی گذارهای همزمان ارتعاشی و چرخشی ایجاد می‌شود. به همین دلیل باندهای ارتعاشی به عنوان باندهای ارتعاشی-چرخشی شناخته می‌شوند. موقعیت دقیق یک باند به طور کامل به اندازه، شکل و نیروهای داخلی مولکول مربوط می‌شود. سطوح انرژی ارتعاشی مولکول دی اکسید کربن در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



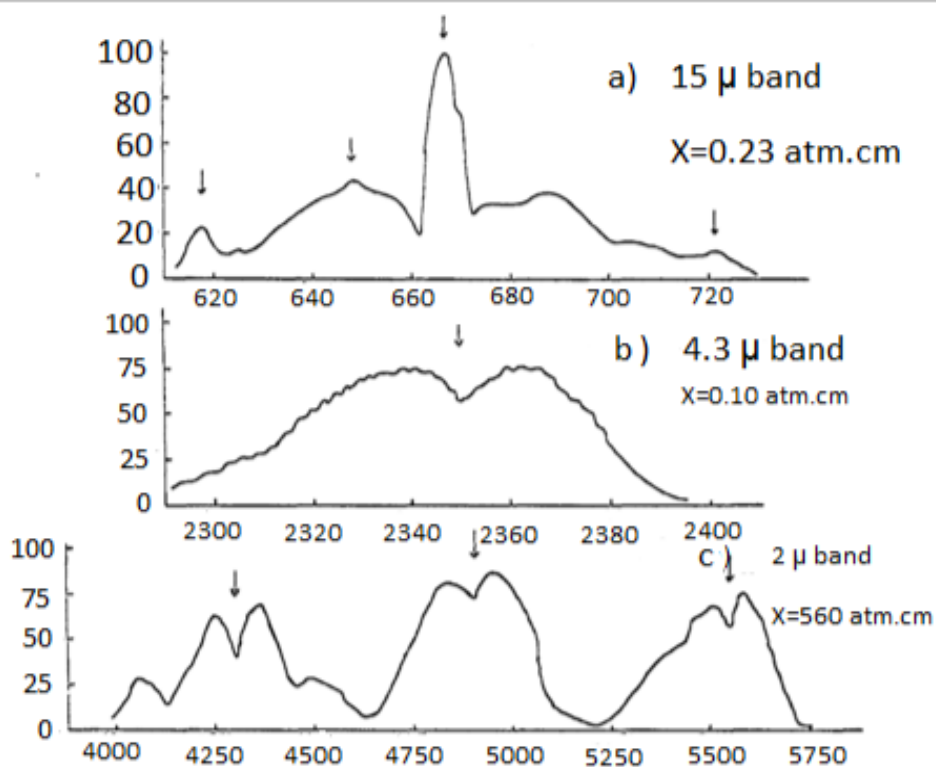
شکل ۴-۲: سطوح انرژی ارتعاشی مولکول دی اکسید کربن [۵۹].

هنگامی که نور به مولکول دی اکسید کربن برخورد می‌کند باعث چهار حالت ارتعاشی در مولکول دی اکسید کربن می‌شود. الف) حالت ارتعاشی متقارن، که در این حالت جذب بسیار ضعیف می‌باشد و اندازه‌گیری با طیف مادون قرمز امکان‌پذیر نیست، اما می‌توان با طیف رامان اندازه‌گیری کرد.

ب) حالت ارتعاشی خمشی، این ارتعاش خود به دو حالت تقسیم می‌شود. به طور تقریبی، در این حالت یک جذب قوی در ۱۵ میکرون وجود دارد.

ج) حالت ارتعاشی نامتقارن، در این حالت یک جذب قوی در ۴/۲۶ میکرون و یک جذب ضعیف در ۲/۷ میکرون رخ می‌دهد که می‌توان با طیف مادون قرمز آن را محاسبه کرد [۵۸].

خواص طیفی مولکول دی اکسید کربن با محاسبه‌ی شدت یکپارچه شده‌ی جذبی و میزان اشعه‌ی عبوری بررسی می‌شود. باند ۴/۲۶ میکرون دی اکسید کربن بیشترین توجه در این طیف دارد.



شکل ۴-۳: درصد جذب برخی از باندهای مولکول دی اکسید کربن در دمای اتاق و در وضوح پایین [۵۸].

دو روش مختلف برای محاسبه‌ی طیف جذب و نشری از یک باند ارتعاشی\_چرخشی در دسترس است. اولین و مهم‌ترین روش این است که اصول مکانیک کوانتومی در مورد حالت‌های برانگیخته‌ی مختلف در حالت‌های هر تراز ارتعاشی در نظر گرفته شود. یا اینکه به طور مستقیم از طیف استفاده کرد و قوانین مکانیک کوانتومی در نظر گرفته شود.

برای محاسبات به این روش باید موارد زیر را مشخص کرد:

الف) اندازه‌ی سطوح انرژی و نوع فاصله‌ی بین آنها (ب) پارامترهای پتانسیل غیر هارمونیک (ج) اثرات انتقال چند قطبی (د) المان‌های ماتریس دو قطبی و چند قطبی [۵۸].

در روش دوم که همان مدل آماری است و نیاز به اطلاعات بیشتری می‌باشد و این اطلاعات به کمک قوانین ساده حاصل می‌شود. که مهم‌ترین آنها آزمایش‌های اسپکتروفتومتری و بزرگ‌نمایی و تحلیل آنها است. البته باید آزمایش‌ها در دماهای مختلف انجام شوند و نتایج نیز به کمک مدل آماری تحلیل شود. این استدلال‌ها می‌تواند برای باندهای دی اکسید کربن و باندهای دیگر مولکول‌ها اعمال و بررسی شود. که در پیوست به آن اشاره شده است. با توجه به پیوست (ب) می‌توان به این نتیجه دست یافت که جذب متناسب با تغییر تکانه‌ی دو قطبی در جهات مختلف دستگاه مختصات می‌باشد.

۱-۴

$$S_{nm} = \frac{8 \pi^3 \vartheta_{mn}}{3 \hbar c^2} \left( \frac{N_n}{p} \right) |R_{mn}|^2 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\hbar \vartheta_{mn}}{KT}\right) \right\}$$

با توجه به این فرمول، جذب متناسب با  $|R_{mn}|^2$  (عناصر ماتریسی تکانه‌ی دو قطبی) می‌باشد. برای به دست آوردن این فرمول، معادله‌ی شرودینگر اختلالی برای ضرایب انشتین محاسبه می‌شود. محاسبات انجام شده به خوبی تناسب بین عناصر ماتریسی تکانه‌ی دو قطبی با ضرایب انشتین را نشان می‌دهد.

[۵۸]

با به کارگیری حرکت‌های داخلی و خارجی مولکول دی اکسید کربن (پیوست (پ)) و در نتیجه دست یافتن به قوانین انتخاب مناسب و جمع‌زنی روی تمام این قوانین، می‌توان باندهای جذب قوی و ضعیف در مولکول دی اکسید کربن به دلیل برهمکنش با تابش مادون قرمز را به دست آورد.



پس از جمع‌زنی روی تمام قوانین انتخاب مناسب برای مولکول دی اکسید کربن، طیف جذب با فرمول زیر داده می‌شود که اثبات این فرمول در پیوست (ث) آمده است.

$$S(n_1 n_2 n_3 J \rightarrow n'_1 n'_2 n'_3 J') = \frac{8\pi^3 N_T \vartheta}{3Kc^2 Q'_\vartheta Q'_R} g_{J'l}$$

$$a_{J'l}^{J'l} \left| R n_1 n_2 n_3 J \rightarrow n'_1 n'_2 n'_3 J' \right|^2 \exp\left[-\frac{w'_\vartheta + w'_R}{KT}\right] \left(1 - \exp\left(-\frac{h\vartheta}{KT}\right)\right) \quad 2-4$$

که  $g$  فرکانس مربوط به تغییرات در اعداد کوانتومی می‌باشد.  $\left| R n_1 n_2 n_3 J \rightarrow n'_1 n'_2 n'_3 J' \right|^2$

عناصر ماتریسی متناظر،  $N_T$  تعداد کل مولکول‌ها در واحد حجم و در واحد فشار،  $Q'_R \rightarrow w'_R$  تابع

تفکیک چرخش کامل با ترازهای انرژی،  $w'_\vartheta \rightarrow Q'_\vartheta$ ، تابع تفکیک ارتعاش کامل با ترازهای انرژی،  $J'l$

$J'l \rightarrow a_{J'l}^{J'l}$  دامنه‌ی  $l$  عامل مربوط به تغییر چرخشی حالت،

$$a_{J'l\pm 1}^{J'l} = \frac{(J\pm l)(l\pm J+1)}{4J(J+1)} \quad \text{برای } l \neq 0 \quad 3-4$$

برای تکمیل محاسبه‌ی جذب باند کل، عبارت بالا را برای همه‌ی مقادیر  $J'l$  مجاز حاکم بر قوانین

انتخاب  $\Delta J = 0, \pm 1$  جمع زده می‌شود. با استفاده از طیف جذب به دست آمده، تمام باندهای جذب

به دست می‌آید. که همه‌ی این باند جذب‌ها در جدول ۴-۱ آمده است.

جدول ۴-۱: همهی باندهای جذبی در مولکول دی اکسید کربن [۵۸].

نوع باند	حالت بالا	حالت پایین	عدد موج محاسبه شده ( $cm^{-1}$ )	عدد موج مشاهده شده ( $cm^{-1}$ )	طول موج (میکرون)		
v.s. خط	01 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۶۶۷/۳	۶۶۷/۳	۱۴/۹۸
m. خط	02 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	01 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	۶۱۸/۱	۶۱۸/۵	۱۶/۱۷
m. خط	02 <sup>2</sup> 0	$\Delta_g$	01 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	۶۶۸/۱	۶۶۸/۳	۱۴/۹۷
m. خط	10 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	01 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	۷۲۰/۸	۷۲۰/۵	۱۳/۸۷
W. خط	03 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	02 <sup>2</sup> 0	$\Delta_g$	۵۹۶/۵	۵۹۶/۸	۱۶/۷۶
خط W.	03 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	02 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۶۴۶/۱	۶۴۷/۶	۱۵/۴۴
خط W.	11 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	02 <sup>2</sup> 0	$\Delta_g$	۷۴۱/۷	۷۴۰/۸	۱۳/۵۰
خط VW.	11 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	02 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۷۹۱/۳	۷۹۰/۸	۱۲/۶۵
W. خط	04 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	01 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	۱۸۸۰/۱	۱۸۸۶	۵/۳۰۲
m. خط	12 <sup>0</sup> 0	$\Delta_g$	01 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	۲۰۹۴/۹	۲۰۹۴	۴/۷۷۶
m. خط	20 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	01 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	۲۱۳۱/۵	۲۱۳۷	۴/۶۷۹
m. خط	03 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۱۹۳۱/۹	۱۹۳۲/۵	۵/۱۷۵
m. خط	11 <sup>1</sup> 0	$\Pi_u$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۲۰۷۷/۱	۲۰۷۶/۵	۴/۸۱۶
$^{13}C^{16}O_2$	00 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	-	۲۲۸۴/۵	۴/۳۷۷

IV.s.	00 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۲۳۴۹/۴	۲۳۴۹/۳	۴/۲۵۷
I.s.	02 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۳۶۱۳/۲	۳۶۰۹	۲/۷۷۱
I.s.	10 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۳۷۱۵/۶	۳۷۱۶	۲/۶۹۱
I.m.	04 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۴۸۵۲/۵	۴۸۶۰/۵	۲/۰۵۷
I.m.	12 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۴۹۹۱/۴	۴۹۸۳/۵	۲/۰۰۷
I.m.	20 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۵۱۰۴/۳	۵۱۰۹	۱/۹۵۷
I.w.	06 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۶۰۷۴/۵	۶۰۷۷	۱/۶۴۶
I.w.	14 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۶۲۳۱/۴	۶۲۳۱	۱/۶۰۵
I.w.	22 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۶۳۵۴/۴	۶۳۵۱	۱/۵۷۵
I.w.	30 <sup>0</sup> 1	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۶۵۱۸/۹	۶۵۱۰	۱/۵۳۶
I.w.	00 <sup>0</sup> 3	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۶۹۷۳/۱	۶۹۷۶	۱/۴۳۳
IV.w.	02 <sup>0</sup> 3	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۸۱۹۲/۹	۸۱۹۳	۱/۲۲۱
IV.w.	10 <sup>0</sup> 3	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۸۲۹۵/۳	۸۲۹۳	۱/۲۰۶
IV.w.	00 <sup>0</sup> 5	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۱۱۴۹۶/۵	۱۱۴۹۶/۵	۰/۸۶۹۸
IV.w.	02 <sup>0</sup> 5	$\Sigma_g^+$	00 <sup>0</sup> 0	$\Sigma_g^+$	۱۲۶۷۲/۴	۱۲۶۷۲/۴	۰/۷۸۹۱

با توجه به داده‌های جدول، برخی از انتقال‌ها باعث جذب ضعیف در طیف مادون قرمز شده‌اند. به عنوان مثال، انتقال از حالت  $00^0$  به حالت  $02^0$  یا انتقال از حالت  $00^0$  به  $20^0$  که نشان می‌دهد مربوط به انتقال‌های چرخشی می‌باشد. که مطابق با داده‌های طیف جذب مطابق با این انتقال، نشان داده شده است که باند جذب ضعیف می‌باشد و مرتبط با ترازهای چرخشی می‌باشد. اما انتقال‌های دیگری چون انتقال از حالت  $00^0$  به حالت  $00^0$  یا انتقال از حالت  $01^0$  به حالت  $20^0$ ، طبق داده‌های جدول (ت)، نشان دهنده‌ی وقوع انتقال‌های ارتعاشی می‌باشد. که باعث جذب بسیار قوی در طیف مادون قرمز شده است. باید توجه داشت که این دو انتقال ضعیف و قوی در حالت ارتعاش کششی نامتقارن صورت گرفته است.

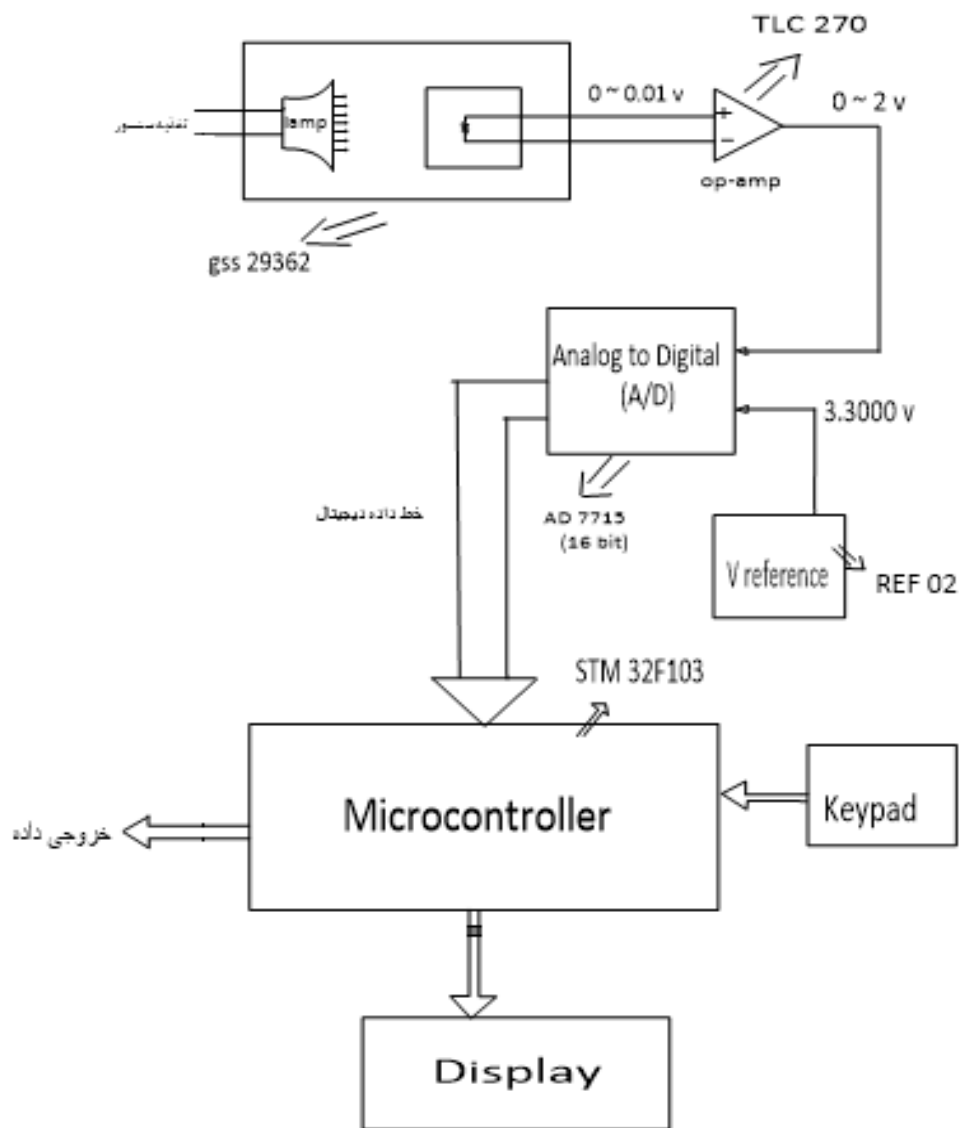
انتقال دیگری چون، انتقال از حالت  $00^0$  به حالت  $01^0$  یک جذب قوی در طیف مادون قرمز ایجاد می‌کند که مربوط به دو حالت ناپایدار کشش خمشی می‌باشد. دو باند انتقالی به خوبی از حالت  $00^0$  به حالت‌های  $10^0$  و  $02^0$  مطابق با مقاله‌ی [۵۹]، تکرار می‌شوند. که این انتقال‌ها بیشترین توجهات را به سمت خود جلب کردند. زیرا آنها انتقال‌های فعال در لیزر گازی دی اکسید کربن / نیتروژن را تشکیل می‌دهند.

## ۴-۲- طراحی و ساخت مدار الکترونیکی حسگر گازی مادون قرمز غیر پراکنده

(NDIR)

آشکارسازهای گازی مادون قرمز براساس اصول جذب طیف مادون قرمز کار می‌کنند. نحوه‌ی عملکرد آن‌ها به طور مختصر به این شرح می‌باشد: یک منبع مادون قرمز (LED) که به حجمی از گاز دی اکسید کربن که در یک محفظه قرار دارد، تابیده می‌شود. همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، گاز بعضی از امواج مادون قرمز را که از طریق محفظه‌ی اندازه‌گیری عبور می‌کند را جذب می‌کند. و دیگر طول موج‌ها بدون وقفه عبور می‌کنند. مقدار تابش جذب شده مربوط به غلظت گاز دی اکسید کربن می‌باشد و توسط مجموعه‌ای از آشکارسازهای نوری و سیستم‌های الکترونیکی مناسب، اندازه‌گیری می‌شود. تغییر شدت نور جذب شده به شدت نور در طول موج‌های غیر جذب شده اندازه‌گیری می‌شود و ریزپردازنده غلظت گاز از جذب را محاسبه و گزارش می‌کند. در صورتی که هیچ گازی وجود نداشته باشد سیگنال‌های آشکارساز، سیگنال مرجع و سیگنال‌های اندازه‌گیری متعادل می‌شوند [۲۹].

برای فعال کردن گسیل کننده و آشکارساز با طول موج  $4/26$  به یک مدار الکترونیکی نیاز است. هنگامی که موج مادون قرمز جذب می‌شود طول موج ضعیفی به آشکار ساز می‌رسد که نیاز به تقویت آن می‌باشد. و یک سری از قطعات الکترونیکی برای کامل کردن مدار الکترونیکی مربوط به حسگر می‌باشد. یک مدار الکترونیکی مناسب برای حسگر گازی دی اکسید کربن طراحی شد. دیاگرام مدار الکترونیکی طراحی شده در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.

