

استخراج پارامترهای تشخیص از پاسخ گذرای حسگر گاز الکتروسرامیکی متخلخل

فرامرز حسین بابائی

دانشیار دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

محمد عروتی نیا

دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۸۱/۴/۱۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۲/۵، تاریخ تصویب ۸۳/۳/۲)

چکیده

روش جدیدی را برای تشخیص جنس یک گاز هدف خالص در هوا، بر اساس تحلیل ریاضی پاسخ گذرای حسگر گاز نیمه هادی، پیشنهاد می‌کنیم. حسگر گاز مورد نظر از نوع مقاومتی و دارای بدنه حساس متخلخل است. معادله نفوذ-واکنش^۱ در خصوص بدنه متخلخل الکتروسرامیکی و شرایط حدی حاکم بر ساختمان افزار مورد نظر حل گردید. اهم پارامترهای وابسته به نوع گاز (پارامترهای تشخیص) مشخص، و آثار ناشی از آنها در پاسخ گذرای حسگر بروش های رقومی مطالعه شد. پس از ساخت حسگر مقاومتی با بدنه اکسیدروی متخلخل، پاسخ گذرای آن به حضور مقدار ۴۰۰۰ ppm آلودگی متانول، اتانول، پروپانول و بوتانول در هوا، یک به یک ثبت گردید. با تحلیل اطلاعات ثبت شده، پارامترهای تشخیص مربوط به هریک از پاسخهای گذرا محاسبه شدند. اثبات شد که چهار گاز نامبرده، به روش مشروح، توسط این حسگر قابل تمیز می‌باشند. نتایج اندازه گیری با پیش بینی های تحلیلی همخوان است.

واژه های کلیدی: حسگر گاز، پاسخ گذرا، نفوذ- واکنش، بدنه متخلخل، اکسید روی

مقدمه

حسگر های گاز نیمه هادی عموماً، و حسگر های گاز مقاومتی خصوصاً، ویژگی های مثبت بسیاری را حائز هستند. اندازه فیزیکی میلیمتری، امکان تولید انبوه، پاسخ سریع، قابلیت یکپارچه سازی با مدارات الکترونیکی جنبی و ارزانی را از جمله مزایای این ادوات می توان ذکر نمود. لیکن عیب عمده این حسگر ها ضعف انتخاب کنندگی آنهاست. بدین معنی که پاسخ این حسگر ها همیشه بصورت تغییر هدایت بوده نوع گاز را تعیین نمی کند [۱-۲].

تاکنون فعالیت های زیادی برای افزایش انتخاب کنندگی این حسگر ها صورت گرفته است. استفاده از انواع آلایش [۳-۴]، چند لایه ای کردن ساختار [۵]، ایجاد لایه کاتالیزر [۶] و استفاده همزمان از تعدادی حسگر در یک شبکه عصبی [۷-۸] از آن جمله اند. اخیراً نشان داده شده است که پاسخ گذرای این حسگر ها حاوی اطلاعات مربوط به نوع گاز می باشد [۹]. و فعالیت هائی نیز برای تشخیص تک گاز هدف بر اساس استفاده از پاسخ

گذرا صورت گرفته است [۱۰]. روشهای استفاده شده بر اساس مقایسه کیفی پاسخهای گذرای تست و مرجع استوار بوده مبتنی به تحلیل ریاضی نمی باشند و از موفقیت محدودی برخوردار بوده اند [۱۱-۱۲]. ملاحظه شده است که اطلاعات مربوط به جنس گاز هدف با اطلاعات مربوط به تراکم حضور آن در هوا بگونه پیچیده ای به هم بافته شده است. این پیچیدگی عملاً استخراج اطلاعات تشخیصی را از پاسخ گذرا، حتی در خصوص یک تک گاز هدف، عملاً ناممکن نموده است [۱۳].

در این مقاله ما روش جدیدی را معرفی می‌کنیم که بر اساس تحلیل ریاضی پاسخ گذرای حسگر مقاومتی با ساختاری خاص استوار می باشد. ویژگی این حسگر مقاومتی در اینست که از یک بدنه الکتروسرامیکی حساس با ضخامت میلیمتری و متخلخل سودمی جوید. تاثیر پارامتر ضخامت لایه حساس را در عملکرد حسگرهای مقاومتی گاز، تحلیل و نتایج را در جای دیگری ارائه کرده ایم [۱۴-۱۵]. در ساخت این ادوات معمولاً از فیلم

۲۸۰ تثبیت نمودیم. حسگر های گاز مقاومتری اکثراً در دمای بالاتر از محیط کار می کنند و دمای بهینه حدود $^{\circ}\text{C}$ ۳۰۰ می باشد [۲۳ و ۱۴]. سپس حسگر وارد محفظه گردید. نگهدارنده حسگر، دارای یک صفحه افقی است که بلافاصله پس از ورود حسگر دهانه ورودی محفظه را بسته و از نشت گاز به بیرون جلوگیری می کند.

