

# کاربرد نانوکاتالیست‌های انتقال آب-گاز بر افزایش خلوص هیدروژن



## شناسنامه

### ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهرویژن	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نظارت:	داود قرابلو	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
سندوق پستی:	۱۴۵۶۵-۳۴۴	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir www.INDnano.ir
پست الکترونیک:	IND@nano.ir	سال انتشار:	۱۴۰۳
نویسنده:	شرکت پیشگامان فناوری دریچه	اینستاگرام نانو و صنعت:	@INDnano.ir

محتوای صنعتی و فناورانه خود را از طریق پست الکترونیک و پایگاه اینترنتی نانو و صنعت (INDnano.ir) ارسال نمایید.

## فهرست مطالب

- ۳ ..... اهمیت تولید هیدروژن
- ۳ ..... نقش نانوکاتالیست‌ها در واکنش انتقال آب-گاز
- ۶ ..... نانوکاتالیست‌های WGS دما پایین بر پایه مس
- ۶ ..... فناوری نانو برای بهبود نانوکاتالیست‌های WGS
- ۸ ..... محصولات داخلی
- ۹ ..... بازار داخلی و جهانی نانوکاتالیست‌ها
- ۱۱ ..... پی‌نوشت‌ها
- ۱۱ ..... منابع

## اهمیت تولید هیدروژن

بشر از دیرباز برای تأمین انرژی مورد نیاز خود از سوخت های فسیلی استفاده می کرده است. کاهش در دسترس بودن این منابع انرژی تجدیدناپذیر به دلیل افزایش مصرف و اثرات نامطلوب ناشی از آن بر محیط زیست، محققان را بر آن داشته است تا بر روی جایگزین هایی برای آن ها از میان انواع منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک تمرکز کنند. هیدروژن یکی از گزینه های امیدوارکننده است که می تواند جایگزینی تجدیدپذیر و پاک تر برای سوخت های فسیلی مرسوم باشد [۱].

یکی دیگر از مواردی که تولید هیدروژن با خلوص بالا را بسیار پر اهمیت می کند، نیاز به هیدروژن با خلوص بالا برای مصرف در فرایندهای مختلف صنعتی است. هیدروژن در چندین حوزه صنعتی به مقدار زیاد مورد استفاده قرار می گیرد. هیدروژن در پالایش نفت، سنتز آمونیاک از طریق فرایند Haber-Bosch و فرآوری فلزاتی مانند نیکل (Ni)، تنگستن (W)، مولیبدن (Mo)، مس (Cu)، روی (Zn)، سرب (Pb) و اورانیوم (U) استفاده می شود. هیدروژن همچنین در ساخت کودهای نیترژن دار، هیدرودی سولفوریزاسیون و تصفیه هیدروژنی فرآورده های نفتی، هیدروژنه کردن پسماندهای خطرناک (PCBها، دیوکسین ها و...)، سنتز اتانول، متانول و دی متیل اتر، تهیه سوخت های مایع مصنوعی به روش Fischer-Tropsch و به عنوان سوخت کوره های صنعتی با دمای بالا و موشک های فضایی استفاده می شود [۱].

فرایند انتقال آب-گاز (WGS) یکی از قدیمی ترین واکنش های کاتالیستی ناهمگن است که در صنعت برای تولید هیدروژن با خلوص بالا و کاهش کربن مونوکسید از گاز سنتز<sup>۱</sup> به کار می رود. واکنش WGS شامل واکنش بین CO و آب روی یک کاتالیست مناسب برای غنی سازی مخلوط گازی H<sub>2</sub> است. واکنش انتقال آب-گاز در حال حاضر به طور گسترده برای تولید هیدروژن از کربن فسیلی و همچنین از ذخایر زیست توده تجدیدپذیر استفاده می شود. به طور سنتی، کاتالیست های آهن-کروم (Fe-Cr) و مس-روی (Cu-Zn) به ترتیب برای تسهیل واکنش WGS در ماه های بالا و پایین استفاده می شدند. اما در طول سال ها، فناوری کاتالیست واکنش WGS به طور چشمگیری پیشرفت کرده است و برای کمک به واکنش حتی در محدوده دمای متوسط و دستیابی به تبدیل CO بالاتر، به طور مناسبی اصلاح شده است [۱، ۲].