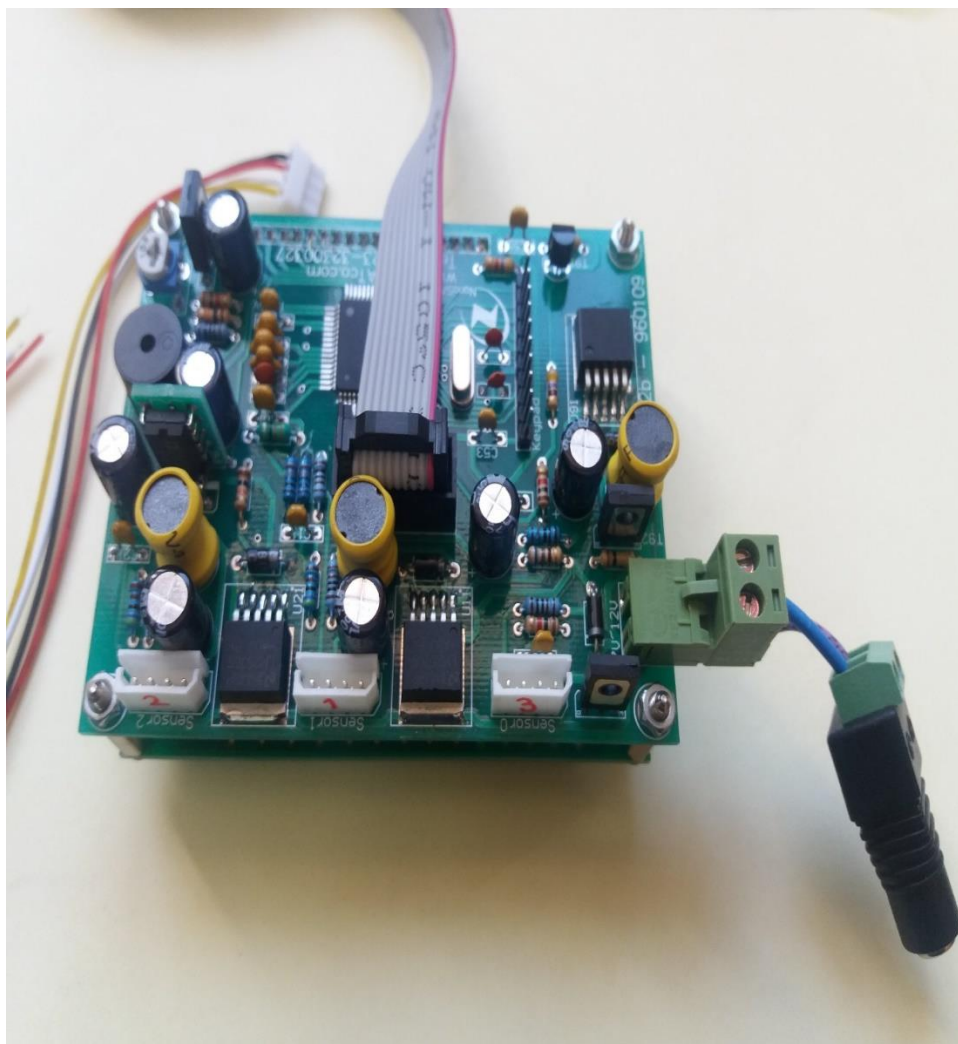


شکل ۴-۴: دیاگرام مدار الکترونیکی حسگر مادون قرمز غیر پراکنده (NDIR)

دیاگرام نشان داده شده در شکل ۴-۴ مربوط به اندازه‌گیری میزان گاز توسط یک حسگر اپتیکی می‌باشد. لایه‌ی حساس به گاز توسط یک طیف نوری خاص (مادون قرمز) تابیده می‌شود و میزان نوری که اندازه‌گیری می‌شود متناسب با گاز مورد نظر (دی اکسید کربن) می‌باشد.

میزان نور که به صورت ولتاژ خروجی سنسور ظاهر می‌شود بسیار ضعیف می‌باشد که توسط یک تقویت کننده عملیاتی (op-Amp) تقویت شده و به ورودی مبدل آنالوگ به دیجیتال (A/D) داده می‌شود. مبدل A/D این دامنه‌ی ولتاژ را با یک ولتاژ مرجع دقیق که به طور مثال می‌تواند ۳/۳۰۰۰ ولت باشد، مقایسه می‌کند و یک عدد دیجیتال مابین صفر تا ماکزیمم دقت آن تولید می‌کند. این عدد توسط میکروکنترلر مورد استفاده قرار گرفته، پردازش می‌شود. بخشی از این پردازش که در اولین مرحله نیز انجام می‌شود، قرار دادن آن در برنامه‌ی مطلب بار گذاری شده که برای تبدیل عدد دیجیتالی به ppm می‌باشد، آن را به ppm تبدیل می‌کند. سپس مقدار به دست آمده می‌تواند به‌عنوان میزان گاز اندازه‌گیری شده بر روی نمایشگر نشان داده شود و یا به رایانه جهت آنالیزهای دیگر فرستاده شود.

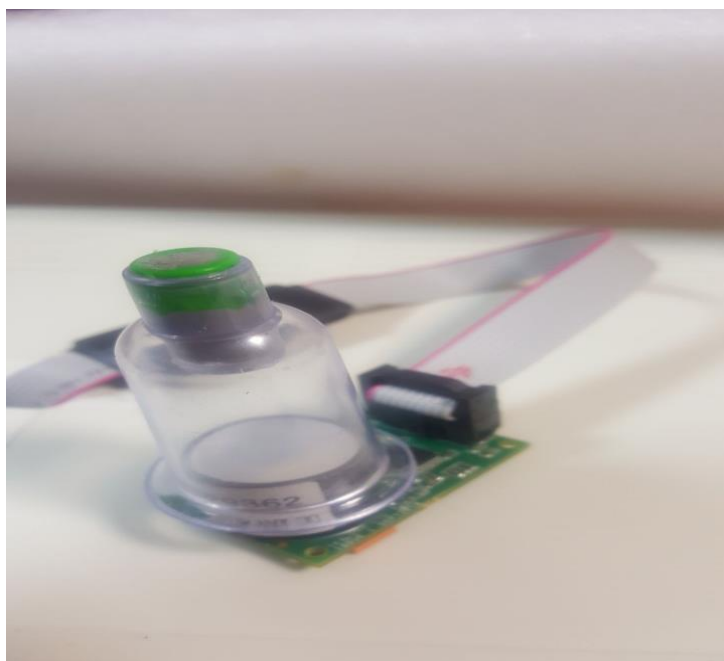
شماتیکی از قرار گرفتن قطعات بالا و دیگر قطعات الکترونیکی مورد نیاز در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: شماتیکی از مدار الکترونیکی بسته شده برای حسگری گاز دی اکسید کربن



محیط دارای غلظت‌هایی از گاز دی اکسید کربن ناشی از تنفس کارکنان و دیگر منابع تولید این گاز می‌باشد. برای اندازه‌گیری غلظت‌های معین نیاز به یک محفظه برای جلوگیری از ورود غلظت‌های گاز دی اکسید کربن ناخواسته می‌باشد. با این حال باید توجه داشت که پس از نصب محفظه، محفظه را باید به طور کامل خالی از وجود گاز کرد تا به کمترین میزان گازهای مزاحم در آن دست یافت. این محفظه روی لایه‌ی فعال برای اندازه‌گیری گاز مورد نظر بدون دخالت گازهای ناخواسته تعبیه شده است. شکل ۴-۶ طرز قرار گرفتن این محفظه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶: محل ورود گاز دی اکسید کربن و تعامل گاز با موج مادون قرمز

تصاویری از نمای بیرون این سیستم در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. این حسگر به گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند انواع دیگری از حسگرها مانند حسگرهای مقاومتی را در خود جای دهد و گاز دی اکسید کربن را اندازه‌گیری کند.



شکل ۴-۷: سنسور نوری برای اندازه‌گیری گاز دی اکسید کربن

این حسگر با وجود ابعاد بزرگتر نسبت به حسگرهای مقاومتی، دارای کاربردهای فراوانی در صنایع و پزشکی دارد. در کاربردهایی که پارامترهای حساسیت و زمان پاسخ‌دهی اهمیت دارد، می‌تواند بسیار پرکاربرد با وجود هزینه‌بر بودن، باشد. این حسگر می‌تواند غلظت‌های دی اکسید کربن را که به خروجی می‌دهد نیز روی صفحه‌ی نمایش خود ثبت کند. این حسگر با تشخیص مناسب، می‌تواند جایگزین حسگرهای نویزی شود و همچنین پارامترهای زمان پاسخ و زمان بازیابی را بهبود می‌بخشد.

#### ۳-۴- نتایج تجربی برای اندازه‌گیری گاز دی اکسید کربن با حسگر گازی (NDIR)

برای بررسی و تحلیل حسگری گاز دی اکسید کربن با استفاده از این حسگر، گاز دی اکسید کربن موجود در آزمایشگاه برای فرآیند ppm سازی رقیق می‌کنیم. ۱ cc گاز دی اکسید کربن خالص (با خلوص ۹۹/۹۹ درصد) را در یک ظرف ۶۲۰ ml عاری از گاز دی اکسید کربن تزریق می‌کنیم. سپس شش غلظت متفاوت از گاز دی اکسید کربن رقیق شده، برای بررسی حسگری این گاز استفاده می‌شود.

حجم محفظه‌ی گازی: ۱۲/۵ میلی لیتر

$$\frac{1000000}{620} \times 1 \text{ cc} = 1613 \text{ cc}$$

با تقسیم این مقدار به حجم محفظه گازی ضربدر مقدار غلظتی که از حجم رقیق سازی شده،

مقدار ppm داده می‌شود. پس:

$$0.5 \text{ cc} , \quad \frac{1613}{12.5} \times 0.5 \approx 64 \text{ ppm}$$

$$1.0 \text{ cc} , \quad \frac{1613}{12.5} \times 1.0 \approx 130 \text{ ppm}$$

$$1.5 \text{ cc} , \quad \frac{1613}{12.5} \times 1.5 \approx 193 \text{ ppm}$$

$$2.0 \text{ cc} , \quad \frac{1613}{12.5} \times 2.0 \approx 258 \text{ ppm}$$

$$2.5 \text{ cc} , \quad \frac{1613}{12.5} \times 2.5 \approx 322 \text{ ppm}$$

$$3.0 \text{ cc} , \quad \frac{1613}{12.5} \times 3.0 \approx 387 \text{ ppm}$$

تست‌های حسگری برای این غلظت‌ها با فاصله‌های زمانی بیش از یک ساعت برای به حداقل رساندن

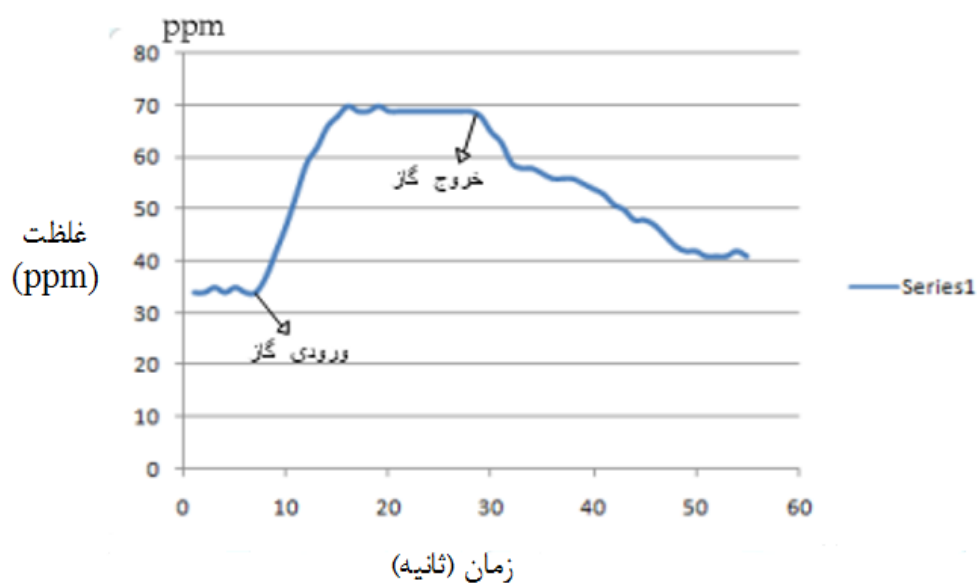
غلظت گاز دی اکسید کربن درون محفظه انجام شد که در ادامه نتایج حسگری آن بررسی خواهد شد.

خروجی این حسگر می‌تواند به رایانه وصل شود و تغییرات غلظت را با منحنی‌های مناسب نشان

دهد. در صورتی که خروجی آن به رایانه متصل نباشد، غلظت‌های مختلف اندازه‌گیری شده را به صورت

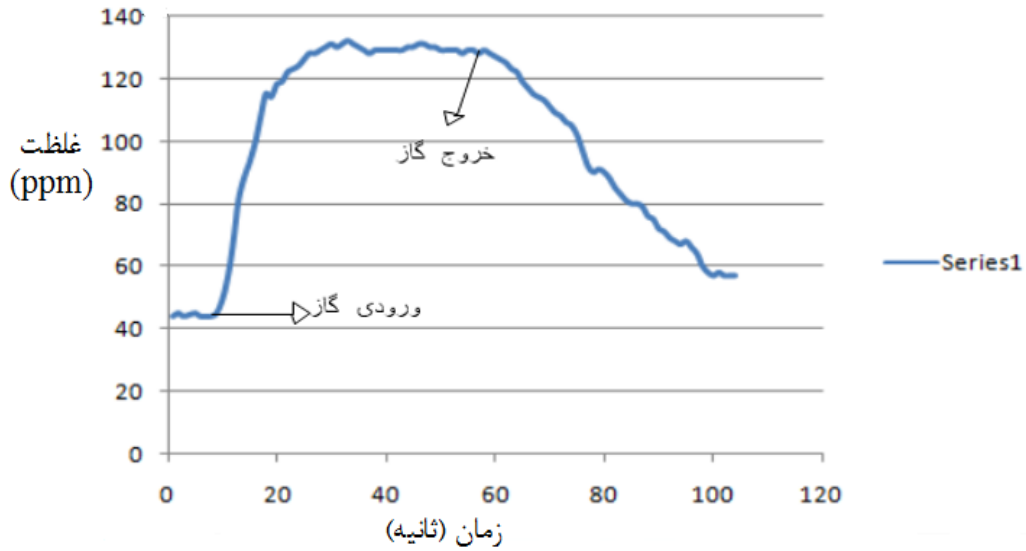
اعداد دیجیتالی نمایش می‌دهد. باید توجه داشت که حافظه‌ی حسگر در ۱۳۰ گام گنجانده شده است، به طوری تعداد غلظت‌های تشخیص داده شده توسط این حسگر بیشتر از تعداد گام‌ها باشد، به عنوان مثال: غلظتی که در گام ۱۳۱ اندازه‌گیری می‌شود روی گام اول نشان می‌دهد. این درحالیست که غلظت در ابتدا در گام اول دیگر نشان داده نمی‌شود. با این حال در این تست‌هایی که انجام شد، چنین اتفاقی نمی‌افتد و مشکلی بابت این موضوع به وجود نمی‌آید.

(۱) غلظت ppm ۶۴



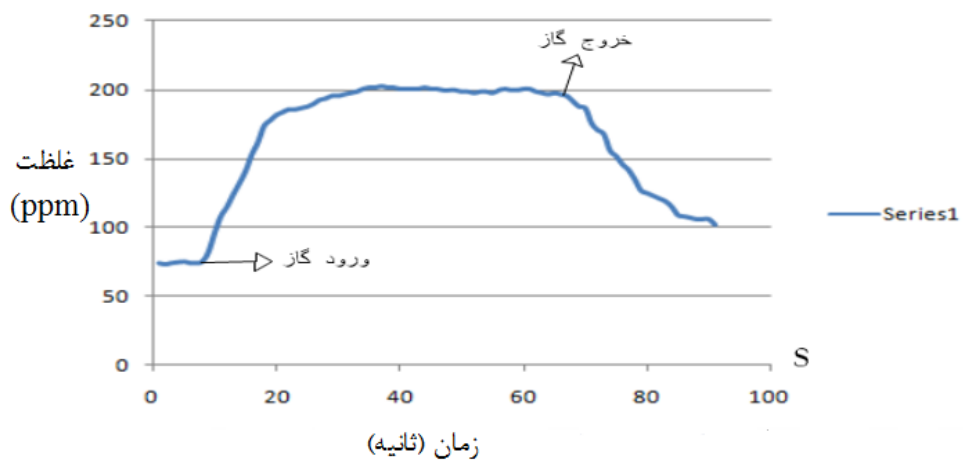
شکل ۴-۸: تغییرات غلظت گاز بر حسب زمان برای غلظت ورودی ppm ۶۴

۲) غلظت ۱۳۰ ppm



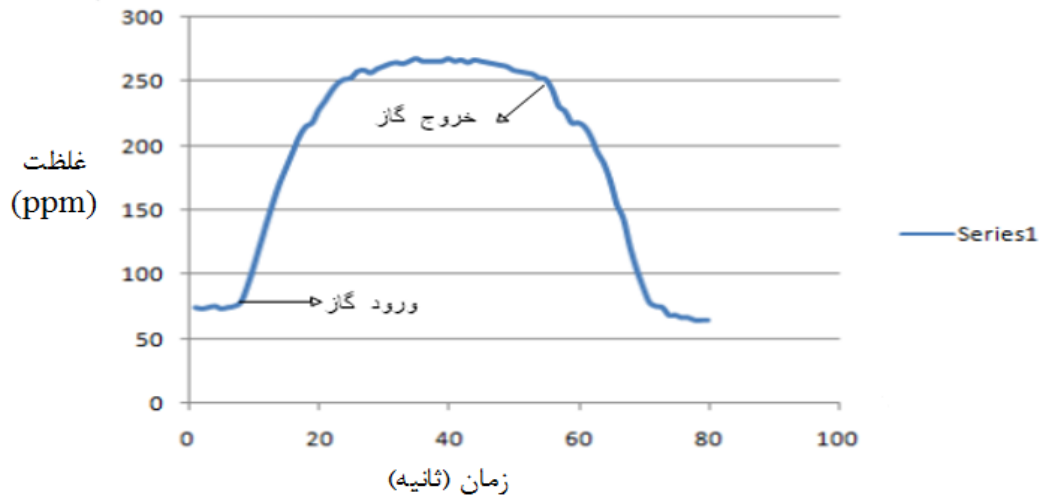
شکل ۴-۹: تغییرات غلظت بر حسب زمان برای غلظت تزریقی ۱۳۰ ppm

۳) غلظت ۱۹۳ ppm



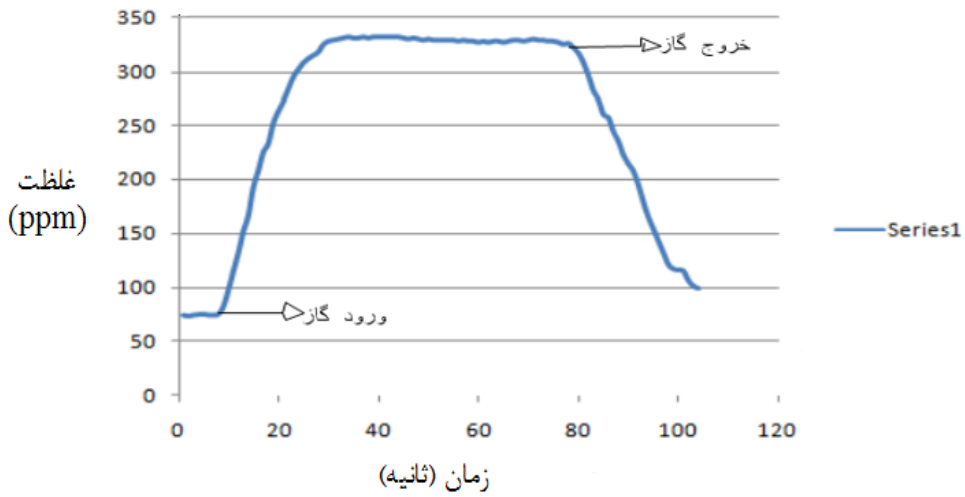
شکل ۴-۱۰: تغییرات غلظت بر حسب زمان برای غلظت ۱۹۳ ppm

۴) غلظت ۲۵۸ ppm



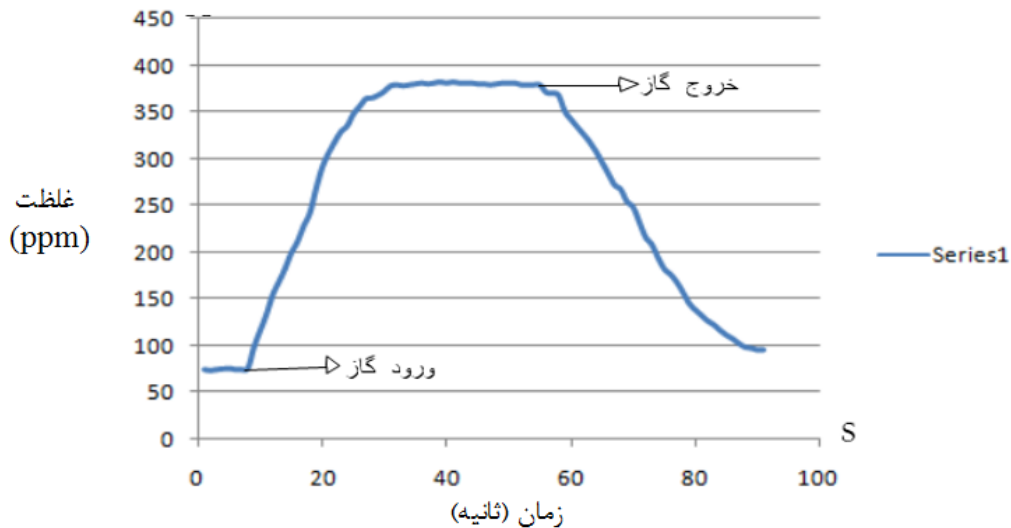
شکل ۴-۱۱: تغییرات غلظت بر حسب زمان در غلظت ۲۵۸ ppm

۵) غلظت ۳۲۲ ppm



شکل ۴-۱۲: تغییرات غلظت بر حسب زمان در غلظت ۳۲۲ ppm

## ۶) غلظت ۳۸۷ ppm



شکل ۴-۱۳: تغییرات غلظت بر حسب زمان در غلظت ۳۸۷ ppm

در نمودار مربوط به غلظت ۶۴ ppm دیده می‌شود که زمان بازیابی حسگر بسیار کند می‌باشد. این اتفاق به دلیل تست حسگری این غلظت در حدود گاز دی اکسید موجود در محیط اندازه‌گیری می‌باشد. و وقتی در محفظه برای تخلیه‌ی گاز برداشته می‌شود، به طور کامل گاز از روی لایه‌ی حساس به گاز محو نمی‌شود و همچنان این لایه‌ی حساس به گاز توسط گازهای دی اکسید موجود در محیط اشغال می‌شود.