در تجارب آزمایشگاهی گزارش شده، حسگر گاز ضخامتی معادل ۲ mm داشته ضریب تخلخل باز آن بروش غوطه وری ۶۰٪ بر آورد شد. پاسخ گذرای حسگر پس از تقویت، اندازه گیری و ثبت گردید. نتایج اندازه گیری نرمالیزه شده در اشکال ۲ الف-د (بصورت O) ارائه گردیده است. اشکال ۲. الف-د بترتیب برای بخارهای متانول، اتانول، پروپانول و بوتانول بدست آمده اند. تراکم هرچهار گاز، به هنگام اندازه گیری نتایج مذکور، حدود ۴۰۰۰ ppm بوده است. جزئیات بیشتر عملیات آزمایشگاهی در متن دیگری ارائه گردیده است [۲۴].

ارائه مدل و بحث

در لحظه $t = 0$ با ورود حسگر به محفظه، گاز هدف عملاً بصورت پله ای به آن اعمال می گردد. این گاز، به تدریج بداخل بدنه متخلخل نیمه هادی نفوذ می کند. حضور گاز در هر نقطه باعث کاهش سد پتانسیل اتصال در مرز دانه های بدنه شده هدایت الکتریکی بدنه افزایش می یابد. مکانیزم کاهش سد پتانسیل مذکور توسط گازهای احیاء کننده، در متون مختلف مورد بحث قرار گرفته است [۲۵].

پاسخ گذرای حسگر ارتباط نزدیکی با سازوکار و سینتیک نفوذ-واکنش گاز به درون بدنه متخلخل دارد. این سازوکار، تعیین کننده سرعت تاثیر گاز روی مرز دانه های موجود در ساختار بدنه بوده پاسخ گذرای حسگر را مشخص می سازد. برای مطالعه این سازوکار مدل شکل ۳ با فرایض زیر مورد دقت قرار می گیرد:

الف. گاز فقط از یک سمت بدنه نیمه هادی به آن نفوذ می کند وقاعده دیگر توسط بدنه عایق غیر قابل نفوذ، مسدود است.

ب. نفوذ بصورت یک بعدی (فقط عمود به سطح) انجام می شود.

های نازک یا ضخیم نیمه هادی در محدوده mm^{-5} ۱۰ تا 10^{-2} استفاده می شود. ضخامت زیاد لایه حساس باعث می گردد که نقش جنس گاز در پاسخ گذرا، به دلیل انتخابی بودن فرایند نفوذ گاز [۱۶]، در مقایسه با عوامل مشترک یا مزاحم برجسته تر گردد. این معنی برای اولین بار در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

در این پژوهش بر اساس یک مدل ریاضی نشان داده ایم که در بدنه حساس متخلخل، بدلیل تفاوت در نحوه نفوذ و نرخ تعامل گاز با سطح موثر نیمه هادی متخلخل، اطلاعات مربوط به نوع گاز، از پاسخ گذرا سهل الحصول تر می باشند. در ادامه کار، با ساخت حسگر مورد نظر و ثبت پاسخ گذرای آن نسبت به حضور چهار تک گاز هدف مختلف، کارائی روش پیشنهادی عملاً تأیید گردیده است. اضافه می گردد که این روش برای شناسائی تک گاز هدف پیشنهاد گردیده است. شناسائی مخلوط های گازی [۱۷-۱۸] خارج از عملکرد یک تک حسگر بوده مربوط به زمینه آرایه های حسگر گاز و بینی الکترونیکی می گردد [۱۹-۲۱].

