



## Study of the Effect of Various Nanostructures in the Measurement of CO<sub>2</sub> Sensors by Electrical and Thermal Conductivity Methods

F. Salimian<sup>1</sup>, A. Hemmati<sup>2</sup>, A. Ghaemi<sup>3\*</sup>

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology

2- Assistant Professor of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology

3- Professor of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology

Email: aghaemi@iust.ac.ir

### Abstract

*This paper examines new approaches in the synthesis of carbon dioxide gas sensors using conductometry. Since 2020, conductive sensors have experienced significant growth due to their specific advantages. These sensors are divided into thermal and electrical categories, each offering specific benefits depending on application needs and environmental conditions; if accuracy and rapid response are crucial, thermal conductive sensors are a better option; however, if cost and compatibility with electronic systems are a priority, electrical sensors can be a suitable choice. Nanomaterials such as metal oxides and polymer nanoparticles are recognized as advanced sensing materials, providing improvements in selectivity, sensitivity, and response time. The study also addresses the conductive properties of nanocomposites and the impact of nanoparticles on them, discussing the advantages and disadvantages of each sensor technology. Studies have shown that metal oxides possess significant conductivity at high temperatures around 600°C.*

Received: 18 October 2024

Accepted: 1 March 2025

Page Number: 36-47

### Keywords:

Nanosensor,  
Carbon Dioxide Sensor,  
Conductometry,  
Electrical, Thermal

### Please Cite this Article Using:

Salimian, F., Hemmati, A., & Ghaemi, A. (2026). Study of the Effect of Various Nanostructures in the Measurement of CO<sub>2</sub> Sensors by Electrical and Thermal Conductivity Methods. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(142), 36-47, [In Persian].



## مطالعه و بررسی تأثیر انواع نانوساختارها در سنجش حسگرهای دی اکسید کربن به روش هدایت سنجی الکتریکی و حرارتی

فیروزه سلیمیان<sup>۱</sup>، علیرضا همتی<sup>۲</sup>، احد قائمی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استاد تمام مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

پیام‌نگار: [aghaemi@iust.ac.ir](mailto:aghaemi@iust.ac.ir)

### چکیده

این مقاله به بررسی رویکردهای جدید در سنتز حسگرهای گاز کربن دی اکسید، با استفاده از روش هدایت سنجی می‌پردازد. از سال ۲۰۲۰ به بعد، حسگرهای هدایتی به دلیل برتری‌های خاص خود، رشد چشم‌گیری داشته‌است. این حسگرها به دو دسته حرارتی و الکتریکی تقسیم می‌شود و هر کدام بسته به کاربرد و شرایط محیطی، برتری‌های خاصی دارد؛ اگر دقت و پاسخ سریع مهم باشد، حسگرهای هدایت حرارتی گزینه بهتری است، اما اگر هزینه و سازگاری با سامانه‌های الکترونیکی در اولویت باشد، حسگرهای الکتریکی می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. نانومواد مانند اکسیدهای فلزی و نانوذرات پلیمری به عنوان مواد حسگر پیشرفته شناخته می‌شوند و بهبودهایی در گزینش پذیری، حساسیت و زمان پاسخ ارائه می‌کنند. همچنین این مطالعه، به بررسی خواص رسانایی نانوکامپوزیت‌ها و تأثیر نانوذرات بر آن‌ها می‌پردازد و برتری‌ها و کاستی‌های هر فناوری حسگر را بحث و بررسی می‌کند. مطالعات نشان داده که اکسیدهای فلزی دارای خاصیت رسانایی چشم‌گیری در دماهای بالا در حدود  $600^{\circ}\text{C}$  هستند.

### کلیدواژه‌ها:

نانوحسگر،  
حسگر کربن دی اکسید،  
هدایت سنجی، الکتریکی،  
حرارتی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۷  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱  
شماره صفحات: ۳۶ تا ۴۷

\* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

سلیمیان، فیروزه، همتی، علیرضا، و قائمی، احد. (۱۴۰۴). مطالعه و بررسی تأثیر انواع نانوساختارها در سنجش حسگرهای دی اکسید کربن به روش هدایت سنجی الکتریکی و حرارتی، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۴۲)، ۳۶-۴۷.

## ۱. مقدمه

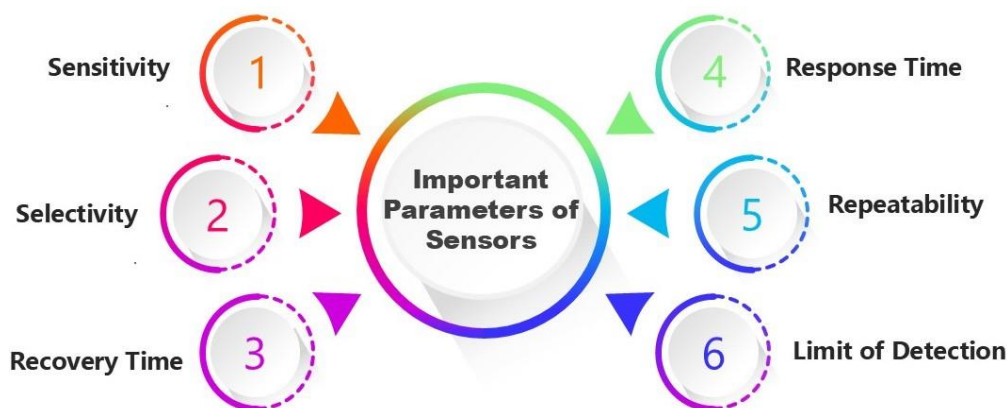
حسگرهای گاز از واکنش‌های فیزیکی یا شیمیایی برای تبدیل غلظت گازهای مختلف به سیگنال‌های الکتریکی و مقادیر خروجی پس از محاسبه استفاده می‌کند و به‌طور گسترده برای تشخیص گازهای سمی و مضر استفاده می‌شود. سنسور گاز وسیله‌ای است که برای نظارت‌بر وجود یا سطح گاز در یک محیط ثابت استفاده می‌شود. این سنسورها معمولاً در معادن زغال سنگ، صنایع غذایی، نفت، شیمیایی، پزشکی، سامانه‌های شهری و حمل‌ونقل و غیره استفاده می‌شود که می‌توانند حضور و غلظت گازهای قابل احتراق، قابل اشتعال، سمی یا مصرف اکسیژن را اندازه‌گیری کنند. بازار جهانی حسگرها شاهد گسترش روزافزون بوده‌است. در میان گونه‌های مختلف حسگر، حسگرهای گاز به‌طور گسترده در سناریوهای متعددی، مانند: محیط‌های انفجاری یا سمی، اینترنت اشیا (IOT)<sup>۱</sup>، نظارت‌بر کیفیت هوای داخل ساختمان، تشخیص پزشکی، ارزیابی کیفیت غذا و غیره به‌کار می‌روند. هنگامی که نانومواد فعال سطحی با گاز تماس پیدامی‌کند، برهم‌کنش‌های گاز و جامد مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی ذاتی آن‌ها مانند رسانایی، خازن، عملکرد کار، خواص نوری و انرژی و واکنش را به‌دلیل مساحت سطح بزرگ تغییر می‌دهد [۱].