با توجه به نمودارهای اندازه‌گیری غلظت، می‌توان به درصد خطای کاربرد در هنگام فرآیند رقیق سازی پی برد. برای مثال: با توجه به غلظت اندازه‌گیری شده برای غلظت تقریبی ۳۲۲ ppm، نمودار غلظت ۳۳۵ ppm نشان داده است. یا، برای غلظت ۳۸۷ ppm تعیین شده، نمودار ۳۹۶ ppm نشان داده شده است. این بدین معناست که کاربرد در هنگام محاسبات برای رقیق سازی غلظت دچار خطا شده است.

نتیجه‌ی دیگری که می‌توان از این نمودارها دست یافت، زمان پاسخ این حسگر می‌باشد که با توجه نمودارهای رسم شده، در برخی موارد زمان پاسخ‌دهی تا زیر ۱۰ ثانیه می‌رسد. همچنین این حسگر دارای زمان بازیابی سریعی به استثنای غلظت ppm ۶۴ می‌باشد. همچنین، پارامتر حساسیت برای این حسگر بسیار بالا می‌باشد. و به کمترین تغییرات غلظت گاز دی اکسید کربن پاسخ می‌دهد. از مزایای دیگر حسگرهای مادون قرمز پاسخ‌دهی به طیف گسترده‌ای از غلظت‌ها می‌باشد.

حسگرهای گازی مادون قرمز در بازارهای جهانی به طور گسترده‌ای برای کاربردهای زیادی تجاری سازی شده‌اند. اما در کشور ما پروژه‌ی تجاری‌سازی آن با مشکلاتی روبه‌رو می‌باشد. هزینه‌ی بالا برای تولید آن و همچنین به دلیل تحریم بودن کشور ایران، تهیه‌ی دشوار قطعات گسیل کننده‌ی نور و آشکارساز آن، از جمله مشکلات به‌وجود آمده برای تجاری‌سازی این حسگر می‌باشد.

در فصل ۵ بر روی حسگرهای گازی مقاومتی کار می‌شود که نشان داده می‌شود حسگرهای گازی مقاومتی که ساخته شده است، با توجه به مشخصات خوب حسگری گاز دی اکسید کربن که از خود نشان می‌دهند، می‌توانند برخلاف حسگرهای مادون قرمز با هزینه‌ی بالا، مشکلات نویزی بودن را با هزینه‌ی کم را حل کنند.



## فصل پنجم

ساخت حسگرهای مقاومتی نانو ساختار گاز  $\text{CO}_2$  و

بررسی نتایج حسگری آنها

با پیشرفت روز افزون تکنولوژی، نیاز به ساخت و توسعه‌ی ابزارهای الکترونیکی با ابعاد کوچکتر، سرعت بیشتر، مشخصات مطلوب‌تر و همچنین کارایی بهتر افزایش یافته است. در این راستا تحقیقات فراوانی در جهت پیشرفت روش‌های ساخت برپایه‌ی نانو تکنولوژی صورت گرفته است.

برنامه‌های کاربردی در زمینه‌های طبیعی همیشه در اطراف ما بوده و نانو مواد مصنوعی در سراسر جهان به طور وسیعی توسعه یافته است. همچنان با پیشرفت تکنیک‌های مشخصه به خواص مواد در مقیاس نانو ادامه داده می‌شود که عموماً اندازه‌ی ذرات تقریباً ۱۰۰ نانومتر قطر و یا کمتر و یا چهار برابر کوچکتر از طول موج نور فرابنفش می‌باشد. بخش بزرگی از تحقیقات در حوزه‌های فیزیک، شیمی و پزشکی به منظور توسعه‌ی درک خواص فیزیکی و شیمیایی نانو مواد موجود و تولید شده برای توسعه‌ی برنامه‌های کاربردی برای استفاده در زندگی روزمره اختصاص داده شده است.

اکسید فلزی نماینده‌ی یک خانواده از مواد است که طیف گسترده‌ای از خواص و کاربردهای بالقوه می‌باشد. اهمیت اکسیدهای فلزی به زمینه‌هایی مانند ذخیره‌سازی اطلاعات، ذخیره انرژی و تبدیل انرژی، پیامدهای دارویی، کاتالیزور ناهمگن رطوبت و حساسیت، باعث شده که تحقیقاتی را به منظور توسعه‌ی مسیرهای مصنوعی آسان به اکسیدهای فلزی نانو ساختار تحریک کرده است. اما پیشرفت قابل توجهی در روش‌های توصیفی به منظور به دست آوردن درک جامع از خواص مختلف خود را دارند.

چالش‌های حیاتی که به توجه ما نیاز دارند، طراحی شیوه‌های ارزانتر تولید این اکسیدها و به دست آوردن سطح بالایی از تسلط بر دستگاه‌های شکل اکسیدهای فلزی نانو ساختار می‌باشند، بنابراین به عملکرد آنها در کاربرد عملی تاثیر می‌گذارد.

لایه‌ی نازک<sup>۱</sup> به لایه‌ای از مواد گویند که دارای ضخامت نانومتری تا محدوده‌ی چندین میکرومتری می‌باشد. این لایه بر روی سطح قطعات و مواد دیگر قرار گرفته و به آن خصوصیت ویژه‌ی جدیدی را می‌بخشد. به ویژه، تکنولوژی فیلم نازک به طور فعال در توسعه‌ی سیستم‌های حسگر نیمه‌هادی کاربرد دارد. با توجه به اینکه این حسگرها عمدتاً به تعاملات سطح و گاز بستگی دارد، حسگرهای گازی فیلم نازک دارای مزایای بالقوه‌ای مثل، زمان پاسخ سریع و مهمتر از همه، پتانسیل برای کوچک سازی با استفاده از فناوری مبتنی بر IC است که منجر به مصرف کم انرژی، قابلیت اطمینان بیشتر و کاهش هزینه‌ها می‌شود.

اندازه‌ی کوچک حسگرهای نیمه‌هادی ساخته شده روی زیرلایه Si و غیره اجازه می‌دهد تا با مدارهای میکروالکترونیک و سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) مبتنی بر Si و غیره ادغام شود. به این ترتیب، عملکرد خود را با توسعه‌ی حسگرهای هوشمند که بر روی تراشه‌ی الکترونیکی ترکیب شده‌اند برای گرفتن اطلاعات و پردازش سیگنال، بالا برده است.

ساخت لایه‌های نازک با روش‌های متفاوتی و متنوعی صورت می‌گیرد که خواص مورد نیاز آنها تاثیر زیادی روی انتخاب یکی از این روش‌ها دارد. اساس روش‌های ساخت لایه نازک بر دو مبنای فیزیکی و شیمیایی استوار است که روش‌های عمده‌ی لایه‌نشانی بر پایه‌ی این روش‌ها دسته‌بندی می‌شوند. در هر روش کیفیت و شرایط لایه نازک متفاوت است که بسته به نوع کاربرد لایه نازک و شرایط مورد نظر، روش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از کاربردهای مهم لایه نازک می‌توان به استفاده از این نانوساختارها در ساخت حسگرها، ترانزیستورهای لایه نازک، سلول‌های خورشیدی و غیره اشاره کرد.

---

<sup>1</sup> Thin film

ساخت لایه نازک یا همان لایه نشانی را می‌توان قابلیت کنترل اتم‌ها از منبع تا سطح لایه تعریف کرد. یا لایه نشانی به معنی نشانیدن لایه‌ای نازک از ذرات بر روی اجسام مورد نظر در یک محیط دارای خلا نسبی می‌باشد. این عمل به واسطه‌ی پلاسمای ایجاد شده در این محیط صورت می‌گیرد. (پلاسمای گازی متشکل از یون‌ها و الکترون‌های آزاد است).

انواع روش‌های سنتز را می‌توان، روش هیدروترمال، روش سل\_ژل، روش اسپری، روش رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار<sup>۱</sup>، روش اسپاترینگ مگنترون جریان مستقیم<sup>۲</sup>، فرکانس رادیویی<sup>۳</sup> و غیره نام برد.

## ۵-۲- اکسید روی (ZnO) و اکسید قلع (SnO<sub>2</sub>)

اکسید روی یک نیمه‌هادی ترکیبی جذاب II-IV است که دارای یک باند گپ مستقیم ۳/۴ الکترون ولت در دمای اتاق می‌باشد. ZnO دارای اشکال مختلف ساختاری است که تحت شرایط رشد متفاوت است. ورت سایز<sup>۴</sup> ترمودینامیکی‌ترین شکل ZnO در محیط می‌باشد. پارامترهای ثابت شبکه برای ZnO ورت سایز  $a = 3/249$  انگستروم و  $c = 5/207$  انگستروم مربوط به گروه فضایی P63mc با دو زیر شبکه‌ی هگزوگونال در شبکه‌ی هگزوگونال  $Zn^{+2}$  و  $O^{-2}$  شامل پیوند کووالانسی  $sp^3$  می‌باشد. این ساختار مربوط به ZnO در شکل ۵-۱ نشان داده شده است [۶۱].

<sup>1</sup> Chemical Vapor Deposition(CVD)

<sup>2</sup> Direct Current(DC)

<sup>3</sup> Radio Frequency(r.f)

<sup>۴</sup> wertsiz



این مواد به طور گسترده‌ای در برنامه‌های کاربردی مختلف مانند سنسورهای گازی، پوشش مقاومتی UV، دستگاه‌های پیزوالکتریک، دستگاه‌های صوتی سطحی (SAW)، الکترودهای اکسید رسانای شفاف، پیل‌های خورشیدی، به عنوان فوتوکاتالیست در حسگرهای گازی و غیره استفاده می‌شود. همچنین به تازگی، اکسید روی توجه خود را برای کاربردهای احتمالی آن در دیودهای نوری با طول موج کوتاه<sup>۱</sup> و دیودهای لیزری<sup>۲</sup> مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های سنتز نیمه‌هادی‌های ZnO و SnO<sub>2</sub> اکثراً با روش‌های هیدروترمال، سل-ژل، اسپاترینگ انجام می‌شوند [۶۴].

در سال ۱۹۶۲، سرامیک نیمه‌هادی متخلخل، ZnO و SnO<sub>2</sub>، در ابتدا به عنوان دستگاه سنسور گاز معرفی شدند. اگرچه در ابتدا از ZnO برای اندازه‌گیری پاسخ گاز استفاده شد اما SnO<sub>2</sub> در دهه‌های اخیر برای آشکارسازهای تجاری توجه زیادی را به خود جلب کرده است، زیرا حساسیت بالا در دمای عملیاتی پایین دارد. با این حال، به رغم فعالیت‌های گسترده برای حسگرهای گازی تجاری، درک اصلی این خواص حساسیتی ضعیف است، زیرا بهینه‌سازی تجربی عملکرد حسگر، تمرکز بسیاری از محققان می‌باشد.

### ۵-۳- سنتز مواد به روش اسپاترینگ امواج رادیویی [۶۵].

تا به امروز روش‌های مختلفی برای ساخت لایه‌های نازک معرفی شده است که روش کندوپاش<sup>۳</sup> یکی از انواع روش‌های لایه‌نشانی فیزیکی از فاز بخار<sup>۴</sup> محسوب می‌شود که لایه‌نشانی فیزیکی از فاز بخار نیز به نوبه‌ی خود روش‌های لایه‌نشانی در خلا می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Diode Light Emitted(LED)

<sup>2</sup> Laser diode(LD)

<sup>3</sup> sputtering

<sup>4</sup> Physical vapor Deposition(PVD)

مانند سایر روش‌های لایه‌نشانی فیزیکی تحت شرایط خلأ، روش کندوپاش نیز شامل (الف) تبخیر ماده منبع؛ (ب) انتقال بخار از منبع به زیرلایه و (ج) تشکیل لایه نازک روی زیرلایه با انباشت بخار منبع مورد نظر است. در روش کندوپاش، برای این که ماده منبع به فاز بخار خود منتقل شود، از برهم‌کنش فیزیکی ذره‌هایی که به ماده منبع یا هدف<sup>۱</sup> برخورد می‌کنند، استفاده می‌شود. ماده هدف که به ولتاژ منفی متصل است، نقش کاتد را دارد. با بمباران و برخورد ذرات پرتابی به سطح هدف، اتم‌ها یا مولکول‌های آن از سطح جدا شده و به بیرون پرتاب می‌شوند و در میدان ایجادکننده پلاسما شتاب می‌گیرند. زیرلایه به ولتاژ مثبت متصل است و در واقع آند است و لایه‌ای از جنس هدف روی آن انباشت می‌شود. این روش برای ایجاد پوشش و ساخت لایه‌های نازکی که کاربردهایی مانند اپتیکی و ذخیره‌سازی مغناطیسی دارند، استفاده می‌شود.

با استفاده از ذرات با انرژی حدود ۵۰ تا ۱۰۰۰ الکترون‌ولت، سطح هدف بمباران می‌شود که با برخورد ذرات پرتابی به هدف، اتم‌های هدف به بیرون از آن پرتاب می‌شوند. این فرایند، کندوپاش نامیده می‌شود.

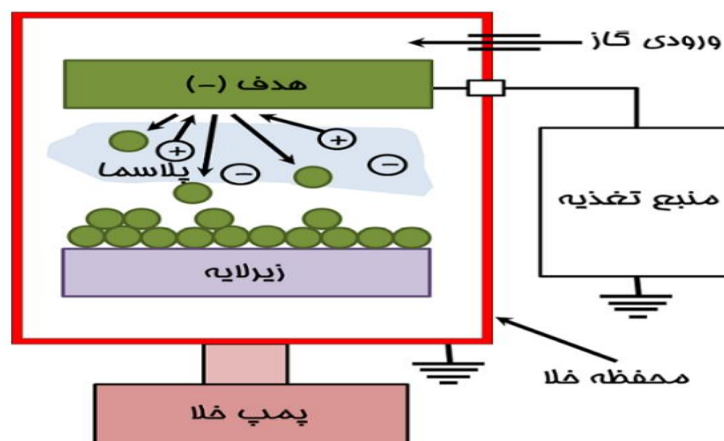
کاتد یا هدف که از جنس ماده پوشش‌دهنده است، به ولتاژ منفی متصل می‌شود. زیرلایه نیز در موقعیت آند قرار می‌گیرد. ابتدا فشار اولیه محفظه کندوپاش به  $10^6$  تا  $10^{10}$  تور می‌رسد و از آنجایی که متداول‌ترین شیوه برای فراهم کردن یون و تولید پلاسما، عبور مداوم گازی مانند آرگون است، با ورود این گاز به محفظه، فشار به ۱ تا ۱۰۰ تور افزایش می‌یابد و در دمای نزدیک یا بالاتر از انرژی یونیزاسیون اتمی، با برخورد الکترون به اتم‌های گاز، این اتم‌ها به الکترون‌ها با بار منفی و یون‌ها با بار مثبت تجزیه می‌شوند که به همین ترتیب الکترون اولیه و الکترون‌های ثانویه‌ای که در اثر یونیزاسیون تولید شده‌اند، دوباره در یونیزه کردن سایر اتم‌های گاز شرکت می‌کنند و پلاسما یا قوس درخشان که همان گاز یونیزه شده‌ای است که همه یا بخش قابل توجهی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست

---

<sup>1</sup> target

داده‌اند و به یون‌های مثبت تبدیل شده باشند، شکل می‌گیرد.

پتانسیل منفی که به کاتد یا هدف اعمال می‌شود،  $0/5$  تا  $5$  کیلوولت می‌باشد. گاز یا مخلوطی از گازهای مختلف با فشاری حدود چند تا چند صد میلی تور به داخل محفظه کندوپاش وارد می‌شود. از آن جایی که آرگون نسبت به سایر مواد کندوپاش‌کننده نسبتاً سنگین‌تر است، ضریب نشر ثانویه بزرگ‌تری دارد، می‌تواند اتم‌ها یا مولکول‌های بیشتری را از سطح هدف جدا کند. از این رو متداول‌ترین گازی است که برای تولید پلاسما در روش کندوپاش به کار برده می‌شود. در این روش استفاده از سایر گازهای نجیب مانند هلیوم یا نئون نیز امکان‌پذیر است. در صورت نیاز به واکنش حین کندوپاش می‌توان از گازهای اکسیژن و نیتروژن با نسبت‌های مشخص نسبت به گاز خنثی نیز استفاده کرد که در این صورت مشکلات مربوط به استوکیومتری در کندوپاش واکنشی<sup>۱</sup> یا کندوپاش ترکیبات مختلف کاهش می‌یابد. شکل ۵-۱، شماتیک سیستم کندوپاش را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳: شماتیک سیستم لایه‌نشانی کندوپاش [۶۵].

<sup>1</sup> Reactive Sputtering



یون‌های شتابدار، انرژی جنبشی بسیار بالایی دارند که رسیدن به این انرژی با حرارت دادن امکان‌پذیر نیست. از طرفی، زیرلایه در معرض برخورد ذرات گوناگون مانند اتم‌های هدف یا یون‌های با انرژی کمتر قرار می‌گیرد. بنابراین اندرکنش میان یون‌ها و سطح فقط برای سطح هدف مطرح نیست و این اندرکنش‌ها در سینماتیک جوانه‌زنی و رشد لایه ایجاد شده بر روی زیرلایه نیز اثرگذار است. کنترل بمباران یونی هدف، خواص و ریزساختار لایه تشکیل شده را تعیین می‌کند.

### فرآیند کندوپاش

در فرآیند کندوپاش، در اثر تخلیه الکتریکی و یونیزاسیون گازی که به داخل محفظه کندوپاش وارد شده است، یون‌های مثبت ایجاد می‌شوند. این یون‌ها به سطح هدف برخورد و با انتقال انرژی و تکانه به آن، اتم‌هایی را از سطح هدف جدا می‌کنند که هدف را با مقادیر مشخصی از انرژی ترک می‌کنند. سپس این اتم‌ها در محیط خلأ به سمت زیرلایه حرکت کرده و بر روی آن جمع می‌شوند و در نتیجه یک لایه نازک ایجاد می‌شود.

حد کندوپاش<sup>۱</sup> بیانگر نسبت اتم‌های جدا شده از هدف به ازای هر یون برخوردی به سطح است که به عنوان مقیاسی برای بازده فرآیند کندوپاش در نظر گرفته می‌شود.

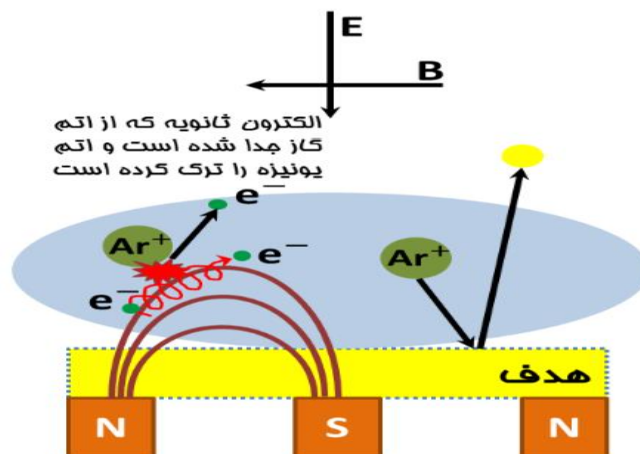
### انواع فرآیند کندوپاش

متداول‌ترین روش کندوپاش، کندوپاش مغناطیسی است که در آن میدان مغناطیسی به موازات سطح کاتد اعمال می‌شود که باعث می‌شود در حالت نورانی الکترون‌ها به جای طی مسیر به صورت مستقیم، به صورت مارپیچی حرکت کنند و علاوه بر این که الکترون‌ها پر انرژی‌تر می‌شوند، مسیر بیشتری را طی می‌کنند و اتم‌های بیشتری را یونیزه می‌کنند (شکل ۴-۵). بنابراین میدان مغناطیسی،

---

<sup>1</sup> Sputter Yield

پلازما را در اطراف سطح هدف محدود می‌کند که این دام الکترونی آهنگ برخورد بین الکترون‌ها و مولکول‌های گاز را که مسئول کندوپاش هستند، افزایش می‌دهد و سبب می‌شود که لایه‌نشانی در فشارهای پایین‌تر قابل انجام شود. میدان مغناطیسی با افزایش چگالی پلازما، چگالی جریان در هدف یا کاتد را افزایش می‌دهد و در نتیجه آهنگ کندوپاش افزایش می‌یابد. به دلیل پایین بودن فشار گاز، ذرات کنده شده فضای محفظه را بدون برخورد طی می‌کنند که منجر به افزایش آهنگ لایه‌نشانی می‌شود. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها، قابلیت لایه‌نشانی در مقیاس بزرگ را داراست. بنابراین برای کاربردهای صنعتی به طور گسترده استفاده می‌شود و به منظور افزایش آهنگ لایه‌نشانی از کندوپاش مغناطیسی استفاده می‌شود.