کار آزمایشگاهی و نتایج اندازه گیری

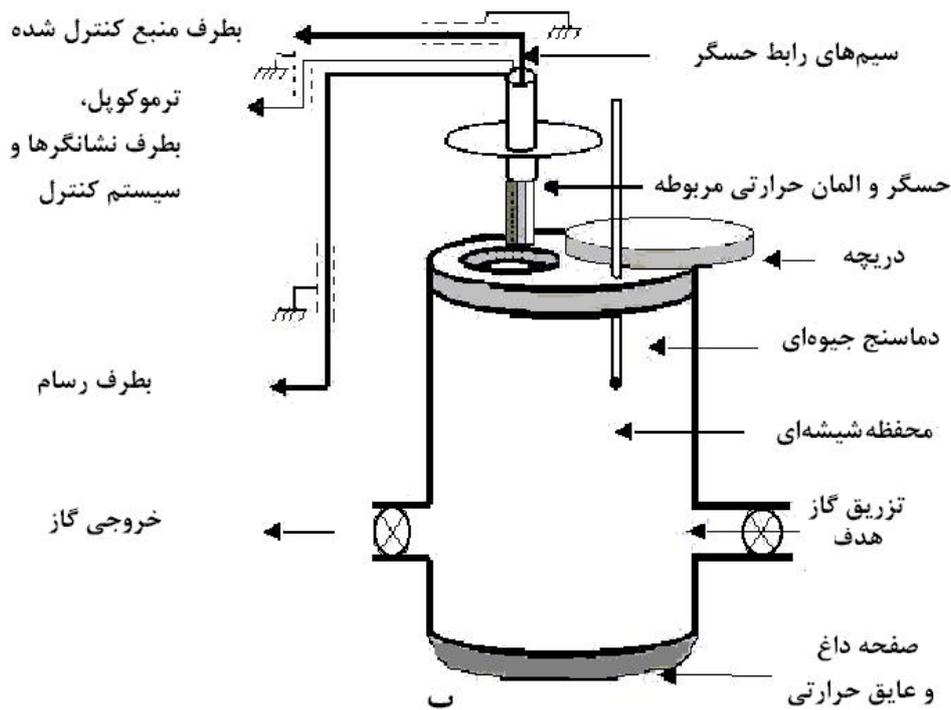
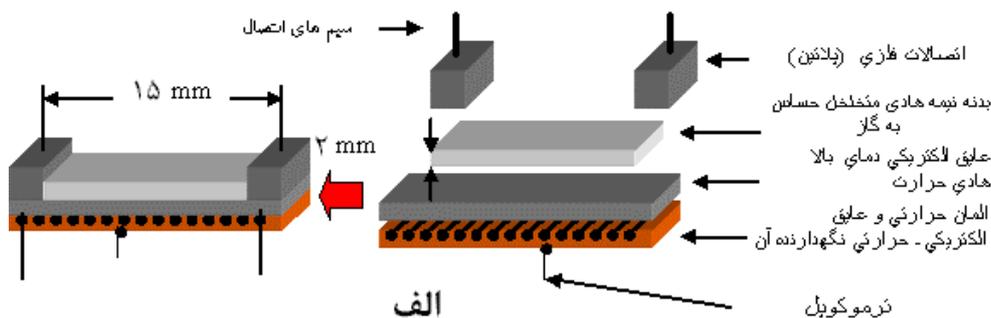
قطعات حساس الکتروسرامیکی بر اساس اکسید روی، به روش پرس کم فشار پودر شکل داده شده سینتر گردیدند. شرح مراتب روش ساخت را در متون دیگر گزارش کرده ایم [۲۴ و ۲۲] و جزئیات دیگری در شرف انتشار است. پس از ایجاد اتصالات اهمی و تعبیه صفحه داغ با دمای کنترل شده، ساختمان حسگر تکمیل گردید. شماتیک افزار ساخته شده در شکل (۱- الف) ارائه گردیده است.

برای ثبت پاسخ گذرا، سیستمی مطابق شکل (۱-ب) تهیه شد. این سیستم شامل یک محفظه بوروسیلیکاتی به حجم دو لیتر می باشد که در قاعده تحتانی آن گرمکنی تعبیه گردیده است. دمای درون استوانه در ۶۰ درجه سانتیگراد تثبیت می گردد. در آغاز آزمایش، مقدار معینی گاز هدف را به محفظه تست تزریق کردیم. مدت دو دقیقه برای یکنواختی توزیع گاز در حجم محفظه در نظر گرفته شد. بدنه حسگر را با عبور جریان از المان حرارتی مربوط گرم و دمای آن را در $^{\circ}\text{C}$