در این گزارش ابتدا نقش نانوکاتالیست ها در واکنش WGS بررسی می شود و در ادامه به نقش فناوری نانو در بهبود کارایی این نانوکاتالیست ها پرداخته می شود. در پایان نیز بازار این دسته از نانوکاتالیست ها و محصولات نانوی ایرانی در این حوزه معرفی خواهند شد.

## نقش نانوکاتالیست ها در واکنش انتقال آب-گاز

همان طور که گفته شد، افزایش کاربردهای هیدروژن در حوزه های مختلف، منجر به توسعه مستمر آن از اواسط قرن هجدهم شده است. حدود ۹۵ درصد از نیاز جهانی هیدروژن فعلی از طریق فرایند ریفرمینگ اولیه با بخار آب<sup>۲</sup> تولید می شود. در این فرایند مواد کربنی طبیعی با منشأ زغال سنگ و نفت خام به عنوان مواد اولیه به کار می روند که از جمله آن ها می توان به گاز طبیعی و برش های سبک نفت مانند نفتا اشاره کرد [۱].

رفرمینگ متان با بخار آب در حال حاضر پرکاربردترین روش برای تولید هیدروژن است. در این فرایند، متان و بخار آب واکنش می دهند و منجر به تولید H<sub>2</sub> و CO می شوند. استفاده از مخلوط گازی CO و H<sub>2</sub> در بسیاری از کاربردها

امکان پذیر نیست چرا که CO منجر به مسموم شدن نانوکاتالیست در فرایندهای پتروشیمی و الکترودهای پلاتین در پیل های سوختی و متعاقباً منجر به غیرفعال شدن آنها می شود. واکنش انتقال آب-گاز یکی از روش های مرسوم برای حذف CO نامطلوب در صنعت است که به کمک آن می توان غلظت CO را در مخلوط گازی به محدوده استاندارد رساند [۱، ۳، ۴].

گاز حاصل از ریفورمینگ که به آن گاز سنتز نیز گفته می شود، حاوی کربن مونواکسید (CO) و هیدروژن (H<sub>2</sub>) است. واکنش انتقال آب-گاز مرحله میانی است که برای کاهش درصد CO و غنی سازی هیدروژن در گاز سنتز استفاده می شود.

فرایند ریفورمینگ اولیه با بخار آب، یک مخلوط گازی تولید می کند که حاوی هیدروژن به همراه مقادیر قابل توجهی CO است. این CO از طریق واکنش WGS مصرف می شود و در واکنش با آب به تولید CO<sub>2</sub> و هیدروژن اضافی منجر می شود. اساساً مخلوطی از CO و بخار آب از طریق واکنش WGS به H<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> تبدیل می شود:



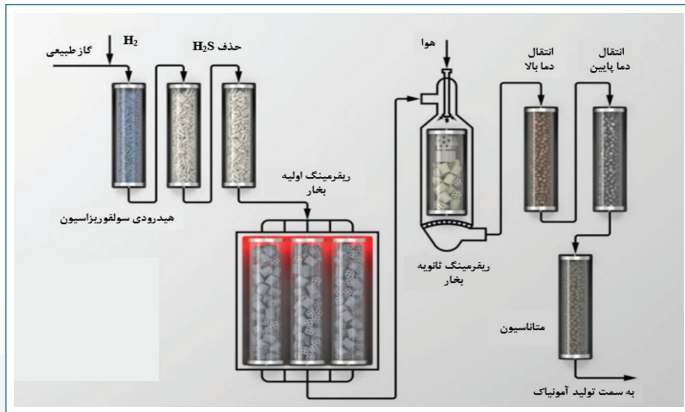
این واکنش نسبتاً گرماده است به همین دلیل وقوع آن به لحاظ ترمودینامیکی در دمای پایین و به لحاظ سینتیکی در دمای بالا محتمل تر است اما تغییر فشار، تأثیری بر آن ندارد. فرایند WGS فرایندی مهم برای تولید هیدروژن عاری از CO و یا تنظیم نسبت H<sub>2</sub>/CO است [۱].