شکل ۴-۵: نمایی از کندوپاش مغناطیسی که در آن میدان مغناطیسی به موازات سطح کاتد است و باعث می‌شود الکترون‌ها به جای طی مسیر به صورت مستقیم به صورت مارپیچی حرکت کنند و الکترون‌ها پر انرژی‌تر می‌شوند و مسیر بیشتری را طی می‌کنند و اتم‌های بیشتری را یونیزه می‌کنند [۶۵].

چنانچه ولتاژ منبع تغذیه<sup>۱</sup> باشد، کندوپاش مستقیم نام دارد و معمولاً برای لایه‌نشانی فلزات به کار گرفته می‌شود. برای لایه‌نشانی مواد عایق و نیمه‌رسانا از پتانسیل فرکانس رادیویی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود.

برای برخی کاربردها به جای این که پلاسما، هدف را کاملاً احاطه کند، استفاده از پرتو یونی راحت‌تر است که کندوپاش پرتو یونی نامیده می‌شود. در کندوپاش واکنشی که کاربردهای الکترونیکی دارد، از گازهایی مانند  $H_2S$ ،  $N_2$ ،  $O_2$  استفاده می‌شود که کندوپاش واکنشی نام دارد. به عنوان مثال برای تولید کربن شبه الماسی از کندوپاش واکنشی استفاده می‌شود که با وارد کردن منابع گازی هیدروکربنی مانند متان، استیلن یا هیدروژن همراه با گاز آرگون به داخل محفظه خلأ، کندوپاش در حضور گازهای فعال متان و غیره انجام می‌شود.

سیستم‌های پیچیده‌تری برای لایه‌نشانی به روش کندوپاش وجود دارد که با آن می‌توان از یک هدف که ترکیبی از مواد است، استفاده کرد تا لایه ترکیبی ساخت. متداول‌ترین حالت سیستم کندوپاش، ساخت چند لایه‌ای‌ها است که هر لایه روی لایه زیرین خود قرار می‌گیرد و بیشتر مصارف الکترونیکی دارد.

---

<sup>1</sup> Direct Current

<sup>2</sup> Radio Frequency(RF)

## ۵-۴- سنتز اکسید قلع ( $\text{SnO}_2$ ) به روش اسپاترینگ R.F و ساخت قطعه‌ی

### حسگری آن

در ابتدا زیرلایه‌ی شیشه‌ای (لام آزمایشگاهی) را با محلول استون، اتانول و آب مقطر به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتیگراد در سه مرحله به وسیله‌ی سیستم التراسیونیک شستشو داده شد، ۱ بار به مدت ۱۵ دقیقه با محلول اتانول و آب مقطر در دمای ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد و ۱ بار هم به مدت ۶ دقیقه با آب مقطر در دما ۵۰ درجه‌ی سانتیگراد شسته شد. قابل توجه است که زیرلایه از جنس شیشه، یک زیرلایه‌ی عایق برای ایجاد یک مقاومت مناسب برای کاربرد در حسگری گاز ایجاد می‌کند. سپس با استفاده از دستگاه اسپاترینگ رومیزی با شرایط مناسب که توان دستگاه ۳۵ وات، فشار اولیه و همچنین فشار کاری برای تارگت طلا در حدود ۱۵۰ میلی‌تور برای سنتز طلا می‌باشد. زمان انجام این سنتز برای الکتروودگذاری بستگی به ضخامتی است که انتخاب می‌شود. ضخامت‌های معمول برای الکتروودگذاری حدود ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ نانومتر معادل ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ آنگستروم می‌باشد. الکترودهای شاخه‌ای از جنس طلا در حدود ۱۵۰ نانومتر بر روی زیرلایه‌ی شیشه‌ای سنتز شد. این الکتروودگذاری با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترون روبشی<sup>۱</sup> در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.

---

<sup>1</sup> Scanning Electron Microscope(SEM)



شکل ۵-۵: آنالیز SEM در زوم ۷۵۰ میکرون برای الکتروود شاخه‌ای ۱۵۰ نانومتری

الکتروود شاخه‌ای به دلیل نحوه‌ی اتصال آنها به دو نوع تقسیم‌بندی می‌شوند. الکتروود نوع (A) که به محل اتصال آنها در یک طرف قرار گرفته‌اند و الکتروود نوع (B) که محل اتصال دو سر آن در دو طرف الکتروود قرار دارند. نام‌گذاری این الکتروودها به صورت قراردادی می‌باشد. الکتروودهای نوع A و همچنین نوع B در شکل ۲-۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶-۵: الکتروودگذاری نوع A و B

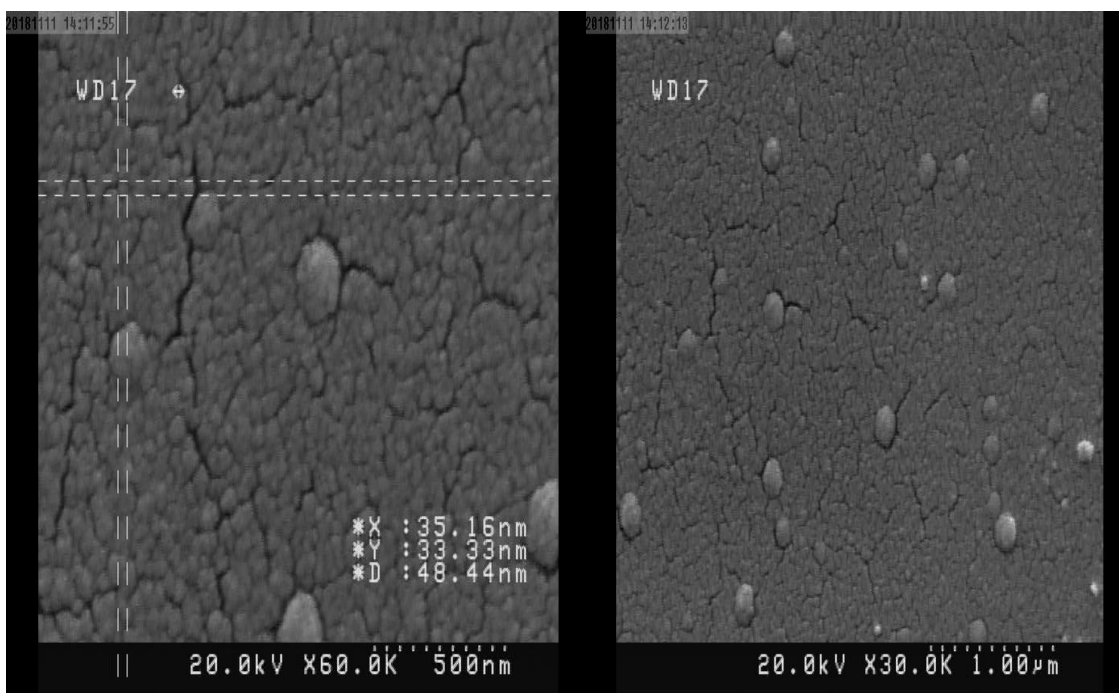
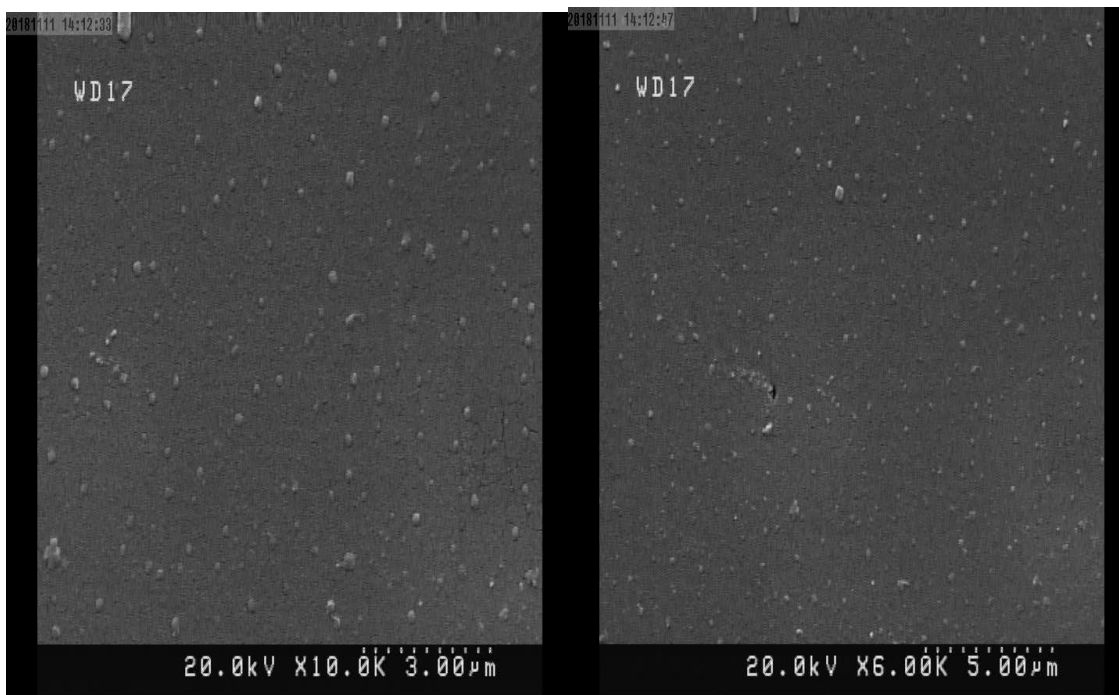
همان طور که گفته شد، در روش اسپاترینگ چندین پارامتر مهم هستند که شرایط سنتز را مشخص می‌کنند. پارامترهای مربوط به روش اسپاترینگ، توان دستگاه، ضخامت لایه‌ی ماده‌ی در حال سنتز، فشار اولیه، فشار کاری می‌باشند. با در نظر گرفتن شرایط مناسبی که در جدول ۱-۵ مطرح شده است، فرآیند سنتز اکسید قلع بر روی زیرلایه‌ی شیشه‌ای انجام شده است.

۱-۵: پارامترهای مربوط به روش اسپاترینگ RF برای سنتز اکسید قلع

پارامتر	مقدار	یکای اندازه‌گیری
فشار اولیه	$10^{-5}$	تور
فشار کاری	$5/98 \times 10^{-3}$	تور
توان	۱۱۲	وات
ضخامت	۱۵۵۴	آنگستروم

با اعمال این شرایط و وارد کردن گاز آرگون به مقدار ۲۰ sccm و گاز اکسیژن به مقدار ۱ sccm برای تعادل در ضرایب استوکیومتری، این سنتز با نرخ رشد ( $^{\circ}A/sec$ )  $0.17-0.15$  به مدت زمان ۸۷۸۲ ثانیه انجام شد.

در نتیجه، دو نوع فیلم نازک با تفاوت در نوع A و B الکتروود شاخه‌ای در میان زیرلایه و لایه‌ی سنتز شده‌ی اکسید قلع ساخته شد. از روش آنالیز SEM برای دستیابی به خصوصیات مورفولوژی سطح استفاده شده است. تصویرهای مربوط به آنالیز SEM از سطح سنتز شده‌ی اکسید قلع در زوم‌های مختلف در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۷: تصاویر آنالیز SEM در زوم‌های ۵/۰۰ میکرون، ۳/۰۰ میکرون، ۱/۰۰ میکرون و ۰/۵ میکرون برای سطح اکسید قلع

عملکرد سنجش گاز به ابعاد نانو ذرات و مورفولوژی سطح بستگی دارد [۶۸]. با استفاده از مورفولوژی سطح به این نتیجه می‌توان پی برد که اتم‌ها به صورت نانوذره با ابعاد حدود  $33/33 \text{ nm} \times 35/16 \text{ nm}$  بر روی زیرلایه و الکتروود شاخه‌ای با جنس طلا، لایه‌نشانی شده‌اند. در زوم ۳ میکرونی نشان داده شده است که تقریباً بصورت بالک یا با ابعاد درشت لایه‌نشانی شده‌اند و یک سطح تخلخل نسبتاً خوبی را برای حسگری یک گاز به وجود آورده است. در فرآیند حسگری گازی مقاومتی هر چه سطح تخلخل بیشتر باشد، گاز بهتر و مناسب‌تر می‌تواند با سطح تعامل داشته باشد و انتقال الکترونی خوب را دارا باشد. اما در زوم  $0/5$  میکرونی نشان داده شده است که نانو ذرات با ابعاد بسیار کوچک روی این بالک‌ها نشسته‌اند. وقتی به ابعاد کوچکتر دست پیدا می‌شود، زمان پاسخ و زمان بازیابی به دلیل انتقال سریع الکترون بین نانوذرات نشسته شده به صورت جفت تر که شامل یک سطح صافتر می‌باشد، بهبود پیدا می‌کنند.

## ۵-۵- نمودار حسگری گاز دی اکسید کربن با استفاده از نیمه‌هادی اکسید قلع

پس از ساخت فیلم نازک با دو نوع A و B، از آن‌ها برای حسگری گاز دی اکسید کربن مورد استفاده قرار گرفت. به منظور انجام فرآیند تشخیص گاز، دو طرف الکتروود شاخه‌ای از جنس طلا با دو نوع مشخص شده را به دو سیم بسیار نازک به وسیله‌ی چسب نقره متصل شد. یک طرف آن به قسمت ولتاژ مثبت و طرف دیگر به ولتاژ منفی حسگر وصل می‌شود. با این کار یک جریان (مقاومت) در قطعه‌ی مورد نظر ایجاد می‌شود. پس از اتصال فیلم نازک با روش بالا در سیستم حسگر به تشخیص گاز دی اکسید کربن پرداخته می‌شود.

حسگری به دو روش انجام می‌شود، تحریک سطح به روش UV، تحریک به روش افزایش دما. سیستم حسگری که با آن به تست تشخیص گاز توسط فیلم نازک انجام می‌شود در شکل ۵-۴ نشان داده شده است.



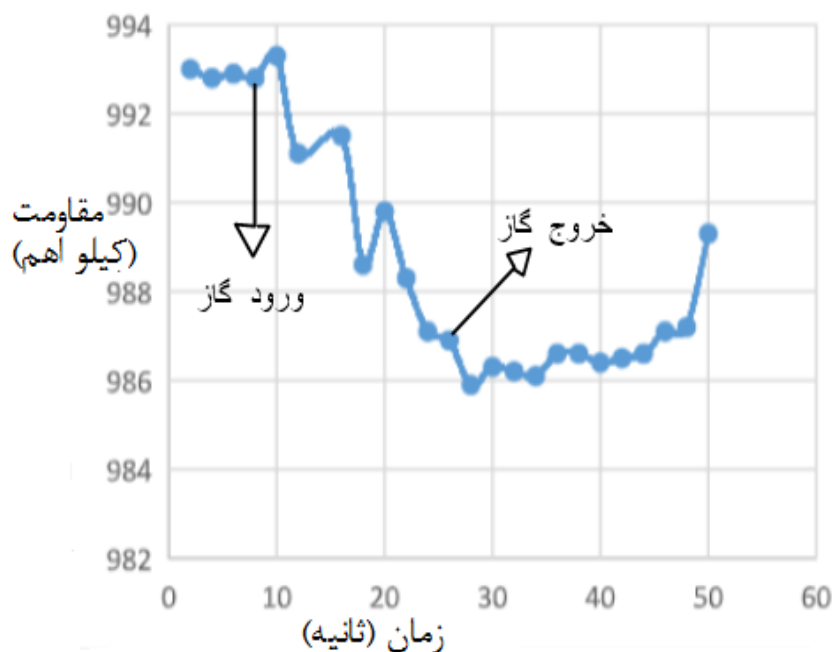


شکل ۵-۸: حسگر گازی مقاومتی با روش افزایش دما و UV

در مورد قطعه‌ی مورد مطالعه در این بخش، حسگری گاز دی اکسید کربن به روش تحریک UV، سطح برای هیچ کدام از دو نوع الکتروود انجام نشد و تغییری در نمودار مقاومت برحسب زمان بعد از تعامل گاز دی اکسید کربن با سطح به وجود نیامد. این بدین معنا می‌باشد که اشعه‌ی UV نتوانست سطح را طوری تحریک کند که باعث انتقال الکترون از سطح به گاز یا برعکس شود. در نتیجه حسگر پاسخی به گاز دی اکسید کربن نمی‌دهد. از این رو از روش دیگر (تحریک سطح به روش افزایش دما) برای تشخیص این گاز استفاده شد. در ابتدا دمای درون محفظه را تا دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد، سپس ۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد بالا برده شد. اما تحریک مناسبی برای سطح اتفاق نیوفتاد به همین دلیل دما تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتیگراد افزایش داده شد تا سطح به طور مناسبی برای انتقال الکترون تحریک شود. پس از آن به مدت چند دقیقه طول می‌کشد تا مقاومت ایجاد شده به صورت تقریبی ثابت شود. پس از وارد کردن ۶۰cc معادل ۱۵۰۰۰ ppm یعنی ۱/۵ درصد گاز دی اکسید کربن به محفظه‌ی گاز در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد تغییراتی را در نمودار مقاومت برحسب زمان برای قطعه با الکتروود نوع A ایجاد شد. این در حالی است که برای قطعه‌ی مربوط به نوع B تغییراتی مشاهده نشد. به طور کلی

از لحاظ تئوری حسگری برای هر دو نوع می‌تواند کاملاً یکسان باشد. یکی از دلایلی که قطعه نوع B تغییراتی در مقاومت در هنگام حضور گاز نداشته است، می‌تواند یک قطع شدگی در شاخه‌های الکتروود باشد و مانع از رخ دادن جریان در قطعه می‌شود. این قطع شدگی می‌تواند در هنگام الکتروودگذاری باشد یا اینکه قالب الکتروود به خوبی تمیز نباشد.

با استفاده از یک مولتی‌متر می‌توان تغییرات مقاومت ایجاد شده را اندازه گرفت و خروجی آن را در نرم‌افزار مربوط به آن روی رایانه اندازه‌گیری کرد. تغییرات مقاومت در اثر ورود گاز در قطعه‌ی نوع A نشان دهنده‌ی نحوه‌ی پاسخ این حسگر به گاز دی‌اکسید کربن می‌باشد. که در شکل ۵-۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۹: نمودار تغییر مقاومت بر حسب زمان برای فیلم نازک اکسید قلع در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد

این نمودار تغییر مقاومت برحسب زمان می‌باشد که نشان می‌دهد با ورود گاز در زمان ۹ s مقاومت کاهش یافته است. تحلیل این کاهش مقاومت، انتقال الکترون از سطح اکسید قلع نوع n به گاز دی اکسید کربن پذیرنده باشد. این کاهش مقاومت به عنوان پاسخ سنسور نسبت به گاز دی اکسید کربن می‌باشد.

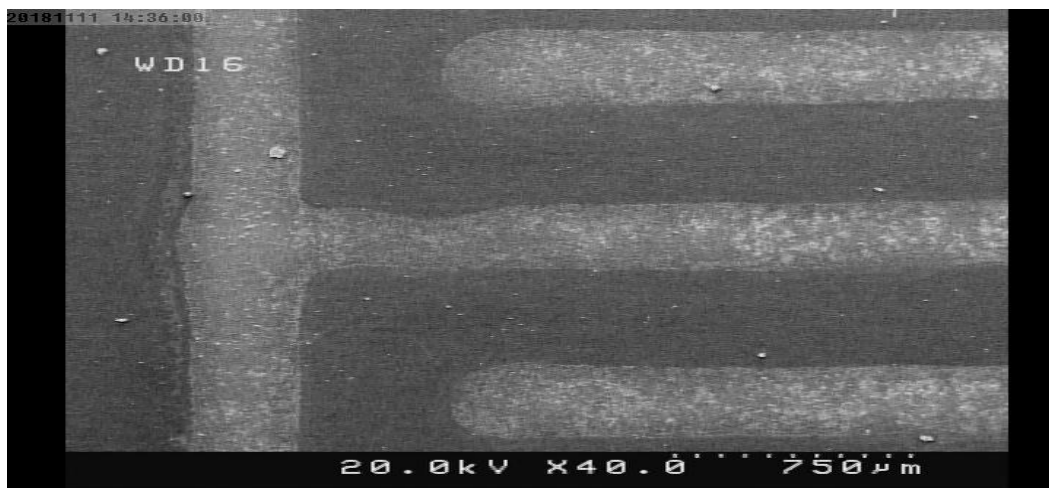
با استفاده از نمودار به دست آمده می‌توان به چند پارامتر مهم در مورد سنسورها دست پیدا کرد. این پارامترها شامل زمان پاسخ، زمان بازیابی و حساسیت سنسور نسبت به گاز کربن دی اکسید می‌باشند. زمان پاسخ به عنوان ۹۰ درصد تغییر مقاومت (۹۰ درصد از منحنی کاهش یافته) تعریف می‌شود که در شکل ۵-۵ نشان داده شده که زمان پاسخ حسگر بر پایه‌ی نیمه‌هادی اکسید قلع نسبت به گاز دی اکسید کربن با ورود گاز در زمان ۸ s و خروج گاز در زمان ۲۶ s، در حدود ۱۴ s می‌باشد. زمان بازیابی به مدت زمانی اطلاق می‌شود که در طی این زمان حسگر پس از خروج گاز به یک مقاومت ثابتی دست پیدا می‌کند. به طور دقیق تر ۹۰ درصد زمانی که طول می‌کشد تا حسگر به طور کامل به مقاومت ثابت خود برگردد یا حسگر بازیابی شود. زمان بازیابی برای این حسگر، به طور تقریبی زیر ۱۷ s به دست آمده است. پارامتر حساسیت در مفهوم، حد آستانه‌ی غلظتی از گاز که مقاومت ثابت به وجود آمده شروع به تغییر می‌کند. حساسیت در حسگرهای گازی مقاومتی با فرمول، (مقاومت هوا منهای مقاومت گاز) تقسیم بر مقاومت هوا به دست می‌آید. پارامتر حساسیت معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود. حسگر مقاومتی اکسید قلع طبق شکل ۵-۵ دارای حساسیت ۷۵ درصدی می‌باشد.