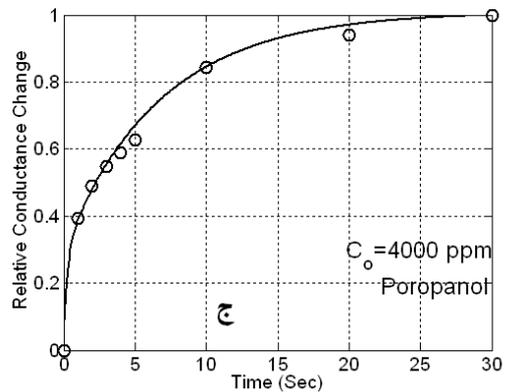
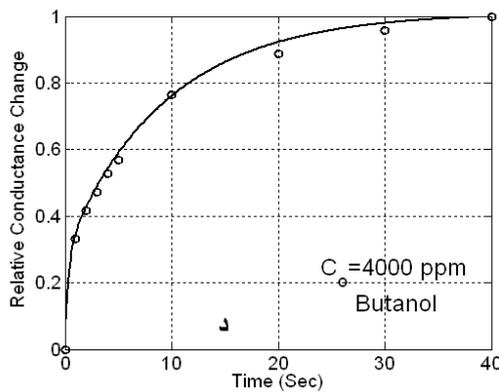
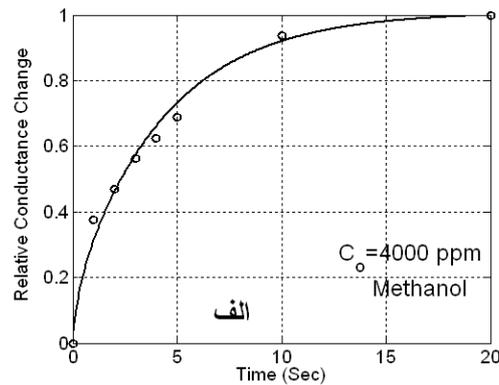
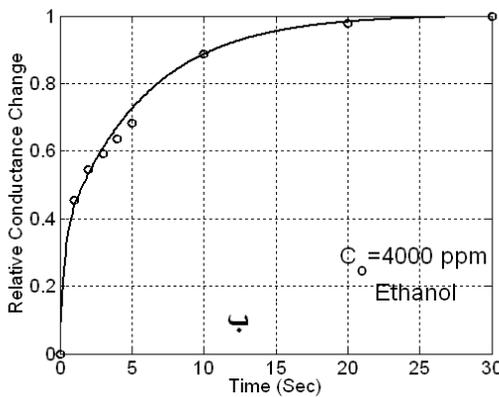
$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial N(x, t)}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن C تراکم گاز هدف بصورت آزاد، t زمان و x بعد مکانی عمود بر سطح نیمه هادی می باشد. N بیانگر مقداری از گاز نفوذی است که جذب بدنه حساس شده و با آن واکنش انجام داده و آن را متاثر نموده است.

ج. گاز ضمن نفوذ در عمق، با بدنه حساس واکنش داشته و معادله نفوذ-واکنش حاکم بر شرایط نفوذ است.
د. شدت و سرعت واکنش گاز با سطح نیمه هادی مستقل از عمق بوده ثابت می باشد.
بر اساس این فرایض شکل کلی معادله نفوذ-واکنش چنین خواهد بود. [۲۶]:



شکل ۱: طرح واره ساختار حسگر گاز (الف)، و محفظه تست بکار رفته برای ثبت پاسخ گذرا به گازهای هدف مختلف (ب).



شکل ۲: نتایج اندازه گیری (O) و شبیه سازی (-) پاسخ زمانی حسگر گاز متخلخل برای: الف) متانل، ب) اتانل، ج) پروپانل و د) بوتانل.

در ادبیات مربوط به تعامل بین گازها و بدنه های جامد متخلخل مفصلاً مورد بحث قرار گرفته است [۲۷]. شکل مورد قبول این ارتباط که ارزش تحلیلی و عملی آن توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷-۲۹]، بصورت $N = BC^r$ می باشد که در آن B و I ثابتهای وابسته به نوع گاز و تاثیر متقابل گاز و بدنه حساس هستند. از طرف دیگر، ضریب هدایت الکتریکی بدنه حساس در هر نقطه با رابطه $G = KC^r$ به تراکم گاز وابسته است [۲۹-۳۰]. در این رابطه، I همان است که قبلاً اشاره شد و K عددی ثابت است که مستقیماً مربوط به حساسیت حسگر نسبت به گاز هدف می باشد. البته همچنانکه در زیر خواهد آمد، در نتایج حل معادله نفوذ-واکنش با هدف تعیین جنس گاز، ثابت K پس از اجرای نرمالیزاسیون حذف می گردد.