برای دستیابی به هیدروژن با خلوص بالا و در مقیاس های صنعتی از گاز سنتز، نیاز به انتخاب نانوکاتالیست مناسب برای تسهیل در انجام واکنش است. نانوکاتالیست های WGS در دو دسته کلی قرار می گیرند: نانوکاتالیست های انتقال دما بالا (HTS)<sup>۲</sup> و نانوکاتالیست های انتقال دما پایین (LTS)<sup>۱</sup>. در ابتدا نانوکاتالیست های آهن اکسید-کروم اکسید برای واکنش های WGS معرفی شدند که در خط تولید آمونیاک مورد استفاده قرار می گرفتند. این نانوکاتالیست ها این توانایی را داشتند تا بتوانند غلظت CO را به ۲ تا ۴ درصد مولی در گاز خروجی برسانند. این نانوکاتالیست ها تنها در دمایی بین ۳۱۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد فعال بودند و به همین دلیل به نانوکاتالیست های انتقال دما بالا معروف شدند. فعالیت نانوکاتالیستی این دسته از نانوکاتالیست ها با کاهش دما به شدت کاهش می یابد. همچنین به دلیل درصد به نسبت بالای CO در گاز خروجی برای رسیدن به غلظت ۱ درصد مولی برای CO در هیدروژن خروجی، نیاز است تا فرایند با استفاده از چندین راکتور و بستر نانوکاتالیستی به وقوع پیوندد و میان هر راکتور نیز سامانه خنک سازی وجود داشته باشد [۳، ۱].

بعد از این دسته از نانوکاتالیست ها، نوع جدیدی از نانوکاتالیست ها معرفی شدند که بر پایه مس بودند و در دمای پایین تری در حدود ۲۰۰ درجه سانتی گراد عمل می کردند. غلظت CO در گاز خروجی در حضور این نانوکاتالیست ها بین ۰.۱ تا ۰.۳ درصد مولی بود و به نانوکاتالیست های انتقال دما پایین شناخته شدند. نانوکاتالیست های پایه مس نسبت به ترکیبات گوگردی موجود در هیدروکربن ها حساس هستند و غیرفعال می شوند درحالی که نانوکاتالیست های بر پایه آهن چندان به گوگرد حساس نیستند [۱].

واکنش WGS به صورت تجاری و در صنعت با استفاده از دو راکتور آدیاباتیک انجام می شود که در بخش اول انتقال دما بالا به وقوع می پیوندد (راکتور HTS) و در ادامه در بخش دوم، انتقال دما پایین رخ می دهد (راکتور LTS) و میان این دو بخش، سامانه سرمایش برای کاهش دما تعبیه می شود تا دمای ورودی مرحله دوم برای انتقال دما

پایین مناسب باشد (شکل ۱). دمای بالا در راکتور اول موجب می شود به لحاظ سینتیکی بهینه تر باشد و سرعت بالای مصرف شدن CO را در پی دارد و موجب می شود که درصد بالای CO با سرعت بالایی کاهش یابد. در راکتور دوم بهینه سازی ترمودینامیکی مدنظر است و از این رو دما پایین تر است و انتخاب پذیری بالاتری برای مصرف CO که طی مرحله قبل، غلظت آن به شدت کاهش یافته است، دارد. به همین دلیل می تواند غلظت آن را به ۰٫۱ تا ۰٫۳ درصد برساند. همچنین برای محافظت از نانوکاتالیست مس در برابر گوگرد یک بستر محافظ پیش از راکتور LTS قرار داده می شود تا ترکیبات حاوی گوگرد را به حداقل برساند [۱، ۳].



شکل ۱- طرح کلی فرایند تولید و CO زدایی از H<sub>2</sub> برای تولید آمونیاک (مثال شماتیک: شرکت گسترش فناوری خوارزمی). گام اول در فرایند تولید آمونیاک، تولید هیدروژن از گاز طبیعی است که شامل چندین فرایند متمایز است. در ابتدا، گاز سنتز از گاز طبیعی با استفاده از فرایند ریفورمینگ تولید می شود. سپس مونوکسیدکربن با استفاده از راکتورهای شیفتر در واکنش با بخار آب به هیدروژن و کربن دی اکسید تبدیل می شود. انتقال آب گاز در دو راکتور سری که اولی دما بالا و دومی دما پایین است، انجام می شود. قبل از تولید گاز سنتز، گاز طبیعی باید عاری از آلودگی هایی باشد که اثرات نامطلوبی بر کاتالیزورهای پایین دست دارد و بایستی حذف شود. گاز طبیعی معمولاً حاوی غلظت های مختلفی از ترکیبات گوگردی به شکل سولفید هیدروژن و یا اجزای حاوی گوگرد آلی است [۵].