## ۵-۶- سنتز اکسید روی (ZnO) به روش اسپاترینگ R.F و ساخت قطعه حسگری

### آن

طبق بخش قبل برای ساخت قطعه‌ی حسگری، جنس زیرلایه، شیشه (لام آزمایشگاهی) انتخاب شد. زیرلایه را یک بار در دمای اتاق در محلول استون، اتانول و آب مقطر به مدت ۲۰ دقیقه، سه بار در محلول آب مقطر و اتانول در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۰ دقیقه و یک مرتبه با آب مقطر در دمای ۵۰ درجه‌ی سانتیگراد شستشو داده شده است. دلیل کمتر استفاده شدن از استون در شستشو فرض بر عدم کاهش بیشتر چسبندگی شیشه بوده است. هرچند خود شیشه چسبندگی خوبی را دارا نیست و با نشاندن ۱۰ نانومتر کروم بر روی شیشه می‌توان چسبندگی شیشه را بالا برد.

بعد از شستن کامل زیرلایه‌ی شیشه‌ای، با استفاده از دستگاه اسپاترینگ رومی‌زی، الکتروود شاخه‌ای از جنس طلا به ضخامت ۹۰ نانومتر با شرایطی که در بخش سنتز اکسید قلع بیان شد، بر روی زیرلایه، لایه‌ی نشانی شد. شکل ۵-۶ تصویر آنالیز SEM این الکتروود گذاری را به خوبی در زوم ۷۵۰ میکرومتر نشان داده شده است.



شکل ۵-۱: تصویر آنالیز SEM برای الکتروود شاخه‌ای از جنس طلا با ضخامت ۹۰ نانومتر

همان‌طور که در بخش قبل برای سنتز اکسید قلع به روش اسپاترینگ شرایط نسبتاً مناسبی را اتخاذ کرده بودیم نیز در این کار از شرایط متوسطی شروع به انجام سنتز برای اکسید روی با روش اسپاترینگ امواج رادیویی شد. توجه داشته باشید که در این بخش نیز الکترودهای نوع A و همچنین B نیز وجود دارند. در اولین شرایط سنتز برای لایه‌نشانی اکسید روی بر روی زیرلایه‌ی تهیه شده، سنتز طبق شرایطی که در جدول ۲-۵ بیان شده است، انجام می‌شود.

جدول ۲-۵: پارامترهای مربوط به اسپاترینگ RF برای سنتز اکسید روی

پارامتر	مقدار	یکای اندازه‌گیری
فشار اولیه	$10^{-5}$	تور
فشار کاری	$5/98 \times 10^{-3}$	تور
توان	۱۱۲	وات
ضخامت	۱۵۵۴	آنگستروم

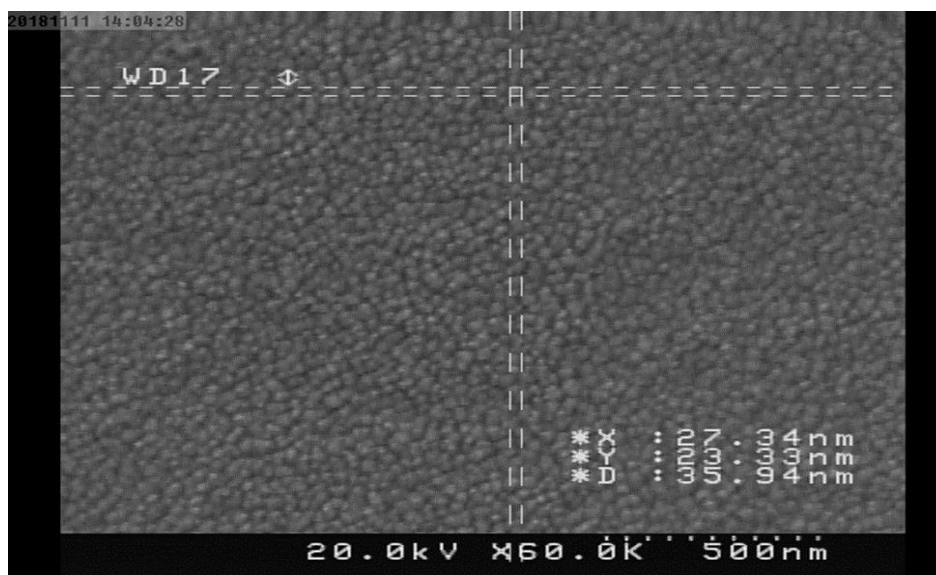
سنتز انجام شده با استفاده از شرایط در جدول ۲-۵ در مدت زمان ۴۴۳۸ s و با نرخ رشد ( $^{\circ}A/sec$ )  $1/2-1/5$  بود.

پس از انجام تست‌های حسگری مربوط به گاز دی اکسید کربن (شکل ۱۵-۵) مشاهده شد که پاسخ مناسبی به این گاز تحت این شرایط داده شد و مشکل نویزی بودن حسگرهای تجاری‌سازی شده‌ی قبل را حل کرد. با این وجود، زمان پاسخ و زمان بازیابی خوبی را دارا نیست (در بخش بعد به این موضوع پرداخته می‌شود). به همین دلیل به دنبال بهبود این مشخصه‌ها با تغییر در پارامتر توان یا بهینه‌سازی برای پارامتر توان در دستگاه اسپاترینگ انجام شد. در ادامه مشاهده می‌شود که این تغییرات در پارامتر توان باعث کوچکتر شدن ابعاد نانو ذرات می‌شود. که طبق [۶۶]، هرچه ابعاد نانو ذرات کوچکتر شوند می‌توان به زمان پاسخ و زمان بازیابی مناسب‌تری دست یافت. در فرآیند بهینه‌سازی تمام پارامترها به

جز توان ثابت نگه داشته می‌شوند و پارامتر توان را به مقدار ۱۰ وات کاهش داده می‌شود (توان ۱۰۷ وات). این فرآیند را دو مرتبه‌ی دیگر در همان پارامترهای ثابت اما در توان‌های مختلف انجام شد. که به ترتیب، توان در این دو مرتبه به ترتیب ۹۷ وات و ۸۷ وات می‌باشد. برای جلوگیری از سردرگمی، شرایط سنتز براساس توان‌های تغییر یافته به چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند.

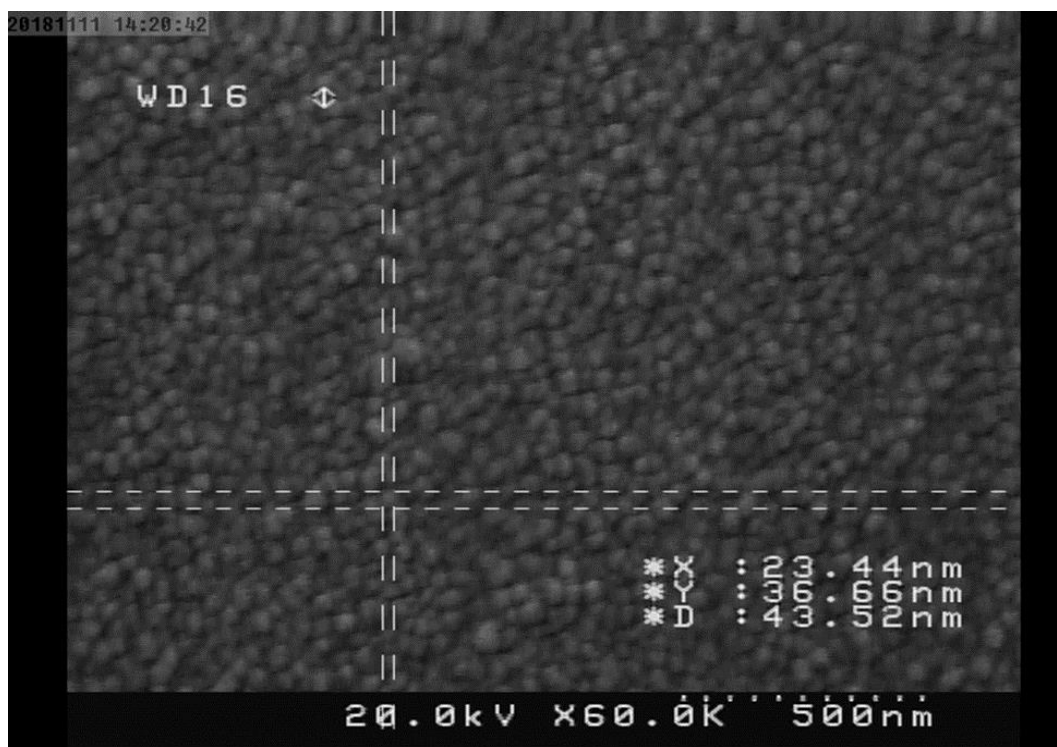
الف) توان ۱۱۷ وات (Z1) ب) توان ۱۰۷ وات (Z2) ج) توان ۹۷ وات (Z3) د) توان ۸۷ وات (Z4)

**Z1: توان ۱۱۷ وات.** سنتز با شرایط تعیین شده در جدول ۵-۲ انجام شده است. تصویر آنالیز SEM مربوط به این شرایط در شکل ۵-۷ نشان داده شده است.



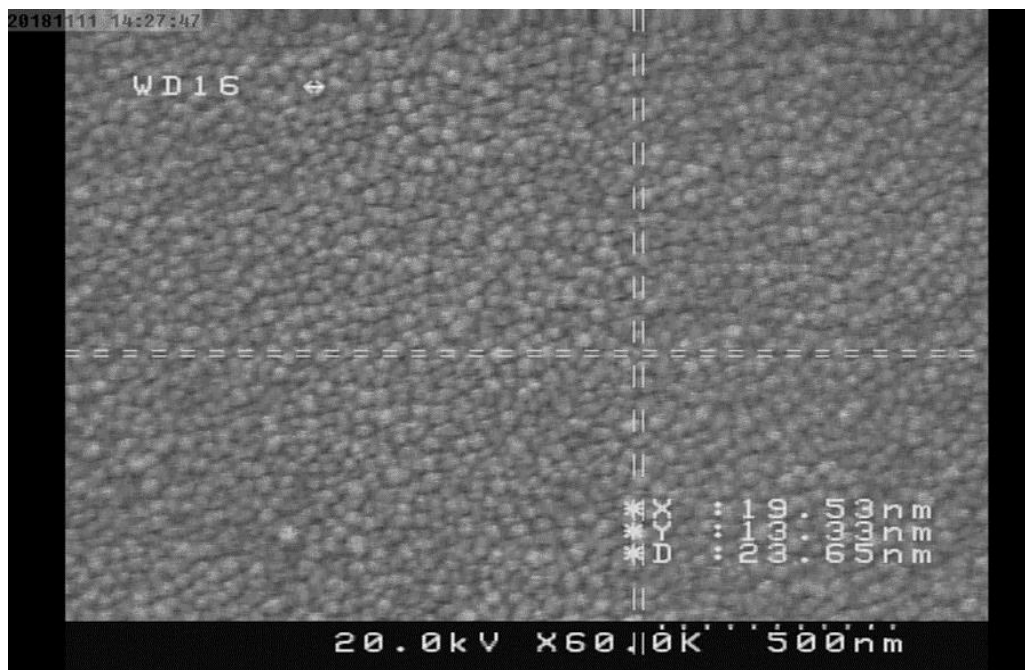
شکل ۵-۱۱: تصویر آنالیز SEM در زوم ۵/۰ میکرون برای قطعه‌ی Z1

**Z2: توان ۱۰۷ وات.** با تغییر توان نسبت به شرایط (Z1) و ثابت نگه داشتن بقیه‌ی پارامترها، سنتز برای بار دوم انجام شد. تصویر آنالیز SEM آن در شکل ۵-۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: تصویر آنالیز SEM در زوم ۰/۵ میکرون برای قطعه‌ی Z2

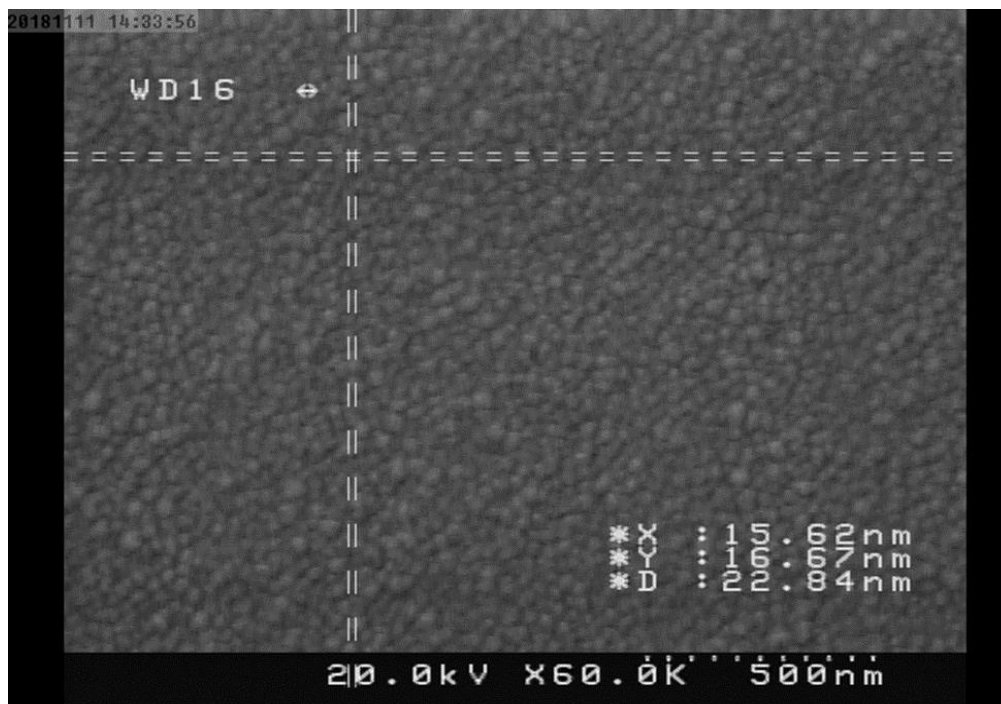
**Z3: توان ۹۷ وات.** در مرحله‌ی سوم سنتز نیز توان نسبت به شرایط (Z1) ۲۰ وات کم می‌شود. یعنی توان را نسبت به شرایط (Z2) ۱۰ وات کاهش داده می‌شود. تصویر آنالیز SEM اکسید روی سنتز شده با شرایط Z3 در شکل ۵-۹ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۳: تصویر آنالیز SEM در زوم ۰/۵ میکرون برای قطعه Z3

**Z4: توان ۸۷ وات.** دوباره شرایط سنتز گفته شده در مراحل قبل مورد استفاده قرار می‌گیرد با این تفاوت که توان به اندازه‌ی ۱۰ وات نسبت به حالت (Z3) کاهش پیدا کرده است. آنالیز SEM مربوط به این شرایط نیز در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. طبق آنالیزهای SEM گرفته شده در هر یک از این شرایط، به وضوح دیده می‌شود که وقتی توان از ۱۱۷ وات به ۸۷ وات کاهش می‌یابد، اندازه‌ی نانو ذرات نیز کوچکتر و کوچکتر می‌شود. به عبارتی دیگر هر چه توان کمتر می‌شود، دانه‌های نشانده شده بر روی سطح کوچکتر می‌شوند. در بخش بعد تاثیر کوچک تر شدن نانو ذرات بر نمودارهای حسگری گاز دی‌اکسید کربن مورد مطالعه قرار می‌گیرد.





شکل ۵-۱۴: آنالیز SEM در زوم ۰/۵ برای قطعه‌ی Z4

که این سنتز با نرخ رشد ( $^{\circ}A/sec$ )  $4/1 - 3/9$  در مدت زمان  $1074 s$  به خوبی انجام شد.

با توجه به شکل ۵-۱۰، نانو ذرات رشد داده شده بر روی سطح با ابعاد  $22/84 nm \times 16/67 nm$   $\times 15/62$  می‌باشند. به وضوح در بخش ۵-۷ نشان داده می‌شود که هر چه توان کوچکتر می‌شود ابعاد نانو ذرات نیز کوچکتر می‌شود و هر چه ابعاد نانو ذرات کوچکتر می‌شود، زمان پاسخ و زمان بازیابی سریع‌تر می‌شود.

## ۵-۷- نمودار حسگری گاز کربن دی‌اکسید با استفاده از فیلم‌های نازک اکسید

### روی

با استفاده از چسب نقره، دو سیم نازک را به دو طرف الکتروود متصل می‌شود. و از آن برای انجام

تست حسگری استفاده می‌شود.

پس از تحریک نشدن سطح با روش UV، نمونه درون محفظه در سیستم حسگری گذاشته می‌شود

و در دماهای مختلف به تحریک کردن سطح پرداخته شد. در نهایت سطح نمونه در دمای ۳۰۰ درجه

سانتیگراد به انجام تست‌های حسگری پرداخته می‌شود. پس از وارد کردن ۶۰ cc معادل ۱۵۰۰۰ ppm

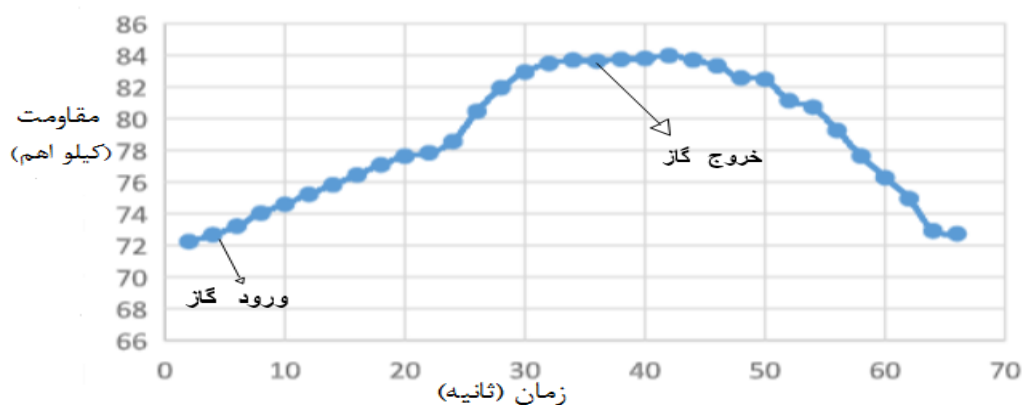
یعنی ۱/۵ درصد گاز دی‌اکسید کربن در محفظه گازی، نمودار تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای

هر چهار شرایط سنتز در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند. به یاد داشته باشید که همه‌ی نمودارها برای

الکتروود نوع B می‌باشد. این در حالی می‌باشد که قطعه‌ی مربوط به نوع A نیز در حسگری پاسخ داد.

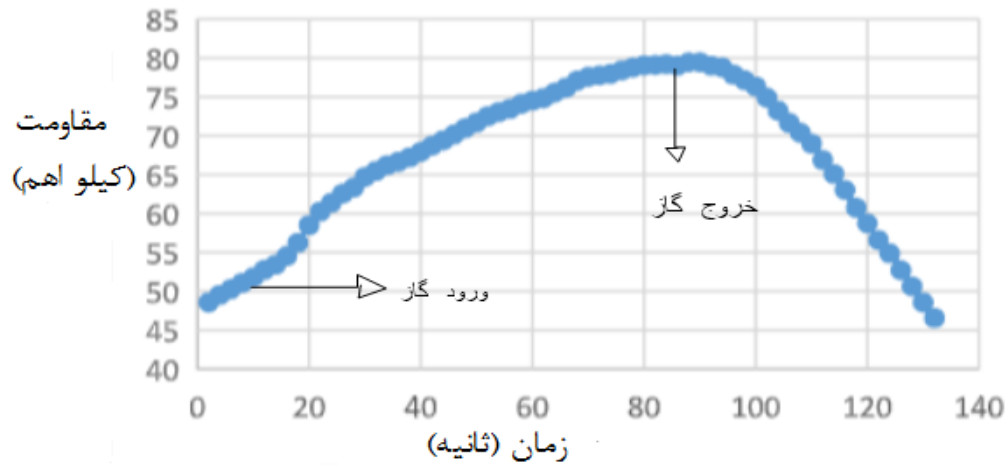
اما پاسخ آن بسیار ضعیف بوده است. و ترجیح داده شد که حسگری با قطعه‌ی نوع B انجام شود.