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} (1 + Br C(x, t)^{r-1}) = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

یا:

$$\frac{C_{t+1,x} - C_{t,x}}{\Delta t} (1 + Br C_{t,x}^{r-1}) = D \frac{[C_{t,x+1} + C_{t,x-1} - 2C_{t,x}]}{\Delta x^2} \quad (3)$$

شرایط مرزی عبارتند از:

$$C_{t,0} = C_0 \quad \forall t$$

$$C_{t,L} = C_{t,L-1}$$

$$C_{0,x} = 0 \quad x \geq 1$$

با محاسبات عددی بر اساس رابطه ۳ تابع $C(x, t)$ برای گاز معین مشخص می شود. نهایتاً تغییر هدایت الکتریکی حسگر بر حسب زمان به شکل زیر برآورد می گردد:

معادله دیفرانسل (۱) حل تحلیلی ندارد. برای حل عددی آن، بدنه حسگر را مطابق شکل (۳) بصورت مجموعه ای از تعداد L حسگر نازک به شماره های ۱، ۲، ۳، ... تا N که به موازات هم قرار گرفته اند، در نظر می گیریم. رابطه ۱ بصورت زیر در می آید.

مورد نزدیک بودن مقادیر r و B بدست آمده را توجیه می کند. زیرا برحسب تعریف r و B ارتباط مستقیمی را با تعامل شیمیائی بین گاز هدف و سطح مؤثر بدنه حسگر دارا می باشند [۲۹-۳۰]. مقادیر r برای هر چهار الکل نزدیک به عدد یک بدست آمده است. یعنی اینکه مقدار تعامل گاز با بدنه متخلخل در تمام نواحی آن متناسب با تراکم گاز بوده است. این معنی بر اساس اینکه تراکم گاز در کل ساختار نمی توانسته است از 4000 ppm بیشتر باشد، توجیه می شود. خصوصاً که در آزمایشهای اولیه خطی بودن پاسخ پایدار حسگر مورد مطالعه نسبت به آلاینده های مورد بحث تا حدود 5000 ppm مشاهده شده بود. این مورد توسط دیگران نیز گزارش شده است [۱۴ و ۳۳]. از طرف دیگر شدت اندر کنش گاز با بدنه حساس، در تراکم ثابت، بستگی به پارامتر B دارد و ملاحظه می شود که B برای الکل های مورد بررسی بجز در مورد بوتانل، با ازدیاد وزن مولکولی کاهش یافته است. وضعیت استثنائی بوتانل می تواند بدین ترتیب توجیه گردد که بخار آن در دمای 280°C بدنه حساس، پایدار نبوده درصدی از آن تجزیه می گردد. لذا مقدار بزرگتر B بدست آمده برای بوتانل ناشی از اندرکنش محصول این تجزیه با سطح بدنه متخلخل می باشد.

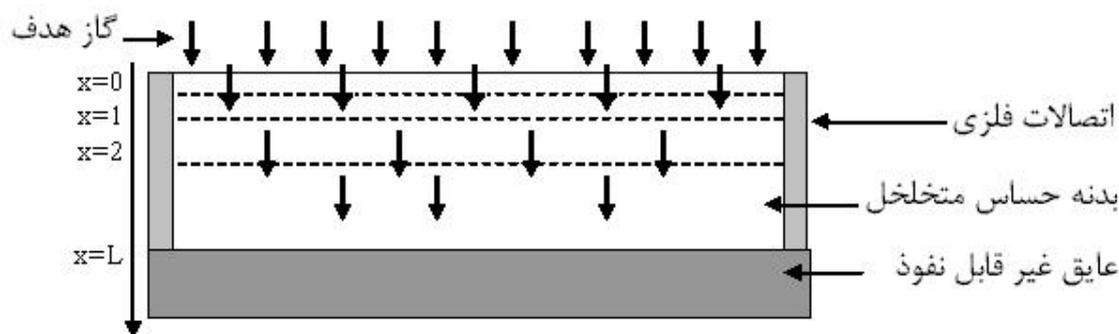
عملاً مشاهده گردید که تعیین مجموعه چهار پارامتر D ، r ، B و ΔG_{\max} می تواند نوع و تراکم گاز هدف را تعیین نماید. پارامترهای D ، r و B متغیرهای کندی از تراکم گاز بوده عمل انطباق با اطلاعات مربوط به