مشخصه‌های مختلفی در ساخت سنسورهای گازی محل توجه قرار می‌گیرد، که مهم‌ترین آن‌ها در شکل (۱) به نمایش درآمده‌است. حسگرهایی که گاز کربن دی‌اکسید ( $CO_2$ )<sup>۲</sup> را شناسایی می‌کنند،

بازار بالقوه قابل توجهی دارند، زیرا در صنایع مختلفی، از جمله: بسته‌بندی مواد غذایی، آزمایش کیفیت هوای داخل ساختمان، و نظارت‌بر انتشار  $CO_2$ ، در تلاش برای کاهش گرمایش جهانی، به‌کار می‌روند. شکل (۲) انواع مختلف حسگرهای ساخته‌شده را برای سنجش گاز کربن دی‌اکسید نشان می‌دهد [۲].

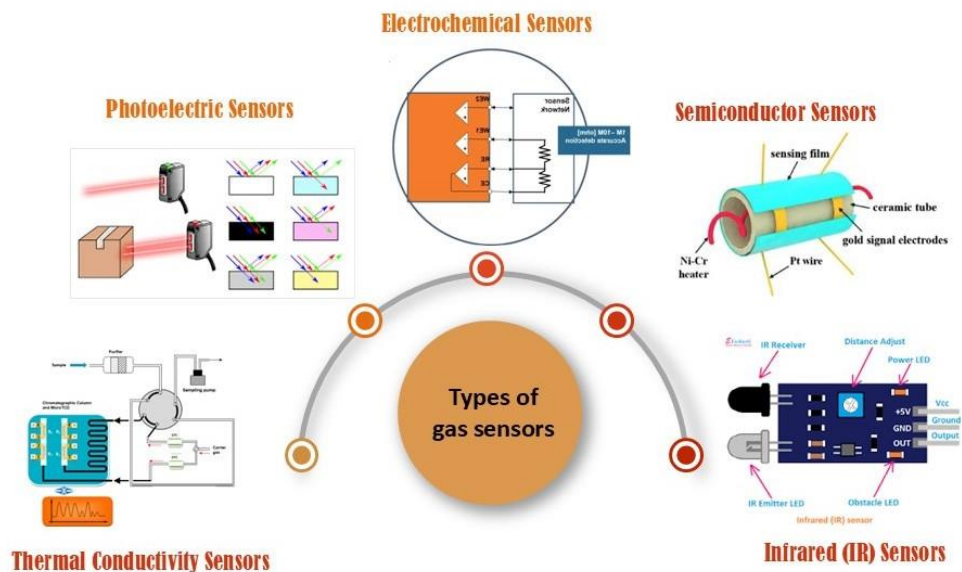
این حسگرها نقش مهمی در پایش محیطی، کنترل ایمنی شیمیایی و کاربردهای مختلف صنعتی دارند. با این حال، تشخیص کربن دی‌اکسید با دقت و قابلیت اطمینان - به دلیل گستره وسیعی از غلظت کربن دی‌اکسید که باید اندازه‌گیری شود - امری چالش‌برانگیز است. با توجه به طیف متنوعی از کاربردها برای حسگرهای گاز کربن دی‌اکسید، توسعه مواد و رویکردهای جدیدی که می‌توانند به‌طور مؤثر تحت شرایط مختلف عمل کنند، بسیار مهم است.

سازو کار حسگر گاز کربن دی‌اکسید چنین است که ابتدا اکسیژن محیط روی سطح ماده جذب می‌شود و الکترون‌های سطح نانوماده را می‌گیرد و به یون‌های اکسیژن تبدیل می‌شود. وقتی گاز کربن دی‌اکسید وارد محیط می‌شود، با یون‌های اکسیژن جذب‌شده روی سطح ماده واکنش می‌دهد و الکترون‌ها آزاد می‌شوند. این فرایند باعث کاهش لایه تخلیه و تغییر در ظرفیت سطح می‌شود. این تغییرات باعث تغییر مقاومت الکتریکی سنسور می‌شود که به‌وسیله سامانه تشخیصی به‌عنوان حضور گاز کربن دی‌اکسید شناسایی می‌شود. شکل (۳) طرحواره کلی از سازو کار یک حسگر گاز کربن دی‌اکسید را به‌طور کامل نشان می‌دهد [۳].



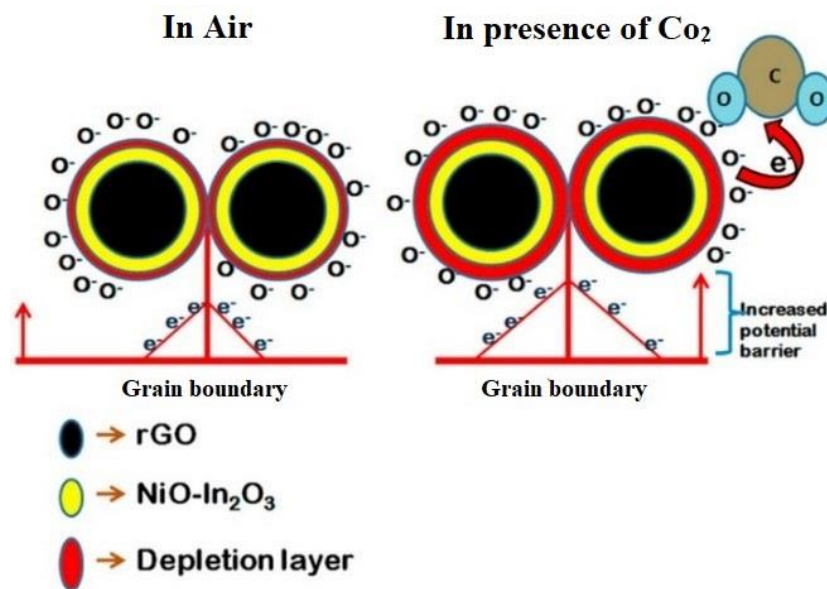
شکل ۱. مشخصه‌های سنسور تشخیص گاز.

Figure 1. Gas detection sensor parameters.