Z1:



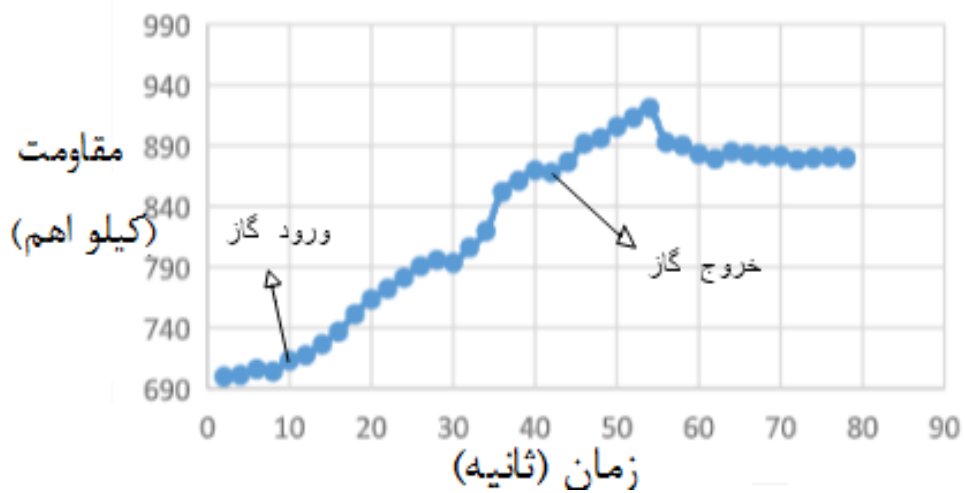
شکل ۵-۱۵: تغییرات مقاومت (کیلو اهم) بر حسب زمان (ثانیه) برای فیلم نازک Z1 در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد

Z2:



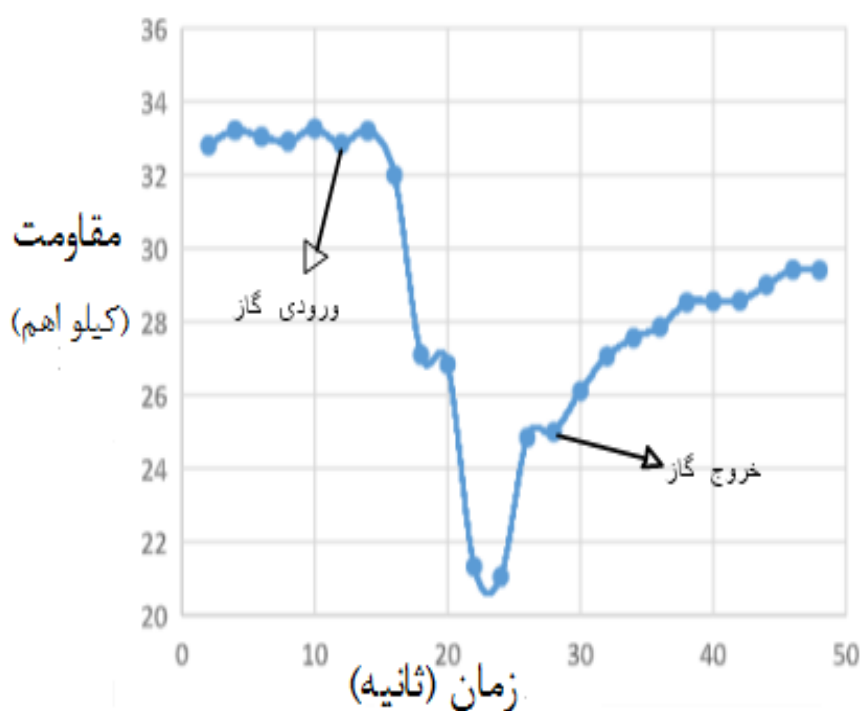
شکل ۵-۱۶: تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای فیلم نازک Z2 در ۳۰۰ درجه سانتیگراد

Z3:

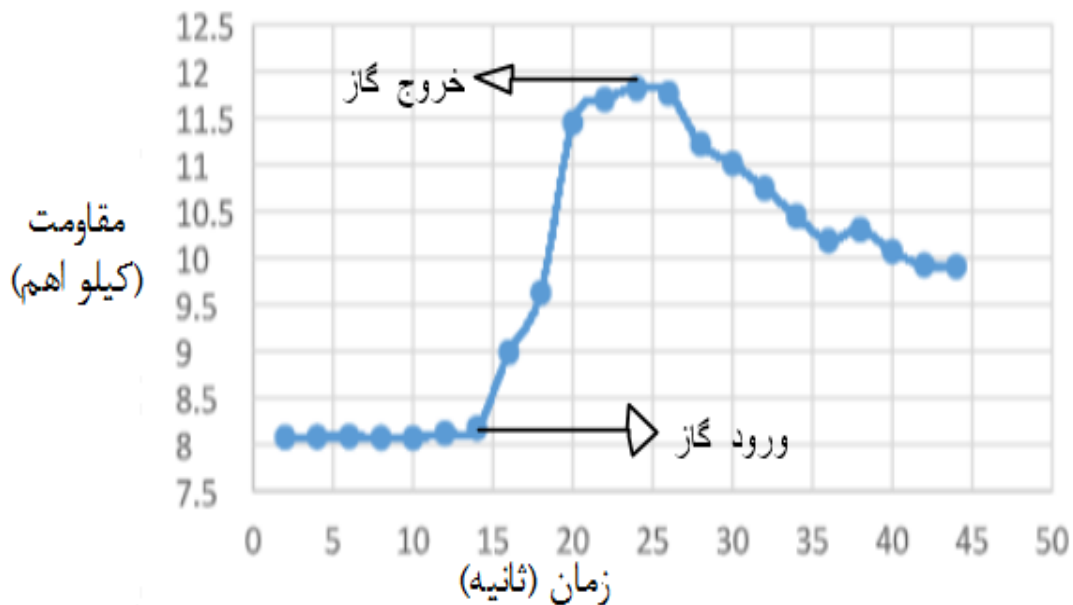


شکل ۵-۱۷: تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای فیلم نازک Z3 در ۳۰۰ درجه سانتیگراد

Z4: در این شرایط نمودارهای تغییر مقاومت (مگا اهم) برحسب زمان (ثانیه) دو رفتار متفاوت از خود نشان دادند که برای اولین تست (Z4,1) کاهش مقاومت و اما در مرحله‌ی دوم (Z4,2) تست‌گیری گاز دی‌اکسید کربن، مقاومت افزایش می‌یابد. به همین منظور هر دو نمودار در زیر نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۸: نمودار تغییرات مقاومت برحسب زمان برای فیلم نازک Z4,1 در ۳۰۰ درجه سانتیگراد



شکل ۵-۱۹: تغییرات مقاومت برحسب زمان برای فیلم نازک Z4,2 در ۳۰۰ درجه سانتیگراد

طبق مدل دبای قطعه نوع n بوده و گاز الکترون از سطح گرفته است. پس باعث کاهش مقاومت می‌شود. جالب توجه است که هر دو اتفاق در یک نمونه و به فاصله‌ی چند ساعتی تست گرفته شده است. برای پی بردن به این پدیده نیاز به آزمایشات دیگری چون اثر هال می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که نظرات محققان در این زمینه این بوده است که این پدیده برای سطوح با تخلخل بسیار بالا اتفاق می‌افتد.

حال به بررسی سه پارامتر حساسیت، زمان پاسخ و زمان بازیابی برای سنسور گازی مقاومتی برپایه اکسید روی در شرایط مختلف سنتز باهم مقایسه می‌شود. مقادیر این سه پارامتر در جدول ۵-۳ بیان شده است.

جدول ۳-۵: پارامترهای حسگری گاز کربن دی‌اکسید در شرایط‌های مختلف سنتز ZnO

نام قطعه	زمان پاسخ (S)	زمان بازیابی (S)	حساسیت (%)
Z1	۳۶	۲۳	۱۷
Z2	۸۱	۳۷	۶۶
Z3	۲۷	۱۸	۳۵
Z4,1	۱۲	۱۳	۳۳
Z4,2	۹	۱۴	۴۶

به وضوح می‌توان دید که قطعه‌ی (Z4) دارای بهترین زمان پاسخ و بهترین زمان بازیابی نسبت به دیگر قطعات به دلیل کوچکترین ابعاد نانو ذرات می‌باشد. اما در قطعه‌ی (Z2) با این‌که زمان پاسخ و زمان بازیابی خوبی ندارد اما دارای بهترین پارامتر حساسیت در بین دیگر قطعات می‌باشد. بنابراین، تغییر پارامتر توان در شرایط سنتز، مشکل زمان پاسخ و زمان بازیابی را نیز حل کرده است.

توجه داشته باشید که قطعه‌ی SnO<sub>2</sub> در شرایط بهینه نشده‌ای سنتز شده و با آن تست حسگری انجام شد. با این حال، این سنسور دارای زمان پاسخ ۱۴ ثانیه، زمان بازیابی ۱۶ ثانیه و حساسیت ۷۵ درصدی است. که نسبت به سنسور مقاوم‌تری ZnO دارای پارامترهای حسگری مناسب‌تری می‌باشد.

## ۵-۸- مقایسه‌ی پارامترهای حسگری بین حسگرهای مقاومتی و حسگر مادون قرمز

### قرمز

طبق نتایج داده‌های موجود در فصل ۴ می‌توان به این نتیجه پی برد که، حسگرهای مادون قرمز غیر پراکنده دارای حساسیت بسیار بالایی از گاز دی اکسید کربن دارد. این در حالی می‌باشد که حسگرهای گازی مقاومتی مانند  $\text{SnO}_2$  نیز حساسیت نسبتاً خوبی به همراه قطعه‌ی Z2 با نانوساختار ZnO دارند. با بررسی تاثیر کاتالیست‌ها این پارامتری تواند بهبود یابد.

حسگرهای گازی مادون قرمز غیر پراکنده، زمان پاسخ بسیار سریع در کم‌تر از ۱۰ ثانیه دارند. قطعه‌ی  $\text{SnO}_2$  و همچنین قطعه‌ی Z4 مربوط به ZnO نیز دارای زمان پاسخ نسبتاً خوبی هستند. با توجه به نمودارهای مقاومتی که در بخش قبل برای حسگرهای  $\text{SnO}_2$  و ZnO به دست آمد و با توجه به داده‌های جدول ۵-۳، زمان بازیابی برای حسگرهای مقاومتی با توجه به قطعه‌های گوناگون، بین ۱۰ تا ۲۰ ثانیه نیز بوده‌اند. همچنین حسگرهای مادون قرمز نیز از زمان بازیابی مناسبی برخوردارند.

بنابراین، حسگرهای مقاومتی بر پایه‌ی اکسیدهای فلزی  $\text{SnO}_2$  و ZnO که در اینجا ساخته شده است، می‌توانند جایگزین مناسبی برای حسگرهای نوپیزی باشند. و می‌توانند به دلیل هزینه‌ی کم و همچنین بدون محدودیتی در تهیه‌ی مواد در بازار ایران به جای حسگرهای مادون قرمز با هزینه‌ی بالا، توانایی صنعتی شدن را دارند.

## ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات:

درست به نظر می‌رسد که حسگرهای نوری حساسیت بهتر و مناسب‌تری نسبت به حسگرهای مقاومتی دارند، اما به دلیل گران بودن در تجاری سازی و همچنین تحریم‌ها که باعث عدم تهیه قطعات گسیل کننده و آشکارساز به دلیل کاربردهای نظامی آنها می‌شود، این حسگرها با محدودیت همراه هستند.

اما تست‌های حسگری نانو ساختارها نشان داده‌اند که می‌توانند به عنوان حسگرهای ارزان قیمت در صنعت کاربرد داشته باشند. و تقریباً جایگزین مناسبی برای حسگرهای نوری باشند.

پارامترهای حسگری نظیر حساسیت در حسگرهای مقاومتی اکسید فلزی ZnO می‌توانند با بررسی تاثیر کاتالیست‌ها و همچنین نحوه‌ی الکتروود گذاری بهبود یابند. حسگرهای مقاومتی اکسید فلزی SnO<sub>2</sub> نسبت به حسگرهای مقاومتی اکسید فلزی ZnO از حساسیت بهتری برخوردارند. با این حال این حسگرها نیز نیاز به بهینه‌سازی‌های مناسبی در پارامترهای سنتز آنها دارند. همچنین می‌توان از سنتز اکسید قلع و اکسید روی به طور کامپوزیتی استفاده کرد و نتیجه‌ی حسگری مناسب‌تری را ارائه داد.

همچنین با تغییر مناسب در پارامترهای دیگر نظیر ضخامت زیرلایه، جنس زیرلایه، بهینه‌سازی پارامترهای سنتز به روش‌های مختلف، می‌توان پارامترهای حسگری را توسعه داد. با تحقیق و مطالعه‌ی بیشتر در عوامل موثر گفته شده در بالا بر روی پارامترهای حسگری، قطعاً می‌توان به حسگرهای ایده‌آل‌تری برای جایگزینی این حسگرها به جای حسگرهای نوری مادون قرمز دست یافت.



# پیوست

## الف) ضرایب انشتین برای سیستم‌های دو سطحی

اساس این روش شامل حل معادله‌ی شرودینگر وابسته به زمان در حضور پتانسیل متحرک است. برای درک فیزیکی آن، یک سیستم ساده مولکولی را که هر یک از آنها می‌تواند در دو حالت با انرژی‌های  $E_l$  و  $E_u$ ، که  $E_l < E_u$  می‌باشد را در نظر می‌گیریم. جمعیت مربوط به این حالت‌ها،  $N_l$  و  $N_u$ ، در یک دمای  $T$  با تابع توزیع بولتزمن ارتباط دارد. بطوری که:

$$\frac{g_l}{N_l} \exp\left(-\frac{E_l}{KT}\right) = \frac{g_u}{N_u} \exp\left(-\frac{E_u}{KT}\right) \quad (1)$$

که  $g_l$  و  $g_u$ ، افت حالت‌ها و  $K$  ثابت بولتزمن می‌باشد. که فرمول ۱-۲ می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$\frac{N_l}{N_u} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(\frac{h\nu_{ul}}{KT}\right) \quad (2)$$

که  $E_u - E_l = h\nu_{ul}$  تعریف می‌شود.

پس از محاسبه‌ی مختصر کوتاهی، ضرایب انشتین با فرمول‌های زیر داده می‌شوند:

$$g_l B_{lu} = g_u B_{ul}$$

$$A_{ul} = \frac{8\pi h\nu_{ul}^3}{c^3} B_{ul}$$

تعداد انتقال‌های تحریک شده از سطح انرژی  $E_l$  به سطح انرژی  $E_u$ ، به علت تابش در محدوده‌ی

$\vartheta$  تا  $\vartheta + d\vartheta$ :

$$-\frac{c}{h\nu} d\rho_{\vartheta} d\vartheta \quad . s$$

در نتیجه تعداد کلی انتقال‌ها در واحد با فرمول زیر داده می‌شود.

$$N_{tr} = \int_{\Delta\vartheta_{ul}} \frac{c\rho_{\vartheta} K_{L,\vartheta}}{h\nu} d\vartheta \quad (3)$$

که  $\Delta\vartheta_{ul}$  نشان دهنده‌ی یکپارچگی بیش از عرض خطی در فرکانس  $\nu_{ul}$  است. اگر خط طیفی

بسیار نازک باشد  $\rho_{\theta}$  تغییرات چندانی نخواهد کرد.

$$N_{tr} = \frac{c\rho_{\theta ul}}{h\vartheta_{ul}} \int_{\Delta\vartheta_{ul}} K_{l,\vartheta} d\vartheta \quad (4)$$

انتشار تحریک شده به تابش برخوردی مربوط می‌شود، و این را می‌توان با تفاوت در تعداد انتقال‌های القایی (تحریکی)  $u$  به  $l$  و  $l$  به  $u$  بیان کرد. با توجه به ضرایب انشتین داریم:

$$N_{tr} = (N_l B_{lu} - N_u B_{ul}) \rho_{\theta lu} \quad (5)$$

ضرایب جذب گازها در شرایط عادی متناسب با چگالی ذره است. و بنابراین جذب خط یکپارچه شده را به عنوان انتگرال جذب طیفی تقسیم بر فشار  $p$  و سرعت موج  $c$  به دست می‌آید.

$$S_{lu} = \frac{1}{pc} \int_{\Delta\vartheta_{ul}} K_{l,\vartheta} d\vartheta \quad (6)$$

از (4)، (5)، (6) و  $(\rho_{\theta ul} = \frac{8\pi h\vartheta^3}{c^3} (\exp(\frac{h\vartheta_{ul}}{KT}) - 1)^{-1})$  خواهیم داشت که:

$$\begin{aligned} S_{lu} &= \frac{1}{pc} \frac{h\vartheta_{ul}}{c \rho_{\theta ul}} N_{tr} = \frac{h\vartheta_{ul}}{pc^2} (N_l B_{lu} - N_u B_{ul}) \\ &= \frac{h\vartheta_{ul}}{pc^2} N_l B_{lu} (1 - \frac{N_u B_{ul}}{N_l B_{lu}}) = \frac{h\vartheta_{ul}}{pc^2} N_l B_{lu} (1 - \exp(-\frac{h\vartheta_{ul}}{KT})) \\ S_{lu} &= \frac{h\vartheta_{ul}}{pc^2} N_l B_{lu} (1 - \exp(-\frac{h\vartheta_{ul}}{KT})) \quad (7) \end{aligned}$$

بیان اینکه ضریب جذب با فشار متناسب است، درست نیست. زیرا به طور واقعی ضرایب جذب متناسب با چگالی هستند و فقط متناسب با فشار در یک دمای ثابت است. این یک روش استاندارد رایجی در دینامیک گازها است و بهتر است که از واحد چگالی استاندارد استفاده شود. به جز اینکه معمولاً به جای چگالی، فشار اندازه‌گیری شود. واحدهایی مناسب برای طول مسیر نوری در نظر می‌گیریم و همان‌طور که در بالا بیان شد، واحدها برای شدت خط یکپارچه می‌باشد. اگر چه فرمول‌های بالا از لحاظ فیزیکی صحیح‌تر می‌باشند، اما این مرحله به کار بالا بستگی دارد و ارتباط داده‌ها را آسان‌تر می‌کند.

$$S_{lu} = \frac{1}{pc} \int_{\Delta\vartheta_{ul}} K_{l,\vartheta} d\vartheta \quad (\text{atmagat})^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

می‌توان با ضرایب انشتین شدت خط را برای یک گذار محاسبه کرد. مقدار  $S_{lu}$  مستقل از شکل خط است و با  $K_{l,\vartheta}$  داده می‌شود. توجه داشته باشید زمانی که این روش را برای مولکول دی‌اکسید کربن اعمال می‌کنید، کافی است  $l$  و  $u$  شامل چندین عدد کوانتومی باشد. بایستی  $S_{lu}$  را برای اعداد کوانتومی مناسب جمع بزنیم تا جذب باند یکپارچه‌ای به دست آورده شود.