$$\Delta G(t) = \frac{K}{L} \sum_{i=1}^L C_{t,i}^r \quad (4)$$

بیشینه تغییر هدایت (ΔG_{\max}) زمانی حادث می شود که تراکم گاز در کل بدنه حسگر به حالت پایدار برسد. با نرمالیزه کردن رابطه (۴)، یعنی تقسیم آن به ΔG_{\max} ، پاسخ گذرای نرمالیزه شده حسگر حاصل می شود که مستقل از K می باشد. نتایج محاسبات بصورت منحنی های پیوسته در اشکال (۲، الف-د) ارائه شده است. در هریک از موارد الف-د تعیین پارامترهای r ، B ، D و ΔG_{\max} از طریق سعی و خطا و با روش بهینه سازی Nealder-Mead انجام گردید [۳۱]. در این روش با تغییر پارامترها بهترین انطباق تابع $\frac{\Delta G(t)}{\Delta G_{\max}}$ روی نقاط حاصل از اندازه گیری، انجام می گیرد. نتایج حاصل در جدول (۱) ارائه شده است.

ملاحظه می شود که پارامتر تشخیص D ، بطور منظم با ازدیاد جرم مولکولی گاز کاهش یافته است. D حسب تعریف (معادله ۲) ضریب نفوذ گاز هدف در بدنه متخلخل در غیاب جذب سطحی و واکنش می باشد و ارتباط معکوس ضریب نفوذ گازها با وزن و حجم مولکولی گاز مبرهن است [۳۲]. به دلیل نزدیکی مقادیر r و B گازهای مورد بررسی در آزمایشهای حاضر، عملاً تفاوت ضرائب نفوذ آنها در بدنه متخلخل حسگر برای تمیز آنها از یکدیگر بکارگرفته شده است.

چهار گاز هدف انتخاب شده برای آزمایش، همه الکل بوده ویژگیهای شیمیائی مشابهی را حائز هستند. این



شکل ۳: نمایش نفوذ تدریجی و تک بعدی گاز هدف به عمق بدنه متخلخل حساس به گاز.

نتیجه گیری

در این مقاله روش جدیدی برای شناخت تک گاز هدف توسط یک حسگر گاز مقاومتی با ساختمانی خاص پیشنهاد گردید. پایه کار بر این مفهوم استوار است که با افزایش ضخامت لایه حساس و متخلخل، نقش جنس گاز در تعیین پاسخ گذرای حسگر ارزش بیشتری پیدا کرده آسانتر قابل شناسائی می گردد. بر اساس مدلی ساده، پاسخ گذرای حسگر گاز مقاومتی با بدنه الکترو سرامیکی متخلخل، شبیه سازی گردید. در پاسخ بدست آمده علاوه بر بیشینه تغییر هدایت الکتریکی، سه پارامتر وابسته به ویژگیهای فیزیکی و شیمیائی گاز هدف تشخیص داده شد. حسگر گازی بر اساس لایه حساس به گاز ضخیم اکسید روی ساخته شده پاسخ گذرای آن به چهار گاز هدف ثبت و مطالعه شد. به روش بهینه سازی مقادیر پارامترهای فوق الذکر برای بهترین انطباق پاسخ واقعی ونتایج شبیه سازی، تعیین گردید. نشان داده شد که ترکیب چهار پارامتر بدست آمده می تواند برای شناسائی تک گاز هدف مورد استفاده قرار گیرد.

تجارب قبلی سیستم را ساده تر می سازد. برای تشخیص یک گاز مجهول، ابتدا پارامترهای ΔG_{max} و B ، r ، D ، بروش فوق از پاسخ گذرای حسگر استخراج می گردند. سپس مقادیر حاصل به روش تطبیقی، با تجارب قبلی سیستم مقایسه و نوع گاز تعیین می گردد. حسگر ساخته شده توانست بروش فوق چهار گاز متانول، اتانول، پروپانول و بوتانول را در محدوده تراکم 2000 ppm تا 10000 ppm بدون خطا از یکدیگر تمیز دهد. در خارج از این محدوده تراکم، خطای تشخیص بعلاوه مهم تر شدن عوامل ثانویه وابسته به تراکم گاز، به مقدار غیر قابل قبول می رسد. به عنوان مثال در تراکم حدود 10000 ppm روش ارائه شده در تشخیص بین متانول و اتانول اشتباه نشان داد، در حالی که در محدوده وسیعتری از تراکم قادر به تمیز دادن متانول از بوتانول بود. پهن تر کردن محدوده عملیاتی روش پیشنهادی مستلزم در نظر گرفتن آثار ثانوی در مدل تحلیلی می باشد. مثلاً در نظر است ارتباط پارامتر r با تراکم در مرحله بعدی کار وارد معادلات گردد.