شکل ۲. انواع حسگرهای تشخیص گاز کربن دی اکسید.

Figure 2. Types of carbon dioxide gas detection sensors.

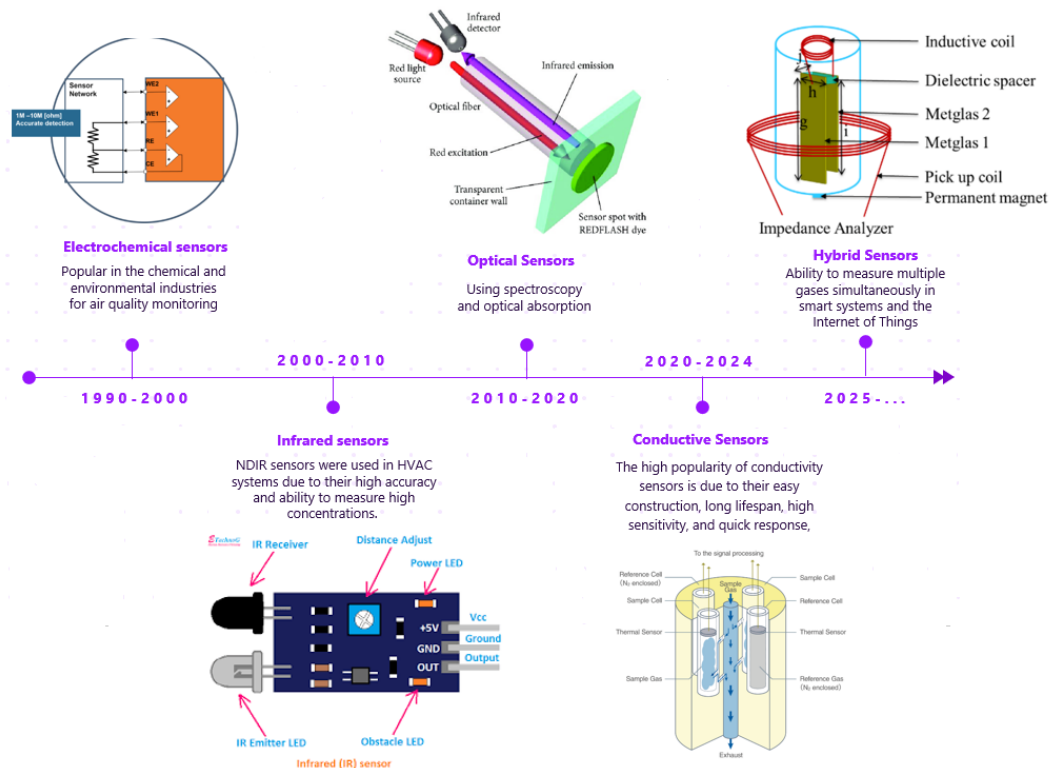


شکل ۳. سازوکار حسگر گاز کربن دی اکسید.

Figure 3. Carbon dioxide gas sensor mechanism.

عملکرد تشخیص گاز استفاده می کنند. این سنسورها به دلیل ترکیب مواد، دارای برتری های بیشتری مانند افزایش حساسیت، انتخاب پذیری بهتر، پایداری بالاتر و پاسخ دهی سریع تر هستند.

شکل (۴) نمایی از تاریخچه سنسورهای را که از سال ۱۹۸۰ تاکنون برای شناسایی گاز کربن دی اکسید به کاررفته است، ارائه می دهد. در رویکردهای آتی، شاهد ساخت سنسورهای ترکیبی خواهیم بود که از ترکیب مواد مختلف با خواص مکمل برای بهبود



شکل ۴. تاریخچه سنسورهای گازی.

Figure 4. History of gas sensors.

قابل اشتعال و گازهای سمی خاص در هوا استفاده می‌شود. جذب یا واکنش یک گاز بر روی سطح ماده نیمه‌رسانا باعث ایجاد تغییر در چگالی الکترون‌های رسانا در عنصر حسگر می‌شود. این واکنش شیمیایی را می‌توان با چهار مرحله به شرح زیر توصیف کرد:

- (۱) پیش جذب اکسیژن بر روی سطح مواد نیمه‌هادی
- (۲) جذب گاز خاص
- (۳) واکنش بین اکسیژن و گاز جذب شده
- (۴) دفع گاز واکنش داده در سطح

## ۱-۲ حسگرهای هدایت حرارتی

سنسور رسانایی حرارتی یک سنسور اثر حرارتی است که می‌تواند غلظت گاز را با توجه به اختلاف رسانایی حرارتی گازهای مختلف و هوا اندازه‌گیری کند. معمولاً اختلاف رسانایی حرارتی با استفاده از مدار و تستون<sup>۲</sup> به تغییر مقاومت تبدیل می‌شود [۵]. در شکل (۶) طرحواره‌ای از یک حسگر هدایت حرارتی مشاهده می‌شود.

نتایج نشان داده‌است که سنسورهای هدایتی (CGS)<sup>۱</sup> با برتری‌های ساخت آسان و پردازش سیگنال و حساسیت بالا بیشترین محبوبیت را به دست آورده‌اند. این دسته از سنسورها، دارای طیف گسترده‌ای از گازهای هدف، پاسخ سریع، هزینه کم و عمر طولانی هستند [۴].

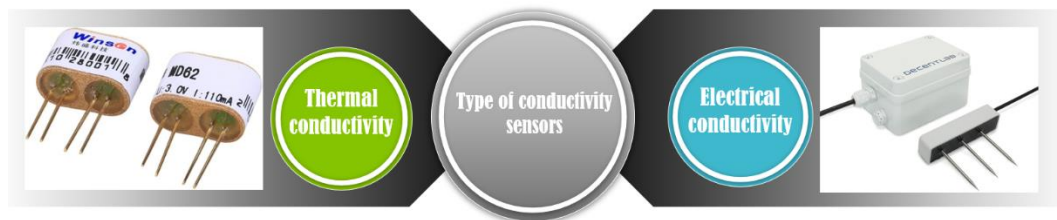
در این مقاله انواع سنسورهای هدایتی گاز کربن دی‌اکسید را که شامل حسگرهای هدایتی الکتریکی و هدایتی حرارتی است (شکل (۵))، بررسی و برتری‌ها و کاستی‌های هر کدام را بیان کرده‌است. هم‌چنین، خاصیت هدایتی حرارتی و هدایت الکتریکی مهم‌ترین نانومواد مبتنی بر این دسته از سنسورها را - هم‌چون اکسیدهای فلزی نیمه‌هادی، نانومواد کربنی و غیره - با هم مقایسه کرده و عوامل مؤثر بر هدایت حرارتی را برشمرده‌است. مطالعات نشان می‌دهد که نانومواد که خاصیت هدایتی بهتری دارد برای استفاده در سنسورهای هدایتی مناسب‌تر است.