### (ب) روش مکانیک کوانتومی برای تعیین ضرایب انشتین

در اینجا از یک روش اختلالی که اعتبار آن بر پایه‌ی فرض استوار است، استفاده می‌شود. و هامیلتونی تابش فقط یک اثر کوچک در حالت ناپیوستگی سیستم دارد. معادله شرودینگر:

$$H\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (8)$$

که  $H$  اپراتور هامیلتونی کل می‌باشد.  $H = H^0 + H'$  تعریف می‌شود.  $H^0$  اپراتور هامیلتونی تعادلی و  $H'$  اپراتور هامیلتونی مختل شده است. اگر  $H'$  صفر باشد، حل معادله:

$$H^0\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (9)$$

و  $\psi = \psi_n^0$  و  $\psi_n^0$  نشان دهنده‌ی یک مجموعه‌ی کامل از توابع موج است که می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\psi_n^0(q, t) = \psi_n^0(q) \exp\left(-\frac{itE_n}{\hbar}\right)$$

که  $E_n$  انرژی حالت  $\psi_n^0$  می‌باشد. برای  $H'$ ‌های غیر صفر معادله‌ی شرودینگر به صورت زیر است.

$$(H^0 + H')\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (10)$$

برای حل این معادله  $\psi = \sum_n c_n(t) \psi_n^0(q, t)$  را در نظر می‌گیریم و با جایگذاری آن را در معادله‌ی (۱۰):

$$\sum_n H^0 c_n(t) \psi_n^0(q, t) + \sum_n \dot{c}_n(t) \psi_n^0(q, t) = i\hbar \sum_n \frac{dc_n}{dt} \psi_n^0(q, t) + i\hbar \sum_n c_n(t) \frac{\partial \psi_n^0}{\partial t} \quad (11)$$

از این معادله می‌توان فهمید که ترم‌های اول و آخر با هم برابر هستند، پس:

$$\psi_n^0(q, t) = i\hbar \sum_n \frac{dc_n}{dt} \psi_n^0(q, t) \quad (12)$$

$$\sum_n \dot{c}_n(t)$$

$|C_N(T)|^2$  غلظت کسری از  $\psi_n^0(q, t)$  در حالت  $\Psi(q, t)$  می‌باشد. برای بدست آوردن نسبت تغییر غلظت هر حالت،  $\psi_m^{0*}$  را در دو طرف معادله‌ی (۱۲) ضرب می‌شود و از تمام فضا انتگرال گرفته می‌شود:

$$i\hbar \int \psi_m^{0*} i\hbar \sum_n \frac{dc_n}{dt} \psi_n^0 d\tau = \int \psi_m^{0*} \sum_n \dot{c}_n(t) \psi_n^0 d\tau \quad (13)$$

از آنجا که  $\psi_n^0$  یک مجموعه‌ی کامل می‌باشد.  $\int \psi_m^{0*} \psi_n^0 d\tau = \delta_{mn}$ . بنابراین سمت چپ معادله:

$$\frac{dc_m}{dt} = \sum_n \frac{1}{i\hbar} c_n \int \psi_m^{0*} H' \psi_n^0 d\tau \quad (14)$$

به طور کلی این معادله فاقد کاربرد فیزیکی به عنوان یک موضوع است. اما انتگرال سمت راست مربوط به احتمال تغییرات از حالت  $m$  به حالت  $n$  به علت حضور هامیلتونی اختلالی است. می‌توان ثابت کرد که برای یک میدان تابشی، هامیلتونی اختلالی  $H'$  دارای فرم زیر است.

$$H' = \sum_j \frac{2\pi e_j}{c m_j} \underline{A} \cdot \nabla_j \quad (15)$$

که  $e_j$  بار ذرات زها می‌باشد،  $m_j$  جرم و  $\underline{A}$  بردار پتانسیل مغناطیسی تابش است. ابتدا باید یک

موج نوری را در جهت x متمرکز و در جهت z حرکت کنید. برای این موج  $A_2 = A_3 \neq 0$  و

$$A_1 = A_1^0 \cos 2\pi\nu \left(t - \frac{z}{c}\right)$$

که  $A_1^0$  ثابت است. با جایگذاری این عبارت برای  $H_1'$  در انتگرال معادله (۱۴)، داریم:

$$\int \psi_m^{0*} \sum_j \frac{i\pi e}{c m_j} A_{1,j} \frac{d}{dx_j} \psi_n^0 d\tau$$

برای تابش‌های مرئی و مادون قرمز، طول موج خیلی بزرگتر از ابعاد مولکولی می‌باشد. به طوری که

$A_{1,j}$ ها در محدوده‌ی مولکولی یک ثابت می‌باشند.

$$\int \psi_m^{0*} H_1' \psi_n^0 d\tau = \frac{i\hbar A_1}{c} \exp\left(-\frac{i(E_m - E_n)t}{\hbar}\right) \sum_j \frac{e_j}{m_j} \int \psi_m^{0*} \frac{d}{dx_j} \psi_n^0 d\tau \quad (16)$$

اگر تابع موج وابسته به زمان برای دو حالت  $\psi_m^0$  و  $\psi_n^0$  در نظر گرفته شود. می‌توان نشان داد که:

$$\int \psi_m^{0*} \frac{d}{dx_j} \psi_n^0 d\tau = -\frac{m_j}{\hbar^2} (E_m - E_n) \int \psi_m^{0*} x_j \psi_n^0 d\tau \quad (17)$$

بنابراین (۱۶) به معادله‌ی زیر تقلیل می‌یابد:

$$\int \psi_m^{0*} H_1' \psi_n^0 d\tau = -\frac{i}{\hbar c} A_1 (E_m - E_n) \exp\left(-\frac{i(E_m - E_n)t}{\hbar}\right) x_{mn} \quad (18)$$

که

$$x_{mn} = \int \psi_m^{0*} \sum_j e_j x_j \psi_n^0 d\tau$$

اگر چه تغییر فرم انتگرال (۱۷) در (۱۴) تابعی از  $x_{mn}$  می‌باشد. مربع مولفه‌ی x نشان دهنده‌ی

عناصر ماتریس تکانه‌ی دو قطبی مولکولی ( $\epsilon$ ) برای یک گذار بین دو حالت m و n می‌باشد.

(۱۴) تحلیل می‌رود به:

$$= -\frac{A_1}{c\hbar^2} \sum_n c_n (E_m - E_n) \exp\left(-\frac{i(E_m - E_n)t}{\hbar}\right) x_{mn} \quad (19)$$

$$\frac{dc_m}{dt}$$

برای سیستم فیزیکی که در آن یک غلظت کسری از حالت  $m$  در  $t=0$  وجود دارد،  $c_m(0) = \delta_{mn}$  و برای اختلالات از حالت اولیه پیروی می‌کند.

$$\frac{dc_m}{dt} = -\frac{A_1}{c\hbar^2} x_{mn} (E_m - E_n) \exp\left(-\frac{i(E_m - E_n)t}{\hbar}\right) \quad (20)$$

همچنین برای فرکانس نوری  $\vartheta$  در  $z=0$ ،  $A_1$  می‌شود:

$$A_1 = A_1^0 \{ \exp(2\pi i\vartheta t) + \exp(-2\pi i\vartheta t) \}$$

که:

$$= -\frac{A_1^0}{2c\hbar^2} x_{mn} (E_m - E_n) \left\{ \exp\left(\frac{i(E_m - E_n + h\vartheta)t}{\hbar}\right) + \exp\left(-\frac{i(E_m - E_n + h\vartheta)t}{\hbar}\right) \right\} \quad (21)$$

$$\frac{dc_m}{dt}$$

با انتگرال از  $c_m = 0$  تا  $c_m = c_m(t)$  و  $t=0$  تا  $t=\tau$ :

$$= \frac{i}{2c\hbar} A_1^0 x_{mn} (E_m - E_n) \left\{ \frac{\exp\left(\frac{i(E_m - E_n + h\vartheta)\tau}{\hbar}\right) - 1}{E_m - E_n + h\vartheta} + \frac{\exp\left(\frac{i(E_m - E_n - h\vartheta)\tau}{\hbar}\right) - 1}{E_m - E_n - h\vartheta} \right\}$$

$$c_m$$

$$(22)$$

که فقط برای  $E_m - E_n = \pm h\vartheta$  بزرگ‌تر می‌باشد، در تمام دیگر موارد، عبارت درون پرانتز یکپارچه و واحد می‌شود. اگر ما  $E_m > E_n$  در نظر گرفته شود، می‌توان  $E_m - E_n = +h\vartheta$  را داشت که ترم اول هرگز نمی‌تواند بزرگ باشد.

احتمال اینکه سیستم بعد از یک زمان  $\tau$  در حالت  $m$  باشد. بنابراین:

$$\int c_m^* c_m \psi_m^{0*} \psi_n^0 d\tau = \overline{c_m^* c_m} = \frac{t^2}{4 c^2 \pi^4} |A_1^0|^2 |x_{mn}|^2 (E_m - E_n)^2 \int_0^\infty \frac{\sin^2\left\{\frac{(E_m - E_n - h\nu)t}{2\hbar}\right\}}{(E_m - E_n - h\nu)^2 \frac{t}{4\hbar^2}} d\nu \quad (23)$$

و این منجر می شود به:

$$|c_m(t)|^2 = \frac{\pi^2 \vartheta_{mn}^2}{c^2 \hbar^2} |x_{mn}|^2 |A(\vartheta_m)_1^0|^2 \cdot t \quad (24)$$

تا کنون نور به طور قطبی در جهت  $x$  به کار رفته است. برای نور قطبیده شده، اصطلاح عبور صفر کنار گذاشته می شود.

$$|c_m(t)|^2 = \frac{\pi^2 \vartheta_{mn}^2}{c^2 \hbar^2} \{ |A_1^0|^2 |x_{mn}|^2 + |A_2^0|^2 |y_{mn}|^2 + |A_3^0|^2 |z_{mn}|^2 \} \quad (25)$$

که  $|y_{mn}|^2$  و  $|z_{mn}|^2$ ،  $y$  و  $z$  اجزاء عناصر ماتریس دو قطبی الکتريکی هستند.  $A_2^0$  و  $A_3^0$  دامنه های ثابت مربوط به تابش برخوردی می باشد.

$$|A_1^0|^2 = |A_2^0|^2 = |A_3^0|^2 = \frac{1}{3} |A^0|^2$$

به طوری که:

$$|c_m(t)|^2 = \frac{\pi^2 \vartheta_{mn}^2}{3 c^2 \hbar^2} |A^0|^2 |R_{mn}|^2 \cdot t \quad (26)$$

که  $|R_{mn}|^2 = |x_{mn}|^2 + |y_{mn}|^2 + |z_{mn}|^2$  مربع ضریب کل عنصر ماتریسی دو قطبی الکتريکی است.

$$|R_{mn}|^2 = \left| \int \psi_m^{0*} \sum_j e_j q_j \psi_n^0 d\tau \right|^2 \quad (27)$$

می توان  $|A^0(\vartheta_{mn})|$  را با چگالی تابشی مرتبط کرد. از آنجا که:

$$\underline{A} = \underline{A}^0 \sin(2\pi \vartheta_{mn} t)$$



$$\underline{E} = -\frac{2\pi \vartheta_{mn}}{c} \underline{A}^0 \cos(2\pi \vartheta_{mn} t) = \frac{1}{c} \frac{\partial \underline{A}}{\partial t}$$

$E$  میدان الکتریکی است. بنابراین:

$$\overline{|\underline{E}|^2} = \frac{2\pi^2 \vartheta_{mn}^2}{c^2} |\underline{A}^0|^2 = 4\pi \rho_{\vartheta mn}$$

از این رو:

$$\rho_{\vartheta mn} = \frac{\pi^2 \vartheta_{mn}^2}{2c^2} |\underline{A}^0|^2$$

$$|c_m(t)|^2 = \frac{2\pi}{3\hbar^2} \rho_{\vartheta mn} |R_{mn}|^2 \cdot t$$

اکنون  $\frac{|c_m(t)|^2}{t}$  احتمال در واحد زمان می‌باشد، که یک مولکول سیستم، گذار از حالت  $n$  به حالت  $m$  تحت تاثیر چگالی تابش  $\rho_{\vartheta mn}$  که  $E_m > E_n$  انجام می‌دهد.

با دنبال کردن تعداد انتقال‌های به طرف بالا در واحد زمانی است.

$$N_n \frac{|c_m(t)|^2}{t} = N_n B_{nm} \rho_{\vartheta mn}$$

به طوری که:

$$B_{nm} = \frac{|c_m(t)|^2}{\rho_{\vartheta mn} t} = \frac{2\pi}{3\hbar^2} |R_{mn}|^2$$

$$A_{nm} = \frac{64\pi^4 \vartheta_{mn}^3}{3\hbar c^3} \frac{g_n}{g_m} |R_{mn}|^2 \quad (28)$$

این معادلات ارتباط ضرایب انشتین با مجموع مربعات عناصر ماتریسی مولفه‌های تکانه‌ی دو قطبی را نشان می‌دهد. که اگر توابع موج شناخته شوند، می‌تواند برای هر سیستم فیزیکی مورد ارزیابی قرار گیرد.

تا کنون نشان داده شده است که جذب خطی یکپارچه شده از یک انتقال از یک حالت با عدد کوانتومی  $n$  به یک حالت دیگر با عدد کوانتومی  $m$  ناشی می‌شود. و داریم:

$$S_{nm} = \frac{8\pi^3 \vartheta_{mn}}{3h c^2} \left(\frac{N_n}{p}\right) |R_{mn}|^2 \{1 - \exp(-\frac{h \vartheta_{mn}}{KT})\} \quad (29)$$

تقریب هماهنگ کامل به مقادیر  $n$  و  $n'$  کوچک محدود می‌شود. همچنین معادلات فقط در دماهای پایین می‌توانند استفاده شوند و حتی پس از آن فقط می‌توان شدت نسبی باند را پیدا کرد. حتی اگر امکان پایداری باند در دمای اتاق وجود داشته باشد، اما این پایداری برای دماهای بالا بسیار سخت به دست می‌آید. زیرا که دیگر تقریب هارمونیک معتبر نمی‌باشد.

### پ) مولکول دی اکسید کربن و طیف مادون قرمز آن

این مولکول دارای سه اتم می‌باشد و به همین ترتیب نه درجه‌ی آزادی دارد. می‌توان این را به حرکت داخلی و حرکت خارجی مولکول به عنوان یک مجموعه در نظر گرفته شود.

الف: حرکت خارجی شامل حرکت انتقالی مولکول به عنوان یک مجموعه در سه جهت متعامد است.

از آنجا که مولکول خطی است، چرخش مولکولی مربوط به دو محور عمود بر محور مولکول می‌باشد.

ب: حرکت داخلی شامل حالت ارتعاشی و یک حالت چرخشی است و هنگامی که یکی از حالت‌های

ارتعاشی برانگیخته می‌شود، موثر است.

می‌توان گفت که در حالت کششی متقارن هیچ تغییری در تکانه‌ی دو قطبی وجود ندارد، به طوری

که همه عناصر ماتریسی صفر می‌باشند. این باند در طیف مادون قرمز دی اکسید کربن مشاهده نمی‌شود.

بلکه در طیف رامان می‌باشد. با این وجود، این حالت با دو حالت دیگر ترکیب می‌شوند. که موجب

ترکیب باندها در طیف می‌شود.

عدد کوانتومی  $l$  مرتبط با حالت خمشی است. یک اندازه‌گیری از حرکت زاویه‌ای برای محور موازی

با محور پایه‌ای مولکول می‌باشد. بنابراین، در هر زمان که مولکول حالت خمشی نداشته باشد،  $l$  باید

صفر باشد. مقادیری که می‌توان برای  $l$  در نظر گرفت:  $0$  یا  $1$  .....  $(n_2 - 4)$ ,  $(n_2 - 2)$ ,  $n_2$  می‌باشد.

حالت ارتعاشی خمشی نامتقارن در مولکول، در حوالی محور پایه‌ی مولکول ظاهر می‌شود. بنابراین، عناصر ماتریسی تکانه‌ی دو قطبی غیر صفر است و علاوه بر این، تغییر تکانه‌ی دو قطبی عمود بر محور مولکول می‌باشد. این نوع طیف باند با تغییرات عدد کوانتومی  $n_2$  مشخص می‌شود. فقط باندهایی مشاهده می‌شوند که:

$$\Delta n_2 \rightarrow \text{فرد} \quad \text{و} \quad \Delta l = \pm 1 \quad \text{و} \quad \Delta n_3 \rightarrow \text{زوج}$$

حالت کششی نامتقارن موازی با مولکول است، بنابراین تغییر عدد کوانتومی  $n_3$  باعث تغییر تکانه‌ی دو قطبی موازی با محور مولکولی می‌شود، که مشخصه‌ی طیف باند موازی را تولید می‌کند.

$$\rightarrow \text{زوج} \quad \text{و} \quad \Delta l = 0 \quad \text{و} \quad \Delta n_3 \rightarrow \text{فرد}$$

$$\Delta n_2$$

به منظور جلوگیری از سردرگمی مربوط به مقادیری که  $\Delta n_2$  و  $\Delta n_3$  می‌تواند داشته باشد، باید توجه داشت که در تقریب هارمونیک، قوانین انتخاب  $\Delta n_3 = 0$  و  $\Delta n_2 = \pm 1$  برای یک باند عمودی و  $\Delta n_2 = 0$ ،  $\Delta n_3 = \pm 1$  برای یک باند موازی در نظر گرفته می‌شود. البته، تمام جهش‌های دیگر فقط در تقریب هارمونیک ممنوع می‌باشد.

در عمل چاه پتانسیل حاوی انحرافات بسیار زیادی است. و این باعث می‌شود که مراحل کوانتومی بیش از محدودیت هارمونیک  $\Delta n = \pm 1$ ، بخصوص برای مقادیر بزرگ  $n$  باشد. و احتمال تغییر در عدد کوانتومی با افزایش اندازه‌ی تغییرات، کاهش پیدا می‌کند. با این توصیفات، به راحتی قانون انتخاب  $\Delta n = \pm 1$  نقض می‌شود.

اگرچه که طیف باند ایجاد شده توسط تغییرات  $\Delta n > 1$ ، شدت ضعیف‌تری دارد. بنابراین، در محدودیت‌های بالا در  $\Delta n_2$  و  $\Delta n_3$  برای بیشتر انتقال‌های محتمل، صفر برای زوج و یک برای فرد خوانده می‌شود.

قوانین انتخابی که تغییرات در  $l$  را کنترل می کنند بسیار دقیق هستند، زیرا مدل چرخشی جدی-تری نسبت به حرکت چرخشی در تقریب هارمونیک برای حرکت ارتعاشی دارد. این بحث را می توان با استفاده از یک اختلال کوچک به پتانسیل هارمونیک و محاسبه ی احتمال انتقال از توابع موج برانگیخته شده، به دست آورد.

دو بیان روی  $\Delta n_2$ ،  $\Delta l$  و  $\Delta n_3$  وجود دارد. به منظور درک نتایج حاصل شده، باندهای طیفی که در فرکانس ها ظاهر می شوند را در نظر بگیرید.

$$(\Delta n_1 \vartheta_1 + \Delta n_2 \vartheta_2 + \Delta n_3 \vartheta_3)$$

$\Delta n$  ها انتگرال مسیر هستند. فقط باندهایی برای آن یافت می شود که  $(\Delta n_2 \vartheta_2 + \Delta n_3 \vartheta_3)$  یک عدد فرد شود.

همان طور که گفته شد:

الف)  $\Delta n_2$  های فرد برای تغییر تکانه ی دوقطبی عمود بر محور مولکول می باشد.

ب)  $\Delta n_3$  های فرد برای تغییر تکانه ی دوقطبی موازی با محور مولکولی می باشد.

محدودیت ها یک اثر مهم روی طیف مولکول دی اکسید کربن، به ویژه در تشکیل باندهای ترکیبی دارد. با انتقالات برجسته، دو باند مشاهده می شود:

$$۱) \vartheta' = \Delta n_1' \vartheta_1 + \Delta n_2' \vartheta_2 + \Delta n_3' \vartheta_3 \quad (۳۰)$$

$$۲) \vartheta'' = \Delta n_1'' \vartheta_1 + \Delta n_2'' \vartheta_2 + \Delta n_3'' \vartheta_3 \quad (۳۱)$$

یک باند ترکیبی نیز خواهد بود:

$$(\vartheta' + \vartheta'') = (\Delta n_1' + \Delta n_1'') \vartheta_1 + (\Delta n_2' + \Delta n_2'') \vartheta_2 + (\Delta n_3' + \Delta n_3'') \vartheta_3 \quad (۳۲)$$

از آنجا که باندهای ۱ و ۲ مشاهده شده است، هر دوی  $(\Delta n_2'' + \Delta n_3'')$  و  $(\Delta n_2' + \Delta n_3')$  باید فرد باشند. بنابراین،  $(\Delta n_3' + \Delta n_2')$  و  $(\Delta n_3'' + \Delta n_2'')$  باید زوج باشند. به طوری که باند ترکیبی از این دو را نمی‌توان مشاهده کرد. با این حال، حالت متقارن با دو حالت دیگر باندهای مشاهده شده تعامل می‌کند، زیرا  $\Delta n = 0$  نامحدود می‌باشد.

می‌توان شدت نسبی خطوط چرخشی در باند ارتعاشی را پیدا کرد. دو مجموعه‌ی فوق از قوانین انتخاب منجر به دو نوع باند می‌شود، که موازی و عمود بر مسیری است، که در آن تغییر تکانه‌ی دو قطبی با توجه به محور مولکولی  $n$  رخ می‌دهد. این مربوط به تغییر در عدد کوانتومی  $K$  می‌شود که می‌تواند ۰ یا  $\pm 1$  باشد.

الف) قوانین انتخاب  $\Delta J = \pm 1$  ,  $\Delta K = 0$

$$I_{J-1}^J = \frac{1}{4} AJ \exp(-\sigma(J^2 + J)) \quad (33)$$

$$= \frac{1}{4} AJ \exp(-\sigma(J^2 - J)) \quad (34)$$

$I_J^{J-1}$

ب) قوانین انتخاب  $\Delta K = 0$  و  $\Delta J = \pm 1, 0$

$$\vartheta_{J-1, K-1}^{J, K} = \vartheta_0 - \frac{\hbar}{2\pi A} [J + \beta(K - \frac{1}{2})] \quad \text{شاخه‌ی منفی}$$

$$J = K, K + 1, \dots \quad (35)$$

$$\vartheta_{J, K-1}^{J, K} = \vartheta_0 - \frac{\hbar}{2\pi A} \beta \left( K - \frac{1}{2} \right) \quad \text{شاخه‌ی صفر}$$

(۳۶)

$$\vartheta_{J, K-1}^{J-1, K} = \vartheta_0 - \frac{\hbar}{2\pi A} [-J + (K - \frac{1}{2})] \quad \text{شاخه مثبت}$$

$$J = K+1, K+2, \dots \quad (37)$$

توجه داشته باشید که مقادیر مجاز  $J$  با  $K$  و  $K+1$  شروع می‌شوند. با پیروی از قانون ساختار  $J \geq K$ ، شدت‌ها با عبارتی شبیه به آنهایی که برای باند موازی باشند، ارائه می‌شود.