ترکیب نانوکاتالیست HTS به طور مرسوم، ۲٪ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، ۱۰٪ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، ۲٪ MgO و باقیمانده آن، ترکیبات فرار هستند. ترکیب شیمیایی نانوکاتالیست LTS نیز مخلوطی از ZnO، CuO، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> است که دو مثال از ترکیبات مرسوم نانوکاتالیست های LTS به شرح زیر است [۴]:

- ۶۸-۷۳٪ ZnO، ۱۵-۲۰٪ CuO، ۹-۱۴٪ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، ۲-۵٪ Mn و مابقی اکسیدهای Al و Mg
- ۳۲-۳۳٪ CuO، ۳۴-۵۳٪ ZnO و ۱۵-۳۳٪ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

نانوکاتالیست های LTS از طریق تزریق هم زمان محلول اسیدی (خوراک) حاوی یون های فلزی مس، روی و آلومینیوم از یک سو و محلول قلبایی تنظیم کننده pH (به عنوان مثال کربنات سدیم) از سوی دیگر حاصل می شود. مقدار pH باید در تمام طول تزریق (ترسیب) در محدوده مطلوب، ثابت بماند [۶].

## نانوکاتالیست‌های WGS دما پایین بر پایه مس

اولین نانوکاتالیست WGS دما پایین بر پایه مس در سال ۱۹۶۳ معرفی شد که از CuO و ZnO با نسبت ۱ به ۲، تشکیل شده بود. کمی بعد مشخص شد که افزودن آلومینا به ساختار این نانوکاتالیست‌ها می‌تواند پایداری گرمایی را افزایش دهد و مقاومت در برابر مسموم شدن نانوکاتالیست را بهبود بخشد. از این رو نانوکاتالیست‌های ترکیبی از اکسیدهای CuO، ZnO و  $Al_2O_3$  به صورت تجاری و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفتند. فلز مس موجود در این نانوکاتالیست‌ها فعالیت نانوکاتالیستی و انتخاب‌پذیری بالایی را در دمای پایین از خود نشان می‌داد بنابراین نانوکاتالیست مناسبی برای واکنش WGS در دمای پایین و در غلظت کم CO بود. این نانوکاتالیست‌ها در بازه ۱۵۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد فعال هستند و مقدار بهینه آن بین ۲۰۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد است. کاهش CuO و دیگر ترکیبات شیمیایی حاوی مس، یک عامل مهم برای افزایش فعالیت نانوکاتالیستی است. از طرفی فعالیت نانوکاتالیستی این دسته از نانوکاتالیست‌ها متناسب با سطح در دسترس از مس فلزی است و چندان به نسبت  $Al/Zn$  وابسته نیست. فعالیت نانوکاتالیستی نانوکاتالیست‌های سه‌تایی معرفی شده وابستگی زیادی به تشکیل ساختار اسپینل از اکسیدهای Cu-Al-Zn دارد چرا که منجر به تشکیل ذرات بسیار ریز مس بر روی سطح پایه نانوکاتالیست می‌شود و سطح فعال را افزایش می‌دهد. براساس مطالب گفته شده، برای بهبود کارایی این دسته از نانوکاتالیست‌ها نخست باید شرایطی فراهم شود که ذرات فلزی مس در کوچک‌ترین اندازه بر روی سطح پراکنده شوند و دیگر آن‌که این ذرات در طول فرایند نانوکاتالیستی، تجمع نکنند و به هم نپیوندند و ذرات بزرگ‌تری را تشکیل ندهند. این نقش را تا حد زیادی حضور  $Al_2O_3$  ایفا می‌کند و در واقع نقش یک پروموتور ساختاری<sup>۳</sup> را دارد [۳].