## ۲. سنسورهای هدایتی

سنسورهای هدایتی به‌طور گسترده‌ای برای تشخیص گازهای

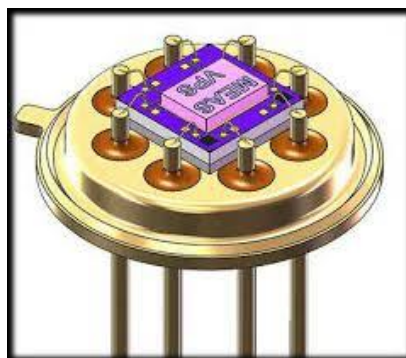
2. Wheatstone Bridge

1. Conductive Gas Sensors



شکل ۵. دسته‌بندی انواع حسگرهای هدایتی.

Figure 5. Classification of types of directional sensors.

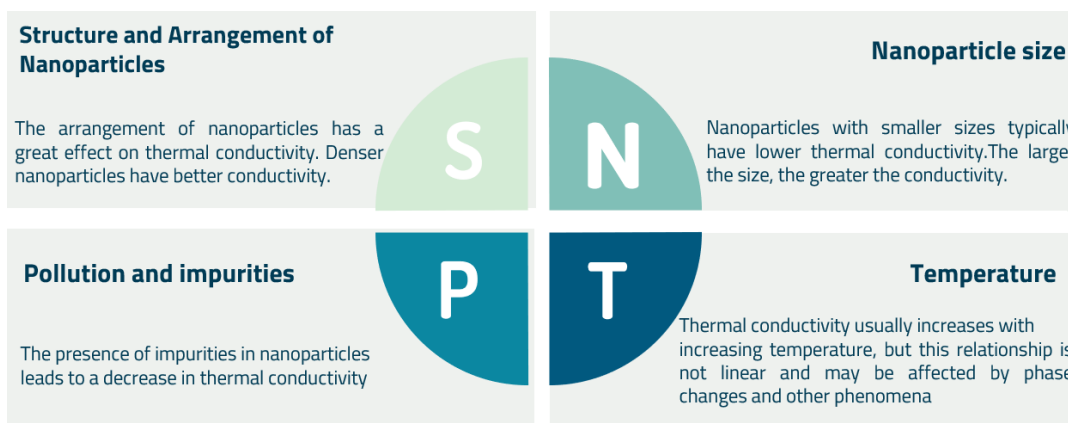


شکل ۶. طرحواره حسگر هدایت حرارتی.

Figure 6. Schematic of thermal conductivity sensor.

نانوذرات در حسگرهای هدایت حرارتی می‌تواند به بهبود عملکرد، دقت و سرعت این حسگرها کمک کند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که نانوذرات به یکی از اجزای کلیدی در توسعه حسگرهای پیشرفته تبدیل شوند. در شکل (۷) تعدادی از این عوامل به اختصار شرح داده شده است.

هر گاز دارای هدایت حرارتی خاص خود است که به طور مستقیم بر عملکرد حسگر تأثیر می‌گذارد. گازهایی مانند هیدروژن و هلیوم هدایت حرارتی بالایی دارند، درحالی‌که گازهایی مانند دی‌اکسید کربن و متان هدایت حرارتی کمتری دارند. توسعه مواد پیشرفته جدید نیاز به درک عمیق از مواد و خواص بین سطحی آنها و همچنین، رفتار آنها تحت فرایندهای تولید دارد. لذا، استفاده از



شکل ۷. عوامل مؤثر بر هدایت حرارتی.

Figure 7. Effective factors on thermal conductivity.

## ۲-۲ حسگرهای هدایت الکتریکی

سنسورهای گاز با هدایت الکتریکی دستگاه‌هایی است که وجود و غلظت گازها را با اندازه‌گیری تغییرات در هدایت الکتریکی آن‌ها تشخیص می‌دهد. این سنسورها معمولاً از موادی استفاده می‌کند که در پاسخ به جذب مولکول‌های گاز، خاصیت هدایت الکتریکی خود را تغییر می‌دهد. این دسته از سنسورها معمولاً شامل یک ماده نیمه‌هادی است که اغلب اکسیدهای فلزی مانند  $\text{SnO}_2$ ،  $\text{ZnO}$  یا  $\text{TiO}_2$  است و در معرض گازهای خاص، تغییراتی در هدایت الکتریکی خود نشان می‌دهد. هنگامی که یک مولکول گاز با ماده حسگر تماس پیدا می‌کند، می‌تواند الکترون‌ها را اهدا یا دریافت کند که منجر به تغییر در هدایت ماده می‌شود. بسیاری از سنسورهای هدایتی در دماهای بالا کار می‌کنند تا سرعت واکنش بین گاز و ماده حسگر را افزایش دهند و حساسیت و زمان پاسخ را بهبود بخشند. سنسورهای گاز با هدایت الکتریکی ابزارهای ارزشمندی در زمینه‌های مختلف، از نظارت محیطی تا ایمنی صنعتی هستند. توانایی آن‌ها در تشخیص گازها بر اساس تغییرات در خواص الکتریکی، آن‌ها را چندمنظوره و پرکاربرد کرده است [۶]. شکل (۸) برتری‌ها و کاستی‌های حسگرهای الکتریکی و حرارتی را نشان می‌دهد. اگر دقت و پاسخ سریع مهم باشد، حسگرهای هدایت حرارتی گزینه بهتری است؛ اما اگر هزینه و سازگاری با سامانه‌های الکترونیکی در اولویت

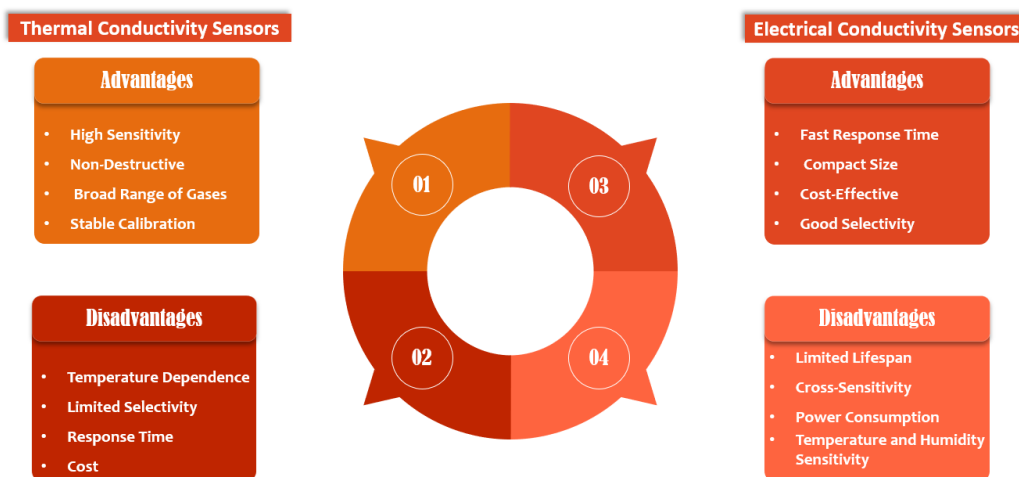
باشد، حسگرهای الکتریکی می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