جدول ۱: پارامترهای تشخیص حاصل به روش ارائه شده برای چهار گاز آلاینده.

بوتانول	پروپانول	اتانول	متانول	گاز پارامتر
۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۹۰	D
۱/۰۶	۱/۰۶۱	۱/۰۴۹	۱/۰۳	R
۷/۳	۵/۷	۶/۳	۱۰	B
۱۲/۱	۱۰/۴	۱۱/۸	۱۵/۹	$\Delta G_{max}(\mu\text{mho})$

مراجع

- 1 - Maffei T. G., Owen G. T., Penny, M. W., Starke, T. K. H., Clark, S. A., Ferkel, H. and Wilks, S. P. (2002). "Nano-crystalline SnO_2 gas sensor response to O_2 and CH_4 at elevated temperature investigated by XPS." *Surface Science*, Vol. 520, PP. 29-34.
- 2 - Williams, D. E. and Pratt, K. F. E. (2000). "Microstructure effects on the response of gas-sensitive resistors based on semiconducting oxides." *Sensors and Actuators*, Vol. B 70, PP. 214-221.

- 3 - Sayago, I., Gutiérrez, J., Arés, J., Robla, L., Horrillo, J. I., Rino, M. C., Getino, J. and Agapito, J. A. (1995). "The effect of additives in tin oxide on the sensitivity and selectivity to NO_x and CO." *Sensors and Actuators*, Vol. B 26-27, PP. 19-23.
- 4 - Mangamman, G., Jayaraman, V., Gnanasekaran, T. and Periaswami, G. (1998). "Effect of silsca additions on H₂S sensing properties of Cu-SnO₂ sensors." *Sensors and Actuators*, Vol. B 53, PP. 133-139.
- 5 - Wong, K. K. L., Tang, Z., Sin, J. K.O., Chan, Ph. C.H., Cheung, P. W., and Hiraoka, H. (1995). "Selectivity enhancement of tin dioxide gas sensor with polymer membrane." *IEEE conf. On Sensors and actuators*, PP. 179-182.
- 6 - Gurbuz, Y., Kang, W. P., Davidson, J. L. and Kerns, D. V. (1999). "Current conduction mechanism and gas adsorption effects on device parameters of the Pt/SnO_x/diamond gas sensor." *IEEE Transaction Electron Devices*, Vol. 46 No. 5, PP. 914 - 920.
- 7 - Penza, M., Cassano G. and Tortorella, F. (2001). "Gas recognition by activated WO₃ thin-film sensors array." *Sensors and Actuators*, Vol. B 81, PP. 115-121.
- 8 - Romain, A.C., Nicolas, J., Wiertz, V., Maternova, J. and André, Ph. (2000). "Use of a simple tin oxide sensor array to identify five malodours collected in the field." *Sensors and Actuators*, Vol. B 62, PP. 73-79.
- 9 - Llobet, E., Brezmes, J., Vilanova, X., Sueiras, J. E. and Correig, X. (1997). "Qualitative and quantitative analysis of volatile organic compounds using transient and steady state responses of a tick-film tin oxide gas sensor array." *Sensors and Actuators*, Vol. B 41, PP. 13-21.
- 10 - Galdikas, A., Mironas, A., Senulien, D. and etkus, A. (2000). "Specific set of the time constants for characterization of organic volatile compounds in the output of metal oxide sensors." *Sensors and Actuators*, Vol. B 68, PP. 335-343.
- 11 - Choi, W. K., Song, S. K., Cho, J. S., Yoon, Y. S., Jung, H. J., Koh, S. K. and Choi, D. (1997). "H₂ gas-sensing characteristics of SnO_x sensors fabricated by a reactive ion-assisted deposition with/without an activator layer." *Sensors and Actuator*, Vol. B 40, PP. 21-27.
- 12 - Llobet, E., Vilanova, X., Brezmes, J., Sueiras, J. E. and Correig, X. (1998). "Transient response of thick film tin oxide gas sensor to multicomponent gas mixtures." *Sensors and Actuators*, Vol. B 47, PP. 104-112.
- 13 - Jung, S. J. and Yanagida, H. (1996). "The characterization of a CuO/ZnO heterocontact-type gas sensor having selectivity for CO gas." *Sensors and Actuator*, Vol. B 37, PP. 55-60.
- 14 - Hossein-Babaei, F. and Orvatinia, M. (2003). "Thickness dependence of sensitivity in thin film tin oxide gas sensors deposited by vapor pyrolysis." *International Journal of Engineering*, Vol. 16, No. 1, PP. 33-40.
- 15 - Hossein-Babaei, F. and Orvatinia, M. (2003). "Analysis of thickness dependence of the sensitivity in thin film resistive gas sensors." *Sensors and Actuators*, Vol. B 89, PP. 256-26.
- 16 - Matsunaga, N., Sakai, G., Shimano, K. and Yamazoe, N. (2002). "Diffusion equation-based study of thin film semiconductor gas sensor-response transient." *Sensors and Actuators*, Vol. B 83, PP. 216-221.
- 17 - Hossein-Babaei, F. and Orvatinia, M. (2003). "Gas diagnosis based on selective diffusion retardation in air filled capillaries." *Sensors and Actuators*, Vol. B 96, No. 1-2, PP. 298-303.
- 18 - Hossein-Babaei, F. and Orvatinia, M. (2003). "A novel approach to hydrogen sensing." *IEEE Sensors Journal*, Accepted for publications.