## فناوری نانو برای بهبود نانوکاتالیست‌های WGS

کاتالیست‌های بر پایه مس در کنار مزایایی که دارند از مشکل غیرفعال شدن<sup>۲</sup> رنج می‌برند. سه دلیل عمده برای این پدیده گزارش شده است:

- تف جوشی گرمایی که منجر به کاهش سطح ویژه نانوکاتالیستی می‌شود؛
- مسموم شدن توسط گوگرد که مسدود شدن نواحی فعال نانوکاتالیستی و کاهش سرعت جابه‌جایی واکنش دهنده‌هایی که بر روی سطح جذب شده‌اند را در پی دارد؛
- مسموم شدن توسط کلر که تف جوشی نانوکاتالیست و در نتیجه درشت شدن ذرات ماده فعال را سرعت می‌بخشد.

از این رو در کنار استفاده از نانوکاتالیست‌های مرسوم و سنتی مس-روی همواره تلاش‌های فراوانی برای معرفی نانوکاتالیست‌هایی با بازده بالاتر، پایداری و انتخاب‌پذیری بیش‌تر مورد توجه بوده است. این تلاش‌ها در دو دسته کلی قرار می‌گیرند:

- معرفی نانوکاتالیست‌هایی با ترکیب شیمیایی جدید از طریق بررسی اثر توأمان ماده فعال و پایه نانوکاتالیست بر روی ویژگی‌های مطلوب نانوکاتالیست؛
- استفاده از نانو ساختارها.

از این رو از طرفی نانوکاتالیست‌های نوینی بر پایه سریا ( $\text{CeO}_2$ )، نانوکاتالیست‌های جدید بر پایه کربن و نانوکاتالیست‌های بر پایه فلزات نجیب، معرفی شده‌اند و از طرف دیگر، نانوکاتالیست‌های مرسوم و یا نانوکاتالیست‌های جدید در ابعاد نانومتری تولید و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نتیجه می‌توان گفت که فناوری نانو مسیرهای فراوانی را برای بهبود خواص این دسته از نانوکاتالیست‌ها گشوده است. در زمینه بهبود خواص نانوکاتالیست WGS، هم بر روی ماده فعال نانوکاتالیستی و هم بر روی پایه نانوکاتالیست، تمرکز شده است. در مورد تأثیر فناوری نانو بر روی نانوکاتالیست‌ها می‌توان گفت که با کوچک شدن اندازه ذرات در ابعاد نانومتری، سطح ویژه فعال بیشتری جهت فرایندهای نانوکاتالیستی در دسترس قرار می‌گیرد [۱، ۳].

در کنار نانوکاتالیست‌های بر پایه آهن و مس، نانوکاتالیست‌های بر پایه نیکل، کبالت، مولیبدن، طلا، پلاتین، رودیم و روتنیوم از دیگر مواد فعال نانوکاتالیستی برای واکنش WGS محسوب می‌شوند. همچنین مرسوم‌ترین پایه نانوکاتالیست‌ها در این حوزه، ZnO،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{SiO}_2$  هستند. پایه نانوکاتالیست‌های  $\text{TiO}_2$  و  $\text{CeO}_2$  نیز جزء پایه نانوکاتالیست‌های نوین هستند که به دلیل توانایی در ذخیره‌سازی اکسیژن، خواص عالی به عنوان پروموتور ایفا کرده‌اند. کبالت و مولیبدن به لحاظ مقاومت در برابر مسموم شدن با گوگرد، خواص مناسبی را از خود نشان داده‌اند. فلزات نجیب نیز فعالیت نانوکاتالیستی بالایی برای واکنش WGS دارند اما فعالیت نانوکاتالیستی آن‌ها به شدت به پایه نانوکاتالیست وابسته است [۴، ۱].

یکی از موادی که به شدت به عنوان پایه نانوکاتالیست برای جایگزینی با نانوکاتالیست‌های مرسوم WGS مدنظر قرار دارد، سریا ( $\text{CeO}_2$ ) است. گرچه سریا و مواد بر پایه سریا فعالیت نانوکاتالیستی مناسبی برای واکنش WGS از خود نشان ندادند اما به دلیل وجود جای خالی اکسیژن و ذخیره‌سازی اکسیژن در داخل ساختار خود، مشاهده شده است که در هنگامی که به عنوان پایه نانوکاتالیست مورد استفاده قرار می‌گیرد، به خوبی به عنوان یک پروموتور می‌تواند میزان فعالیت نانوکاتالیستی را افزایش دهد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد مس یکی از نانوکاتالیست‌های مرسوم LTS است. پژوهش‌ها نشان داده است که مس، چه به صورت ذرات بر روی سطح سریا به عنوان پایه نانوکاتالیست و چه به صورت مس عنصری حل شده در ساختار سریا، فعالیت نانوکاتالیستی مناسبی از خود نشان داده است [۱].