## ۳. مواد استفاده‌شونده در نانوحسگرهای کربن‌دی‌اکسید

نانومواد<sup>۴</sup> به دلیل خواص منحصر به فردشان، مانند مساحت سطح بالا، خواص الکترونیکی قابل تنظیم و حساسیت افزایش‌یافته، در توسعه حسگرهای گاز بسیار برجسته شده‌است. انتخاب مواد مناسب برای سنسورهای هدایت حرارتی<sup>۵</sup> گاز کربن‌دی‌اکسید بستگی به نیازهای خاص کاربرد، دقت مورد نظر و شرایط محیطی دارد. ترکیب مواد مختلف می‌تواند به بهبود عملکرد سنسورها کمک کند و حساسیت و دقت اندازه‌گیری را افزایش دهد [۲]. در این بخش به مطالعه و بررسی اختصاصی انواع مواد مبتنی بر نانوحسگرهای کربن‌دی‌اکسید پرداخته می‌شود.

نانواکسیدهای فلزی نیمه‌هادی<sup>۶</sup>، نانوذرات مواد پلیمری، نانومواد کربنی و نانوکامپوزیت‌ها<sup>۷</sup> پرداخته می‌شود. شکل (۹) نموداری از روش‌های سنتز نانو مواد را نشان می‌دهد. بر اساس مطالعات، روش‌های فیزیکی معمولاً به کنترل بهتری بر روی اندازه و شکل نانومواد منجر می‌شود و هم‌چنین، به خلوص بالاتر نانومواد کمک می‌کند.

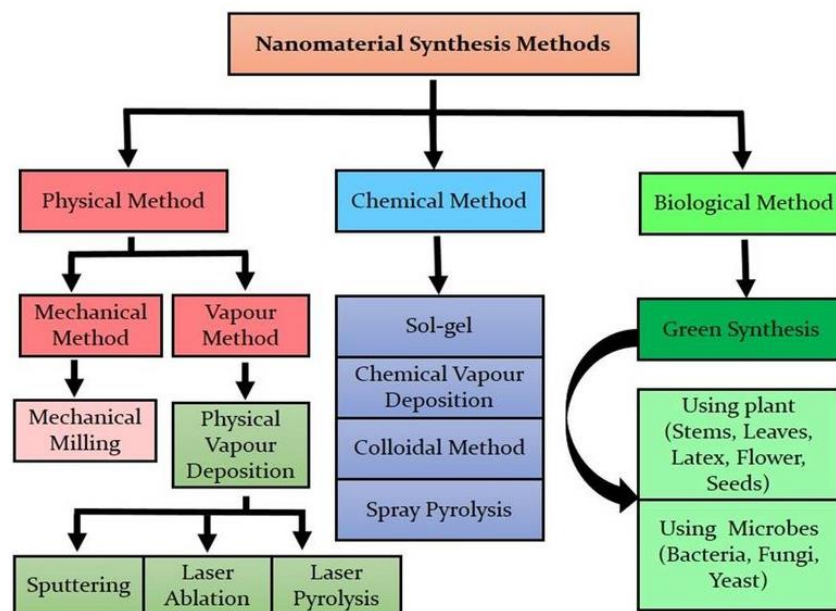
از بین نانومواد مختلفی که برای سنسورهای تشخیص گاز وجود دارد به بررسی اختصاصی نانومواد تشخیص گاز کربن‌دی‌اکسید، از جمله:



شکل ۸. برتری‌ها و کاستی‌های حسگرهای هدایت حرارتی و هدایت الکتریکی.

Figure 8. Advantages and disadvantages of thermal and electrical sensors.

- |                                 |                                   |                   |                  |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| 1. Tin Oxide                    | 2. Zinc Oxide                     | 3. Titanium Oxide | 4. Nanomaterials |
| 5. Thermal Conductivity Sensors | 6. Semiconductor Metal Nanooxides | 7. Nanocomposites |                  |



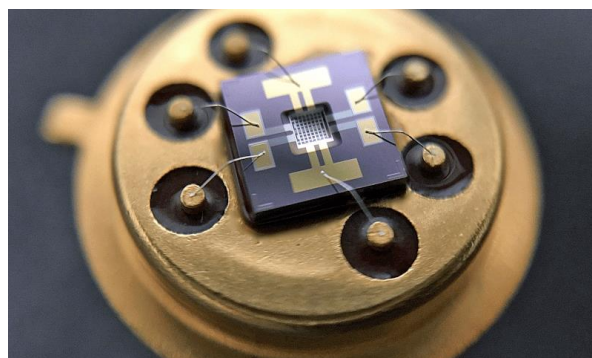
شکل ۹. روش های سنتز نانومواد.

Figure 9. Nanomaterial synthesis methods.

شکاف باند وسیعی است که به آن‌ها خواص الکترونیکی متنوعی می‌دهد. تحقیقات نشان می‌دهد که نانو اکسیدهای فلزی نیمه‌هادی حساسیت و گزینش‌پذیری بالایی دارد و زمان پاسخ سریع و پایداری در شرایط محیطی را ارائه می‌دهد. با این حال، نیاز به بهبود عملکرد در زمینه دقت و قابلیت اطمینان وجود دارد. مطالعات گذشته به بررسی سازوکارهای سنجش گاز و استراتژی‌های بهبود خواص نانو اکسیدهای فلزی نیمه‌هادی پرداخته‌است. حسگرهای گاز مبتنی بر نانو اکسیدهای فلزی نیمه‌هادی به دلیل هزینه کمتر و سازوکار ساده‌تر، در مقایسه با دیگر حسگرها برتری دارد [۷].