- 19 - Maekawa, T., Suzuki, K., Takada, T., Kobayashi, T. and Egashira, M. (2001). "Odor identification using a SnO₂-based sensor array." *Sensors and Actuators*, Vol. B 80, PP. 51-58.
- 20 - Marquis, B. T. and Vetelino, J. F. (2001). "A semiconducting metal oxide sensor array for the detection of NO_x and NH₃." *Sensors and Actuators*, Vol. B 77, PP. 100-110.
- 21 - Lee, D. S., Jung, J. K., Lim, J. W., Huh J. S. and Lee, D. D. (2001). "Recognition of volatile organic compounds using SnO₂ sensor array and pattern recognition analysis." *Sensors and Actuators*, Vol. B 77, PP. 228-236.
- ۲۲ - حسین بابائی، ف. و معصومی، م. "اثر آرایش مس بر حساسیت حسگرهای گاز لایه ضخیم اکسید روی." *نهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، اردیبهشت (۱۳۸۰)*.
- 23 - Hossein-Babaei F. and Taghibakhsh, F. (2000). "Electrophoretically deposited zinc oxide thick film gas sensors." *Electronics Lett*, Vol. 36, PP. 1815-1816.
- ۲۴ - عروتنی نیا، م. "سنسورهای گاز مقاومتی تشخیصی بر اساس تحلیل رفتار گذرا." پایان نامه دوره دکتری مهندسی برق-الکترونیک، زیر نظر دکتر فرامرز حسین بابائی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، مهر (۱۳۸۲).
- 25 - Ding, J., McAvoy, T. J., Cavicchi, R. E. and Semanik, S. (2001). "Surface state trapping models for SnO₂-based microhotplate sensors." *Sensors and Actuators*, Vol. B 77, PP. 597-613.
- 26 - Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*, Second Edition, Oxford university press, New York, PP. 326-330.
- 27 - Smith, J. M. (1973). *Chemical engineering kinetics*, 2th edition, Mc Graw-Hill USA PP. 334.
- 28 - Szekely, J., Evans J. W. and Sohn, H. Y. (1979). *Gas- solid reaction*, Academic Press, PP. 38-39.
- 29 - Honglong Lu., Wencai, Ma., Jianhua, Gao. and Jianming, Li. (2000). "Diffusion-reaction theory for conductance response in metal oxide gas sensing thin films." *Sensors and Actuators*, Vol. B 66, PP. 228-231.
- 30 - Vilanova, X. Llobet, E., Alcubilla, R., Sueiras, J. E. and Correig, X. (1996). "Analysis of conductance transient in thick-film tin oxid gas sensors." *Sensors and Actuators*, Vol. B 31, PP. 175-180.
- 31 - Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H. and Wright, P. E. (1998). "Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions." *SIAM Journal of Optimization*, Vol. 9, No. 1, PP. 112-147.
- 32 - Satterfield, C. N. (1970). *Mass transfer in heterogeneous catalysis*, M.I.T. Press Cambridge, London, England., PP. 41-47.
- 33 - Kim, C.K., Choi, S. M., Noh, I. H., Lee, J. H., Hong, C., Chae, H. B., Jang, G. E. and Park, H. D. (2001). "A study on thin film gas sensor based on SnO₂ prepared by pulsed laser deposition method." *Sensors and Actuators*, Vol. B 77, PP. 463-467.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Diffusion-Reaction