همچنین مشاهده شده است که اگر چه طلا در ابعاد بزرگ در واکنش WGS فعالیت نانوکاتالیستی اندکی از خود نشان می‌دهد اما نانوذرات طلا بر روی پایه نانوکاتالیست سریا، نه تنها فعالیت نانوکاتالیستی دارند بلکه بازده واکنش بالایی را از خود نشان می‌دهند. بازده واکنش نانوکاتالیستی در ابعاد نانومتری، بیش از مقدار طلا متأثر از اندازه ذرات طلاست. اندازه نانوذرات طلا در این حالت با توجه به روش تولید، ۲ تا ۶ نانومتر است و بیش‌ترین فعالیت نانوکاتالیستی را نانوذرات طلای ۲ نانومتری از خود نشان داده است. با آلاییدن<sup>۴</sup> نانوکاتالیست طلا-سریا با فلزات La و Gd نیز شاهد افزایش فعالیت نانوکاتالیستی خواهیم بود [۱، ۴].

استفاده از سریا به عنوان پایه نانوکاتالیست و نشان دادن نانوذرات فلزات واسطه (Cr، Ni، Fe و ...) یا فلزات نجیب (Pt، Pd و ...) بر روی آن از دیگر تلاش‌هایی است که برای معرفی یک نانوکاتالیست بهینه برای فرایند WGS در حال انجام است. در این دسته از نانوکاتالیست‌ها سریا نیز می‌تواند نانوساختار باشد که استفاده از نانوساختارهای تک‌بعدی مانند نانوالیاف سریا به عنوان پایه نانوکاتالیست به شدت مورد توجه قرار دارد [۱].

از دیگر مسیرهای مبتنی بر فناوری نانو برای دستیابی به نانوکاتالیست‌های WGS بهینه می‌توان به

نانوکاتالیست‌های با پایه نانوکاتالیست کربنی اشاره کرد. کربن فعال یکی از پایه نانوکاتالیست‌های مناسبی است که برای این دسته از نانوکاتالیست‌ها به نحو مطلوبی عمل می‌کند. فعالیت نانوکاتالیستی کربن فعال همراه با نانوذرات آهن اکسید، مس و فلزات نجیب، بر روی واکنش WGS نتایج مناسبی در پی داشته است. همچنین نانولوله کربنی به عنوان پایه نانوکاتالیست با انواع مواد فعال فلزی و اکسید فلزی، مورد بررسی قرار گرفته است [۱، ۳].

## محصولات داخلی

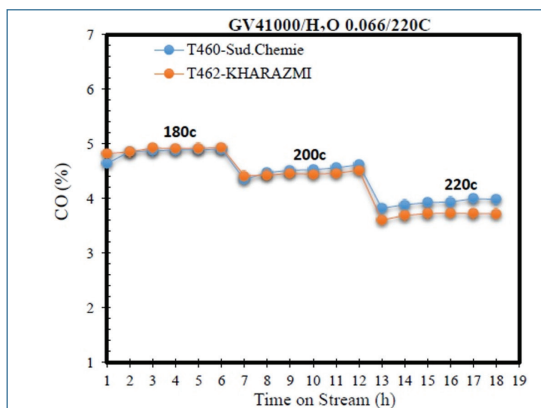
با توجه به اهمیت نانوکاتالیست انتقال آب-گاز دما پایین برای کشور و محدودیت‌هایی که در تأمین آن وجود دارد، شرکت گسترش فناوری خوارزمی یکی از شرکت‌های فناور و تواناست که این نوع نانوکاتالیست در آن بومی سازی شده است. شرکت دانش بنیان گسترش فناوری خوارزمی با بیش از ۱۵ سال سابقه پژوهش و فناوری، فعالیت خود را در جهت توسعه دانش فنی تولید نانوکاتالیست‌های صنعتی در ایران، رسماً از سال ۱۳۸۹ آغاز کرد و در حال حاضر موفق به تولید طیف گسترده‌ای از نانوکاتالیست‌های مورد استفاده در صنعت فولاد، پالایش و پتروشیمی شده است [۶].