ت) نتیجه‌ی استفاده از جمع خطوط برای محاسبه‌ی شدت باند نسبی کل از باند ۴/۲۶

### میکرونی مولکول دی اکسید کربن

با اشاره به بیان شدت خط برای یک مولکول دو اتمی، می‌توان معادلات معادلی را برای باند موازی در مولکول دی اکسید کربن محاسبه کرد.

شدت خط بر اساس گذار  $(n_1 n_2^l n_3 J \rightarrow n_1' n_2'^l n_3' J')$  می‌باشد.

$$S(n_1 n_2^l n_3 J \rightarrow n_1' n_2'^l n_3' J') = \frac{8\pi^3 N_T \vartheta}{3Kc^2 Q_\vartheta Q_R} g_{J'l'}$$

$$a_{J'l'}^{J'l'} \left| R n_1 n_2^l n_3 J \rightarrow n_1' n_2'^l n_3' J' \right|^2 \exp\left[-\frac{w_\vartheta + w_R}{KT}\right] (1 - \exp(-\frac{h\vartheta}{KT})) \quad (38)$$

که  $\vartheta$  فرکانس مربوط به تغییرات در اعداد کوانتومی می‌باشد.

$$\left| R n_1 n_2^l n_3 J \rightarrow n_1' n_2'^l n_3' J' \right|^2 \rightarrow \text{عناصر ماتریسی متناظر}$$

$N_T \rightarrow$  تعداد کل مولکول‌ها در واحد حجم و در واحد فشار

$\rightarrow w_R$  تابع تفکیک چرخش کامل با ترازهای انرژی

$Q_R$

$Q_\vartheta \rightarrow w_\vartheta$  تابع تفکیک ارتعاش کامل با ترازهای انرژی

$a_{J'l'}^{J'l'} \rightarrow J \rightarrow J'$  دامنه‌ی ۵ عامل مربوط به تغییر چرخشی حالت

$$a_{J'l\pm 1}^{J'l} = \frac{(J\pm l)(l\pm J+1)}{4J(J+1)} \quad \text{برای } l \neq 0 \quad \text{که معمولاً}$$

برای تکمیل محاسبه‌ی جذب باند کل، عبارت بالا را برای همه‌ی مقادیر  $J'$  مجاز حاکم بر قوانین انتخاب  $\Delta J = 0, \pm 1$  جمع زده می‌شود. از لحاظ فیزیکی این نشان دهنده‌ی اضافه کردن تمام شدت‌های خطوط در باند است.

$$\alpha (n_1 n_2^l n_3 J \rightarrow n_1' n_2'^l n_3' J') = \frac{8\pi^3 N_T}{3hc^2 Q_\vartheta} \bar{\vartheta} g_l \beta^2 \exp\left[-\frac{w_\vartheta}{kT} (1 - \exp(-\frac{k\bar{\vartheta}}{kT}))\right] \quad (39)$$

که  $l=0$  برای  $g_l = 1$ ،  $\bar{\vartheta}$  فرکانس جذب باند مرکزی

$\neq 2$  برای  $L \neq 0$

و  $\beta^2 = \left| R n_1 n_2^l n_3 J \rightarrow n_1' n_2'^l n_3' J' \right|^2$  می‌باشد.  $Q_\vartheta$  و  $w_\vartheta$  با فرمول‌های زیر داده می‌شوند:

$$W'_\vartheta(n_1 n_2 n_3) + W'_R(l, J) = w_\vartheta(n_1 n_2 n_3 l) + w_R(J)$$

$$Q'_\vartheta(n_1 n_2 n_3) Q'_R(l, J) = Q_\vartheta(n_1 n_2 n_3 l) Q_\vartheta(J)$$

بنابراین جمع روی تمام  $JJ'$  آسان‌تر می‌شود. عبارات مربوط به  $W'_\vartheta$  و  $Q'_\vartheta$  و غیره، در مقاله‌ی

مالکوموس<sup>۱</sup> ارائه شده است [۲۵].

اگر  $\Delta l = 0$ ، عبارت بالا برای جذب باند درست می‌باشد. اما اگر  $\Delta l = \pm 1$ ، دو حالت نهایی که

امکان دارد مولکول بتواند داشته باشد. بنابراین شدت هر باند در این مورد، نیمی از آن برای  $\Delta l = 0$

می‌باشد، که ممکن است دو خط جداگانه وجود داشته باشد.

که نحوه‌ی به دست آوردن تابع تفکیک در بسیاری از مقالات و کتب به خوبی حل شده است.

<sup>۱</sup> Malkumos





## منابع و مأخذ

- 1- Carbon / Fact , Uses, & Properties “ , (2017). Encyclopedia Britannica. Archived from the original on 2017-10-24.
- 2- Barrett, J., (2002). Atomic Structure and Periodicity, (Basic concepts in chemistry, vol.9 of tutorial chemistry texts), Cambridge, u.k: Royal Society of chemistry, P.153,ISBN 0854046577, See accessed January 31,2015.
- 3- Kaufman, Donald, G., Franz, Cecilia, M., (1966). Biosphere 2000: Protecting our global environment. Kendall/Hunt pub. Co. ISBN 978-5-7872-0460-0.
- 4- Ebbe, A., (2003). History of industrial gases. Springer. ISBN 978-0300472770. P.93
- 5- Humphery, D., (1823). On the Application of liquids formed by the condensation of gases as mechanical agents. Philosophical transactions.113:199-205
- 6- Thilorier, Adrien- Jean-pierre, (1835). Solidification de l,Acid carbonique. Compets Rendus.1:194-196 and
- 7- Solidification of carbonic acid, (1836).The London and Edinburgh philosophical Magazine.8(48):446-447.
- 8- “Carbon Dioxide” . Air Products.
- 9- Atkins, P., and de Paula, J., Freeman, W.H., (2006). Physical Chemistry. PP. 461,464 ISBN 0-7167-8759-8.
- 10- Air Products and Chemicals, Inc., (2014). Carbon dioxide. (36200) 900-13-099-US.
- 11- [https:// www.senseair.com](https://www.senseair.com)
- 12- Zainab Yunusa, 1 Mohd. Nizar Hamidon, 3 Ahsanul Kaiser, 4 Zaiki Awang, (2014). Gas Sensors, Institute of Advanced Technology, Universiti Putra Malaysia 43400 Serdang, Selangor, Malaysia.
- 13- Hübert, T., Boon-Brett, L., Black, G., and Banach, U., (2011). Hydrogen sensors – A review, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 157, No. 2, pp. 329–352.
- 14- Currie, J. F., Essalik, A., and Marusic, J.-C., (1999). Micromachined thin film solid state electrochemical CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> gas sensors, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 59, No. 2–3, pp. 235–241.
- 15- Gan, T., and Hu, S., (2011). Electrochemical sensors based on graphene materials, Microchimica Acta, Vol. 175, No. 1–2, pp. 1–19.
- 16- Lu, X., Wu, S., Wang, L., and Su, Z., (2005). Solid-state amperometric hydrogen sensor based on polymer electrolyte membrane fuel cell, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 107, No. 2, pp. 812–817.
- 17- Shimano, K., Yuasa, M., Kida, T., and Yamazoe, N., (2011). Semiconductor gas sensor using nano-sized oxide for high-sensitive detection of environment-related gases, in Proceedings of the IEEE International Conference on Nanotechnology Materials and Devices, pp. 38–43.
- 18- Halek, G., Malewicz, M., and Teterycz, H., (2009). Methods of selectivity improvements of semiconductor gas sensors, in Proceedings of the International

- Students and Young Scientists Workshop on Photonics and Microsystem', Wernigerode, pp. 31–35.
- 19- Lee, D., & Lee, D. (2011). Environmental gas sensors. *IEEE Sensors Journal*, 1(3), 214–224. doi:10.1109/JSEN.2001.954834.
  - 20- Marazuela, M. D., Moreno-Bondi, M. C., & Orellana, G. (1998). Luminescence lifetime quenching of a ruthenium (II) polypyridyl dye for optical sensing of carbon dioxide. *Applied Spectroscopy*, 52(10), 1314–1320. doi:10.1366/0003702981942825.
  - 21- Jones, E., (1987). The pellistor catalytic gas detection, in: P. Moseley, B. Tofield (Eds.), *Solid State Gas Sensors*, Adam Hilger, Bristol, pp. 17-31.
  - 22- Li, T., Lie Xu, et al., (2012). A high heating efficiency twobeam microplate for catalytic gas sensors, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electronic and Mechanical Systems MEMS*, Kyoto, Japan, pp. 65–68.
  - 23- Lee, C., Akbar, S. A., and Park, C. O., (2001). Potentiometric CO<sub>2</sub> gas sensor with lithium phosphorous oxynitride electrolyte, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 80, No. 3, pp. 234–242.
  - 24- Tardy, P., Coulon, J.-R., Lucat, C., and Menil, F., (2004). Dynamic thermal conductivity sensor for gas detection, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 98, No. 1, pp. 63–68.
  - 25- Okajima, H., Kakuma, S., Uchida, K., Wakimoto, Y., Noda, K., (2006). Measurement of methane gas concentration using infrared LED, in *Proceedings of the International Joint Conference SICE-ICASE*, Busan, 18-21 Oct, pp. 1656–1659.
  - 26- King, W. H., (1964). Piezoelectric sorption detector, *Analytical Chemistry*, Vol. 36, pp. 1735–1739.
  - 27- Kasai, N., Tsuchiya, C., Fukuda, T., Sekine, K., Sano, T., and Takehana, T., (2011). Propane gas leak detection by infrared absorption using carbon infrared emitter and infrared camera, *NDT & E International*, Vol. 44, No. 1, pp. 57–60.
  - 28- Garcia Romeo, D., Martínez, A., and Azcona, C., (2012). NDIR-based CO<sub>2</sub> Monitor System for Wireless Sensor Networks, *IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems LASCAS*, Playa Del Carmen, 29 February - 2 March, pp.1-4.
  - 29- Zhang, G., Li, Y., and Li, Q., (2010). A miniaturized carbon dioxide gas sensor based on infrared absorption, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, No. 12, pp. 1206–1212.
  - 30- Hamidon, M. N., Skarda, V., White, N.M., Krispel, F., Krempl, P., Binhack, M., Buff, W., (2005). Fabrication of high temperature surface acoustic wave devices for sensor applications, *Sensors and Actuators A*, Vol. 123, Issue 1, pp. 403–407.
  - 31- Fischerauer, G., Dickert, F., Forth, P., and Knauer, U., (1996). Chemical sensors based on SAW resonators working at up to 1 GHz, in *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, Vol. 1, pp. 439–442.
  - 32- Venema, A., Nieuwkoop, E., Ghijsen, W. J., Barendsz, A. W., and Nieuwenhuizen, M. S., (1987). NO<sub>2</sub> Gas-concentration measurement with a SAW chemosensor, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 34, Issue 2, pp. 148-155.

- 33- Beck, K., Kunzelmann, T., Von Schickfus, M., and Hunklinger, S., (1999). Contactless surface acoustic wave gas sensor, *Sensors and Actuators*, Vol. 76, No. 1-3, pp. 103–106.
- 34- Anisimkin, M., Penza, Valentini, A., Quaranta, F., Vasanelli, L., (1995). Detection of combustible gases by means of a ZnO-on-Si surface acoustic wave (SAW) delay line, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 23, pp. 197–201.
- 35- Kumar\*, A., Kingson, T.M.G., Verma, R.P., Kumar, .A, Kumar, Dutta, S., Chaulya, S.K., and Prasad, G.M., (2013). Application of Gas Monitoring Sensors in Underground Coal Mines and Hazardous Areas, CSIR-Central Institute of Mining and Fuel Research, Dhanbad, India.
- 36- Leman1,\* A.M., Omar2, A.R., & Yusof3, M.Z.M., (2010). MONITORING OF WELDING WORK ENVIRONMENT IN SMALL AND MEDIUM INDUSTRIES (SMIs), Engineering, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia 86400.
- 37- ISO 9001:2000 and MS ISO9001, (2008). Quality Management Systems, Department of Standard Malaysia.
- 38- Miller, J. B., Hort, C., Scheffler, T. B., (2005). Catalytic sensor, US Patent no. 6911180 B2.
- 39- Blagojevich, M., Petkovich, D., and Simich, D., (2001). New Algorithm for Adaptive Alarm Threshold in Fire Detection System, 12th International Conference on Automatic Fire Detection.
- 40- Gottuk, D. T., Peatross, M. J., Roby, R. J., and Beyler, C. L., (2002). Advanced Fire Detection Using Multi-Signature Alarm Algorithms, *Fire Safety Journal* 37:381-394.
- 41- Marman, D. H., Peltier, M. A., and Wong, J. Y., (1999). Fire and Smoke Detection and Control System, US Patent No. 5,945,924.
- 42- Shin-Juh Chen1, Chris Hovde1, Kristen, A., Peterson1, and André Marshall2, (2007). Fire detection using smoke and gas sensors, Southwest Sciences Inc., 1570 Pacheco Street, Suite E-11 Santa Fe, NM 87505, USA.
- 43- KEVIN, R., WARD, MD, DONALD, M., YEALY, MD, (1998). End-tidal Carbon Dioxide Monitoring in Emergency Medicine, Part 1: Basic Principles, *ACA-DEMIC EMERGENCY MEDICINE* 1998; 5:628-636.
- 44- Guyton AC, (1986). *Textbook of Medical Physiology*, Philadelphia, PA W. B. Saunders, p 500.
- 45- Gravenstein JS, Paulus DA, Hayes TJ. (eds), (1989). *Capnography in Clinical Practice*, Boston, 11IA: Butterworths.
- 46- Abu-Dieyeh ZHM, (2006) b. Effect of high temperature perseon growth performance of broilers, *International Journal of Poultry Science*.
- 47- Czarick, M., & Fairchild, B. D., (2012). Relative humidity... the best measure of overall poultry house air quality, *Poultry Housing Tips*, February, Available from: <http://www.poultryventilation.com/tips/vol24/n2> [Accessed 09/08/2012].
- 48- Xin, H., Berry, I. L., & Tabler, G. T., (1996). Minimum ventilation requirement and associated energy cost for aerial control in broiler houses, *Trans. ASAE*, 39(2), 645-664.

- 49- Bennett, C., (2008). How to use a hand-held carbon dioxide monitor to evaluate summer ventilation in poultry houses, *Zootechnia International*.
- 50- Bokkers EAM, Van Zanten HHE., & Van Der Brand, H., (2010). Field study on effects of a heat exchanger on broiler performance, energy use, and calculated carbon dioxide emission at commercial broiler farms, and the experiences of farmers using a heat exchanger, *Poult. Sci.*, 89(12), 2743-2750.
- 51- Pradeep Puligundla, Junho Jung, Sanghoon Ko, (2012). Carbon dioxide sensors for intelligent food packaging applications, Department of Food Science and Technology, Sejong University, 98 Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, South Korea.
- 52- Teemu Ahonen, Reino Virrankoski and Mohammed Elmusrati, (2015). Greenhouse Monitoring with Wireless Sensor Network. University of Vaasa Department of Computer Science Telecommunication Engineering Group P.O. Box 700, FI-65101, Vaasa, Finland.
- 53- Figaro engineering inc, (2003). TGS 4161 - for the detection of Carbon Dioxide.[Online]. Available: <http://www.figarosensor.com/products/4161pdf>.
- 54- Fasolo, P.S., and D.E., Seborg., (1995). Monitoring and Fault Detection for an HVAC Control System. *International Journal of Heating, Ventilation, and Air-Conditioning and Refrigeration Research*, Vol. 99, Pt. 1, pp. 3-13.
- 55- Murphy, J., (2002). Using CO<sub>2</sub> for Demand-Controlled Ventilation, *Trane Engineers Newsletter*, Vol. 31, no. 3.
- 56- Norford, L.K., and Little, R.D., (1993). Fault Detection and Monitoring in Ventilation Systems. *ASHRAE Transactions*, Vol. 99, Pt. 1, pp. 590 – 602.
- 57- Schell and Int-Hout., (2001). Demand Control Ventilation Using CO<sub>2</sub>, *ASHRAE Journal*, February, pp.1829.
- 58- Hodgson, J. P., (1968). A Survey of the Infrared Radiation Properties of Carbon Dioxide, LONDON: HER MAJESTY'S STATIONERY OFFICE.
- 59- Vučelić, M., Öhrn, Y. and R. Sabin., J., (1973). Ab Initio calculation of the vibrational and electronic properties of carbon dioxide. *The Journal of Chemical Physics* 59, 3003
- 60- Malkmus, V., and A. Thomson, A., Ouant, I., (1962). Spectry, and Rad Transfer 2, 17 , Also: Convair Report ZPh-095, (1961). infrared Emissivity of Diatomic Cases for the Anharmonic Vibrating Rotator model, may, and Convair Report Zph-119, (1961). infrared Emissivity of Diatomic Cases with Doppler Lineshape, Sept.
- 61- Kumar, R., Dossary, O.Al., Kumar, G., Umar, A., (2015). Zince oxide Nanostructures for NO<sub>2</sub> Gas-sensor , *Applications: A review*. Volumev, Issue 2, pp 97-120.
- 62- Vijayarangamuthv, K., Rath, S., (2014). *Journal of Alloys and compounds, crystallographica*. 9(6):515-520.
- 63- Baur, W.H., (1956). Uber die verfeinerung der Kristallstructurebestimmung einiger vertreter des Rutiltyps: TiO<sub>2</sub> , SnO<sub>2</sub> , GeO<sub>2</sub> and MgF<sub>2</sub> . *Acta*.
- 64- Sato, K., Yokoyama, Y., Valmalette, J.C., Kuruma, K., Abe, H., Takarada, T., (2013). *Crystal Growth & Design*. 13(2013)1685.
- 65- <https://edu.nano.ir/puper/295>

66- Li, C., Li, L., Du, Z., Yu, H., Xiang, Y., Li, Y., Cai, Y., Wang, T., (2008). Rapid and ultrahigh ethanol sensing based on Au-coated ZnO nanorods Nanotechnology (19)3.035501.

## Abstract

The sensing carbon dioxide gas is very important issue for the human health and his life environment and also in industrial process and various factories. But in the sensing of carbon dioxide and other gases such as methane it happens some challenges. Diagnostic of some gases such as Methane and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) by using of resistance sensors is so hard because of its weak signal that is about a few millivolt (0.05 volt) because of electronic noise interference, this is if the element voltage is about 5 volt.

Even though by using of Amplifier this voltage could reach to 100 millivolt but the signal (CO<sub>2</sub> signal) vanished by the system noises. For this reason the resistance gas sensor for carbon dioxide diagnosing aren't precise sensors. But on the other hand for CO<sub>2</sub> diagnosing could use of absorption spectrum light sensor that have strong absorption lines.

In relation with studying and structuring this sensor you will face with two basic challenges. Challenge one: since the proper absorption lines for CO<sub>2</sub> molecule is in the Infrared range, there for providing of its emitter and photo detector is hard. Challenge two: sensor elements fee is somewhat high. For that CO<sub>2</sub> sensors with low charge expanded in the industrial fields, it decided that by using of material nanostructure and nanostructured material reduced CO<sub>2</sub> gas sensor limits. In the other words we somehow cause to increase sensitivity that sensor signal overcome from system noises. No dispersed Infrared gas sensor for detecting carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) gas had studied in two general fields:

1. Designing of light emitter electronic circuit and infrared photodiode detector, with other related elements.
2. Studying of theory of interaction between carbon dioxide gas and Infrared light.

In continuation, studying and structuring of resistance gas sensor in basis of semiconductors oxide ZnO and SnO<sub>2</sub> considered. Sensing of carbon dioxide gas with two different types of thin films SnO<sub>2</sub> and ZnO with 1.5 percent gas density in 300 centigrade degree is done. For providing active martial of sensing element, Nano particles of SnO<sub>2</sub> and also ZnO had synthesized by sputtering method. Nano particle surface Morphology is studied with Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM).

Finally, three parameter of sensitivity, respond time and recovery time of Infrared gas sensor with any two type of metal oxide resistance gas sensor ( $\text{SnO}_2$  and  $\text{ZnO}$ ) is compered.

key words: Nondispersed Infrared gas sensor, metal oxide resistance gas sensor, Sputtering R.F., Field Emission Scanning Electron Microscopy, photodiode, light emitter, carbon dioxide, thin film.





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Physics and Nuclear Engineering**

**MSc Thesis in Solid state**

**Study of Carbon Dioxide Gas Sensors and Investigation of  
the Role of Nanotechnology on Improvement of its Operation**

**Sadegh Heydari**

Supervisor  
**Dr Hamid Haratizaheh**

**January 2019**