### ۳-۱۱ اکسیدهای فلزی نانو ساختار

فناوری‌های نانو اکسیدهای فلزی نیمه‌هادی به عنوان دقیق‌ترین و قابل اطمینان‌ترین گزینه‌ها برای سنجش گازهای گلخانه‌ای، به ویژه کربن دی‌اکسید، شناخته می‌شود. این حسگرها به دلیل ویژگی‌های ساختاری و ریخت‌شناختی خاص خود، بسیار برجسته شده‌است. نانو اکسیدهای فلزی نیمه‌هادی در تشخیص گازهای مختلف مؤثر است و انواع مختلفی از ریخت‌شناسی‌ها را با مساحت سطح بالا ارائه می‌دهد که موجب افزایش مکان‌های جذب برای سنجش گازهای گلخانه‌ای می‌شود. این حسگرها به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی عالی، عملکرد بهتری نسبت به سایر حسگرها دارد و دارای



شکل ۱۰. طرحواره‌ای از یک سنسور مبتنی بر نانو اکسیدهای فلزی نیمه‌هادی.

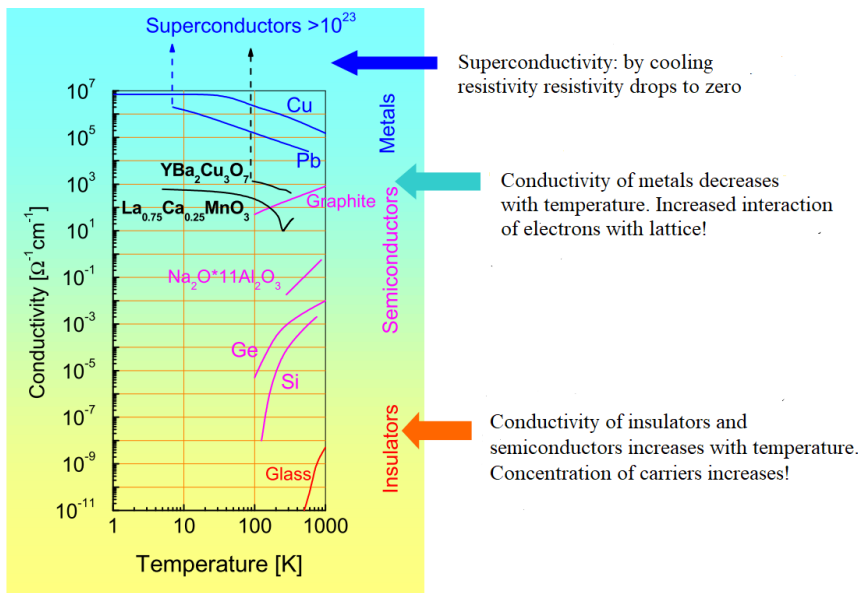
Figure 10. A view of a Semiconductor metal nanooxides-based sensor.

مواد عایق هستند (قسمت قرمز رنگ) این مواد رسانایی بسیار پایینی دارند و جریان الکتریکی از آن‌ها به‌سختی عبور می‌کند. دسته سبز رنگ نیمه‌رساناها هستند که رسانایی این مواد متوسط است و به دما یا ناخالصی وابسته است. فلزات رسانا (آبی رنگ) رسانایی بالا دارند و جریان الکتریکی را به‌خوبی هدایت می‌کنند. فلزات ابررسانا (بنفش رنگ) رسانایی بی‌نهایت اند و مقاومت الکتریکی آن‌ها صفر است. این ویژگی در دماهای پایین رخ می‌دهد. این طبقه‌بندی به‌خوبی نشان می‌دهد که مواد از عایق‌ها تا ابررساناها طیف وسیعی از میزان هدایت الکتریکی را شامل می‌شوند.

تحقیقات نشان داده‌است که اکسیدهای فلزی هم‌چون اکسید قلع ( $\text{SnO}_2$ ) و اکسید روی ( $\text{ZnO}$ ) به‌دلیل خواص نیمه‌رسانایی و قابلیت تغییر هدایت حرارتی در حضور گازها، به‌عنوان یک حسگر مناسب شناخته می‌شود [۸].

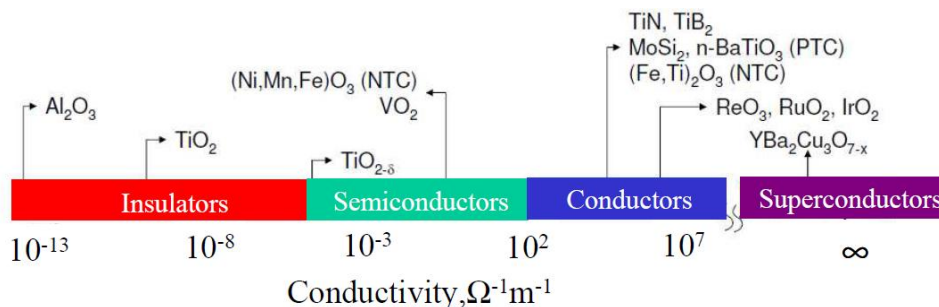
همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، رسانایی فلزات نیمه‌هادی با افزایش دما افزایش می‌یابد، اما این ویژگی در فلزات مشاهده نمی‌شود. به‌همین دلیل، در سنسورهای هدایتی از فلزات نیمه‌هادی استفاده می‌شود.

شکل (۱۲)، نموداری از نانو اکسید های فلزی مختلف را براساس رسانایی الکتریکی آن‌ها نشان می‌دهد. محور افقی رسانایی مواد را نشان می‌دهد و مواد به چهار دسته اصلی تقسیم شده‌اند. دسته اول



شکل ۱۱. نمودار تغییرات هدایت الکتریکی اکسیدهای فلزی با دما.

Figure 11. Diagram of changes in electrical conductivity of metal oxides with temperature.



شکل ۱۲. محدوده هدایت الکتریکی برخی از نانو اکسیدهای فلزی مهم.

Figure 12. Electrical conductivity range of some important nanometal oxides.

### ۲-۳ پلیمرهای نانوساختار

ساختاری ماده نیز بهره‌می‌برد. نانوکامپوزیت‌های فلزی به‌عنوان حسگرهای گازی به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود، مانند: سطح بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی مناسب، و قابلیت تغییر خواص با تغییر شرایط محیطی، پرطرفدار شده‌است [۱۱].

#### ۲-۳-۲ نانوکامپوزیت‌های پلیمری

نانوکامپوزیت‌های پلیمری رسانای حرارتی به‌لطف برتری‌های پلیمری، مانند وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی و سهولت پردازش، امکانات جدیدی را برای جای‌گزینی قطعات فلزی در چندین کاربرد، از جمله الکترونیک قدرت، موتورهای الکتریکی و ژنراتورها، مبدل‌های حرارتی و غیره ارائه‌می‌کند.