علاوه بر نانوکاتالیست انتقال آب-گاز دما پایین، انواع نانوکاتالیست‌های ریفرمینگ احیای مستقیم، انواع نانوکاتالیست ریفرمینگ دارای کاربرد در پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی، نانوکاتالیست اتوترمال، نانوکاتالیست انتقال آب-گاز دما بالا، نانوکاتالیست‌های پیش ریفرمینگ، نانوکاتالیست‌های متاناسیون، نانوکاتالیست‌های سنتز متانول و نانوکاتالیست‌های هیدرو دیسولفوریزاسیون از دیگر محصولات این شرکت است [۲].

فلز فعال نانوکاتالیستی در نانوکاتالیست LTS تولید شده توسط گسترش فناوری خوارزمی، مس است که پس از احیای نانوکاتالیست درون راکتور و تبدیل اکسید مس به مس، خاصیت نانوکاتالیستی پیدا می‌کند. برای بیشینه کردن کارایی این نانوکاتالیست‌ها لازم است که آن‌ها بیشترین سطح فعالیت نانوکاتالیستی را داشته باشند. با ورود فناوری نانو به این صنعت و تولید نانوکاتالیست‌های با سطح فعال قابل توجه، تحولی عظیم در کارایی آن‌ها به وجود آمده است. دستیابی به ریزساختار نانو حاوی ذرات با ابعاد کمتر از ۲۰ نانومتر در این محصول سطح فعال بیشتر برای محصول و به دنبال آن اکتیویته بیشتری را به همراه داشته است. به منظور بررسی خاصیت نانوکاتالیستی این محصول، آزمون در سیستم نانوکاتالیستی (Catatest) روی نمونه تولید شده و یک نمونه صنعتی (شرکت Sud-Chemie) انجام و گازهای خروجی با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج حاصل از آزمون نانوکاتالیستی نمونه تولید شده و نمونه صنعتی، بیانگر انطباق بسیار مناسب این دو محصول است (شکل ۲) [۲].

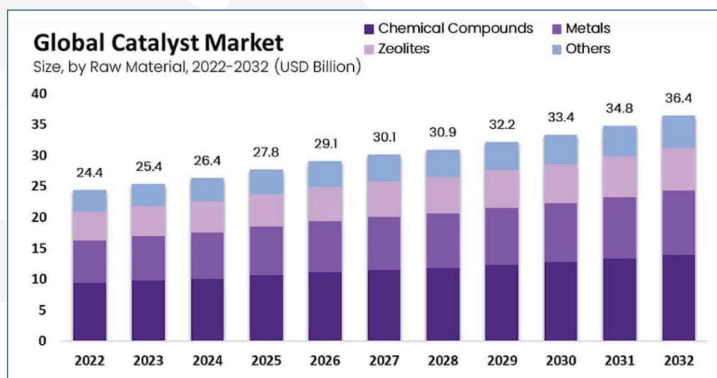




شکل ۲- مقایسه خاصیت نانوکاتالیستی نانوکاتالیست LTS شرکت گسترش فناوری خوارزمی و شرکت Sud Chemie [۲]

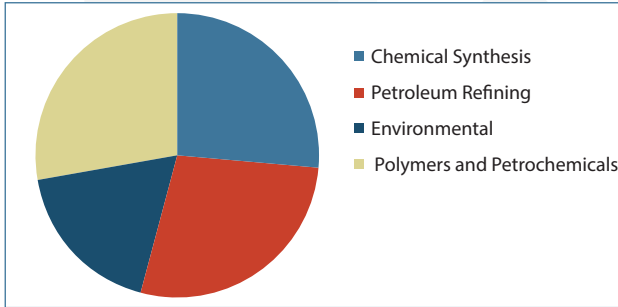
## بازار داخلی و جهانی نانوکاتالیست‌ها

اندازه بازار جهانی نانوکاتالیست‌ها در سال ۲۰۲۲، ۲۴٫۲ میلیارد دلار بوده است که با رشد سالانه ۴٫۲ درصد تا سال ۲۰۳۲ به ۳۶٫۴ میلیارد دلار افزایش خواهد یافت. به لحاظ جنس نانوکاتالیست‌ها مشاهده می‌شود که نانوکاتالیست‌های فلزی پس از ترکیبات شیمیایی، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳) [۷].



شکل ۳- اندازه بازار نانوکاتالیست‌ها در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۳۲ به تفکیک مواد اولیه [۷]

از منظر کاربرد، نانوکاتالیست‌ها در چهار کاربرد عمده تقسیم‌بندی می‌شوند: سنتز شیمیایی، پالایش نفت، کاربردهای محیط‌زیستی و پلیمر و پتروشیمی که از میان آن‌ها در سال ۲۰۲۲، سنتز شیمیایی با ۲۶٫۳ درصد، بیش‌ترین سهم بازار را در اختیار داشته است (شکل ۴) [۷].



شکل ۴- بازار جهانی نانوکاتالیست ها در طی یک سال به تفکیک حوزه کاربرد [۷]

همان طور که مشاهده می شود بازار نانوکاتالیست ها بازار روبه رشدی است. به طور خاص در مورد نانوکاتالیست های انتقال آب-گاز نیز بازار روبه رشدی پیش بینی می شود. توسعه صنایع مصرف کننده هیدروژن همچون نفت، گاز و پتروشیمی، صنایع شیمیایی و صنایع فلزی و همچنین توجه فراوان به هیدروژن به عنوان سوخت پاک، دو پیشران اصلی در جهت رشد و توسعه این نانوکاتالیست ها محسوب می شوند. در بازار داخلی نیز به دلیل توسعه صنعت پتروشیمی، بازار روبه رشدی برای نانوکاتالیست های LTS پیش بینی می شود. به عنوان مثال با توجه به تعداد واحدهای فعلی و برنامه آتی توسعه تولید آمونیاک در ایران (در مجموع ۱۴ واحد)، تولید نانوکاتالیست واحد LTS حائز اهمیت فراوان است. از این رو لازم است تا نیازهای اساسی و استراتژیک این صنعت (همچون نانوکاتالیست) در داخل کشور تأمین و تولید شود. میزان مصرف سالانه نانوکاتالیست انتقال دما پایین یا LTS در کشور ۳۵۰ تن در سال است و با احتساب قیمت خرید این نانوکاتالیست از منابع خارجی که در حدود ۲۰ یورو به ازای هر کیلوگرم است، بومی سازی تولید این محصول می تواند علاوه بر افزودن دانش فنی تولید یک محصول استراتژیک صنعتی به توانمندی های کشور، سالیانه از ارزی ۷ میلیون یورو جلوگیری کند [۶].



## پی‌نوشت‌ها

- 1 Water-Gas Shift (WGS)
- 2 Syn-Gas
- 3 Steam Reforming
- 4 High Temperature Shift Catalysts
- 5 Low Temperature Shift Catalysts
- 6 Structural Promoter
- 7 Deactivation
- 8 Doping

## منابع

- 1 D. B. Pal, R. Chand, S. Upadhyay, and P. Mishra, "Performance of water gas shift reaction catalysts: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 549-565, 2018.
- 2 <https://nanoproduct.ir/product/004913/>
- 3 E. Baraj, K. Ciahotný, and T. Hlinčík, "The water gas shift reaction: Catalysts and reaction mechanism," *Fuel*, vol. 288, p. 119817, 2021.
- 4 P. Ebrahimi, A. Kumar, and M. Khraisheh, "A review of recent advances in water-gas shift catalysis for hydrogen production," *Emergent Materials*, vol. 3, pp. 881-917, 2020.
- 5 Khwarizmico, "<https://khwarizmico.com/products/petrochemical-catalysts/ammonia-units/>," 1402
- 6 [nanoproduct.ir/news/66302](https://nanoproduct.ir/news/66302)
- 7 Market.Us, "<https://market.us/report/catalyst-market/>," 2023.

از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو در صنعت نفت منتشر شده است:



■ تأثیر استفاده از فناوری نانو در عملکرد کاتالیست‌های پایه آلومینا و کاهش هزینه‌های ناشی از آن



■ کاربردهای صنعتی نانوذرات در بهبود خواص روانکاری



■ کاربرد فناوری نانو در چاه‌های نفت و گاز



■ کاربردهای صنعتی نانوذرات فلزی در روانکارها