مواد فلزی به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان مواد دفع‌کننده حرارت استفاده‌می‌شود، اما تلاش‌های زیادی برای جای‌گزینی مواد فلزی با نانوکامپوزیت‌های پلیمری به‌دلیل وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی، پردازش آسان و هزینه ساخت کمتر انجام‌گرفته‌است. نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر پلیمر رسانای حرارتی به‌طور آزمایشی با ترکیب پرکننده‌های رسانای حرارتی تهیه‌می‌شود [۱۲].

#### ۳-۳-۳ نانوکامپوزیت‌های سرامیکی

نانوکامپوزیت‌های سرامیکی ترکیبی از مواد سرامیکی و نانوذرات است که به‌منظور بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی طراحی و تولید می‌شود. این مواد به‌دلیل ابعاد نانومتری خود، ویژگی‌های منحصر به فردی دارد که می‌تواند عملکرد کلی سرامیک‌ها را بهبود بخشد. سرامیک‌های رسانا در بسیاری از کاربردهای صنعتی کارایی گسترده دارد. یکی از کاربردهای مهم برای چنین موادی، فناوری تماس الکتریکی است. در طی چند سال گذشته، سطح جدیدی از مواد لایه‌نازک سرامیکی نانوکامپوزیتی با پوشش‌های تماسی به‌عنوان یکی از اهداف کلیدی توسعه یافته‌است. این دسته از مواد اثبات کرده‌است که خواص تماس مطلوب فلزات مانند مقاومت الکتریکی و حرارتی کم و شکل‌پذیری بالا را با خواص سرامیک‌ها مانند اصطکاک و سرعت سایش کم، یکپارچگی شیمیایی بالا و خواص خوب در دمای بالا ترکیب می‌کند.

هدایت حرارتی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌های سرامیکی یکی از ویژگی‌های مهم این مواد است که تأثیر زیادی بر عملکرد آن‌ها در

پلیمرهای رسانا (CPS) به‌دلیل نانوساختار بودن، همه‌کاره هستند، به‌آسانی سنتز می‌شوند و پایداری محیطی خوبی دارند. همچنین، با دارا بودن قابلیت سنجش برتر در دمای اتاق، توجه گسترده‌ای را برای کاربرد در حسگرهای گازی به‌خود جلب کرده‌اند. پلی‌آنیلین<sup>۱</sup>، پلی‌پیرول<sup>۲</sup>، پلی‌تیوفن<sup>۳</sup> و مشتقات آن‌ها از جمله پرکاربردترین CPها برای کاربردهای سنجش گاز است. از آنجایی که پلیمرهای رسانا ماده امیدوارکننده‌ای است، می‌توان از آن برای توسعه یک دستگاه حسگر گاز مؤثر استفاده کرد که فعل و انفعالات ماده و گاز را در دمای اتاق بدون استفاده از میکروگر مکن نشان می‌دهد و به‌آسانی سیگنال را بازخوانی و ایجاد می‌کند. برتری‌های زیادی را از جمله: وزن سبک، ساخت آسان، هزینه کم و درجه آزادی بالا برای طراحی مواد، می‌توان در مواد مبتنی بر پلیمرهای رسانا مشاهده کرد. پلیمرها معمولاً رسانایی حرارتی ذاتی بسیار کمتری نسبت به فلزات یا مواد سرامیکی دارند و بنابراین، عایق‌های حرارتی خوبی هستند. بهبود بیشتر این کیفیت عایق حرارتی را می‌توان با فوم پلیمرها به‌دست آورد [۹].

#### ۳-۳-۳ نانوکامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها را می‌توان به‌عنوان نانوکامپوزیت‌های زمینه‌سرامیکی (CMNC)<sup>۴</sup>، نانوکامپوزیت‌های زمینه‌فلزی (MMNC)<sup>۵</sup> یا نانوکامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری (PMNC)<sup>۶</sup> طبقه‌بندی کرد [۱۰]. سنتز نانوکامپوزیت با اندازه یکنواخت بسیار مهم است، زیرا خواص آن‌ها شامل خواص نوری، مغناطیسی، الکتریکی و بیولوژیکی بسته به اندازه و ابعاد آن‌ها است.

#### ۱-۳-۳ نانوکامپوزیت‌های فلزی

نانوکامپوزیت‌های فلزی موادی است که می‌تواند آلی یا معدنی باشد. این کامپوزیت‌ها از خواص یگانه نانوذرات فلزی، مانند مساحت سطح بالا، هدایت الکتریکی، پایداری حرارتی و فعالیت کاتالیزوری استفاده می‌کند و در عین حال، از استحکام مکانیکی و یکپارچگی

1. Conductive Polymers
2. Polyaniline
3. Polypyrrole
4. Polythiophane
5. Ceramic Nanocomposites
6. Metal Nanocomposites
7. Polymer Nanocomposites

کاربردهای مختلف دارد. نانوکامپوزیت‌های سرامیکی معمولاً به دلیل ترکیب نانوذرات با ماتریس سرامیکی، خواص حرارتی بهبودیافته‌ای را ارائه می‌دهد. نوع و ویژگی‌های نانوذرات (مانند اندازه، شکل و ترکیب شیمیایی) تأثیر زیادی بر هدایت حرارتی دارد. به عنوان مثال، نانوذرات کربن و سیلیکون کاربرد معمولاً دارای هدایت حرارتی بالایی هستند [۱۳].

جدول (۱) خلاصه‌ای از مهم‌ترین نانومواد را براساس سنسورهای تشخیص کربن دی‌اکسید نشان می‌دهد. طبق این جدول، سنسورهای مبتنی بر نیمه‌هادی‌های اکسید فلزی دارای خواص هدایتی بالایی در دماهای بالا (۶۰۰-۲۰۰°C) است؛ همچنین نشان می‌دهد که نانومواد مبتنی بر کربن خواص هدایتی خوبی در دماهای پایین‌تر (۱۵۰°C) از خود نشان می‌دهد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

انتخاب بین حسگرهای هدایت حرارتی و الکتریکی بستگی به نیاز خاص کاربرد، شرایط محیطی، و بودجه دارد. اگر دقت و پاسخ سریع مهم باشد، حسگرهای هدایت حرارتی گزینهٔ بهتری است، اما اگر هزینه و سازگاری با سامانه‌های الکترونیکی در اولویت باشد، حسگرهای الکتریکی می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند خواص مکانیکی، فیزیکی و الکترونیکی بهتری ارائه دهد. ویژگی‌های این مواد نه تنها به خواص مواد اصلی بستگی دارد، بلکه به ریخت‌شناسی و ویژگی‌های سطحی آن‌ها نیز مرتبط است. نانوکامپوزیت‌ها در مقیاس نانومتری تقویت‌کننده‌های مؤثری است و دارای نسبت سطح به حجم بالایی است. بنابراین، می‌توان به جای بهره‌گیری از نانومواد، از نانوکامپوزیت‌ها در سنسورهای هدایتی برای تشخیص گاز کربن دی‌اکسید استفاده کرد.

برخلاف بسیاری از سناریوهای سنجش دیگر، سنجش گاز به دلیل مشکلاتی که با آن روبه‌رو است، ذاتاً پیچیده است که به ویژه شامل حساسیت متقابل و انتخاب کم است. به منظور غلبه بر این چالش‌ها، به تازگی سنجش گاز هوشمند، محل توجه قرار گرفته است. سنجش گاز هوشمند<sup>۱</sup> ترکیبی از آرایه‌های سنسور گاز با تشخیص الگو به منظور تشخیص، تجزیه و تحلیل و تمایز مخلوط‌های گاز است. سنسورهای ترکیبی هوشمند از ترکیب دو یا چند نانوماده ساخته شده است و برای افزایش خاصیت هدایتی و بهبود پاسخ سنسور به کار می‌رود. همچنین، ترکیب مواد مختلف باعث افزایش توانایی سنسور برای تشخیص گازهای با غلظت پایین می‌شود. آیندهٔ سنسورها با شگردهای پس از پردازش هوشمند و هوش مصنوعی (AI)<sup>۲</sup> درهم تنیده می‌شود، که یک روش مؤثر را برای

جدول ۱. خلاصهٔ میزان هدایت حرارتی و الکتریکی سنسورهای CO<sub>2</sub> مبتنی بر مهم‌ترین نانومواد.

Table 1. Summary of thermal and electrical conductivity of CO<sub>2</sub> sensors based on the most important nanomaterials.

Material	Example	Electrical conductivity (S.cm <sup>-1</sup> )	Thermal conductivity (W/M.K)	C (CO <sub>2</sub> ), ppm	Operating Temperature, °C
Nanostructured metal oxide (NMOS)	ZnO SnO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub>	10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-2</sup> 10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-1</sup> 10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-1</sup>	20-40 16-30 5-10	<100 ppm – >1000 ppm	20-600
Polymer nanostructures (PN)	Polyacrylonitrile (PAN) Polypropylene (PP)	10 <sup>-9</sup> - 10 <sup>-5</sup> 10 <sup>-12</sup> - 10 <sup>-9</sup>	0.1-0.5 0.1-0.3	<10 ppm – >1000 ppm	<0 –100
Carbon nanostructures	Graphene Carbon nanotube	10 <sup>6</sup> 10 <sup>4</sup>	5000 3000	10 ppm<	20-25 <0 –150
Nanocomposites (carbon nanoparticles /polymer)	Graphene/polymer nanotube /polymer	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> 10 <sup>5</sup> <	10-30 10-50	<10 ppm – >1000 ppm	20-100

این مقادیر ممکن است بسته به شرایط آزمایش و نوع نانوذرات تغییر کند.

- [6] Sahki, A., Larbi, A., & Boudiaf, M. C. (2017). Conductivity modeling of gas sensors based on copper phthalocyanine thin films. *[Journal Name Missing]*, 27, 18–27.
- [7] Shwetha, H. R., Sharath, S. M., Guruprasad, B., & Rudraswamy, S. B. (2022). MEMS-based metal oxide semiconductor carbon dioxide gas sensor. *Micro and Nano Engineering*, 16, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2022.100156>
- [8] Andreev, M., et al. (2021). Flame-made  $\text{La}_2\text{O}_3$ -based nanocomposite  $\text{CO}_2$  sensors as a perspective part of GHG monitoring system. *[Journal Name Missing]*, 1–16.
- [9] Liu, X., Zheng, W., Kumar, R., Kumar, M., & Zhang, J. (2022). Conducting polymer-based nanostructures for gas sensors. *[Journal Name Missing]*, 462.
- [10] Coetzee, D., Venkataraman, M., Militky, J., & Petru, M. (2020). Influence of nanoparticles on thermal and electrical conductivity of composites. *Polymers*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/POLYM12040742>
- [11] Sowmya, B., John, A., & Panda, P. K. (2021). *[Article Title Missing]*. *Sensors International*, 100085. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100085>
- [12] Ehsani, M., Rahimi, P., & Joseph, Y. (2021). Structure-function relationships of nanocarbon/polymer composites for chemiresistive sensing: A review. *[Journal Name Missing]*.
- [13] Palmero, P. (2015). Structural ceramic nanocomposites: A review of properties and powders' synthesis methods. *Nanomaterials*, 5(2), 656–696. <https://doi.org/10.3390/nano5020656>

افزایش توانایی و عملکرد همه سنسورها فراهم می‌کند. سنسورهای گاز مبتنی بر هدایت حرارتی و الکتریکی نیز از این ترکیب بهره‌مند می‌شود که می‌تواند در چندین زمینه به کار رود و باید یک رویکرد در حال ظهور برای این فناوری باشد تا بتواند بزرگ‌ترین کاستی این سنسورها را از جمله: حساسیت، انتخاب‌پذیری و همچنین رانش بلندمدت خود، بهبود بخشد و در نهایت، به یک راه حل تجاری جذاب و گسترده تبدیل شود.

## مراجع

- [1] Li, J., Zhao, H., Wang, Y., & Zhou, Y. (2024). Approaches for selectivity improvement of conductometric gas sensors: An overview. *Sensors & Diagnostics*, 3, 336–353. <https://doi.org/10.1039/d3sd00226h>
- [2] Gardner, E. L. W., Gardner, J. W., & Udrea, F. (2023). Micromachined thermal gas sensors—A review. *Sensors*, 23(2). <https://doi.org/10.3390/s23020681>
- [3] Amarnath, M., & Gurunathan, K. (2021). Highly selective  $\text{CO}_2$  gas sensor using stabilized  $\text{NiO-In}_2\text{O}_3$  nanospheres coated reduced graphene oxide sensing electrodes at room temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 857, 157584. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157584>
- [4] Gautam, Y. K., Sharma, K., Tyagi, S., Ambedkar, A. K., Chaudhary, M., & Singh, B. P. (2021). Nanostructured metal oxide semiconductor-based sensors for greenhouse gas detection: Progress and challenges. *Royal Society Open Science*, 8(3). <https://doi.org/10.1098/rsos.201324>
- [5] Febrina, M., Satria, E., Djamal, M., Srigutomo, W., & Liess, M. (2019). Development of a simple  $\text{CO}_2$  sensor based on the thermal conductivity detection by a thermopile. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 133, 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.082>