

## نقش کاتالیزورها در فرآیندهای شیمیایی

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از هنرجو انتظار می‌رود که بتواند:

- کاتالیزورها را تعریف کند و نحوه‌ی عملکرد آن‌ها را توضیح دهد.
- انواع کاتالیزورها را نام ببرد.
- ساختمان کاتالیزورهای مصرفی در صنایع شیمیایی را توضیح دهد.
- مشخصات کاتالیزورهای صنعتی را شرح دهد.
- عواملی را که باعث غیرفعال شدن کاتالیزورهای صنعتی می‌شود، نام ببرد.

### ۱-۲- مقدمه

بیش از ۲۰۰۰ سال است که بشر از کاتالیزورها استفاده می‌کند. اولین موارد استفاده از کاتالیزورها در تهیه‌ی پنیر و نان بوده است. قرن‌هاست که بشر برای تهیه‌ی پنیر مقداری مایه‌ی پنیر (به‌عنوان کاتالیزگر) به شیر اضافه می‌کند. با این وجود تا سال ۱۸۳۵ میلادی تعریف دقیقی در مورد کاتالیزورها وجود نداشت تا این که در این سال برسیلیوس<sup>۱</sup>، شیمی‌دان سوئدی با تکیه بر مشاهدات خود و تجربیات دیگر شیمی‌دان‌ها اعلام کرد که بعضی از مواد می‌توانند سرعت واکنش‌های شیمیایی را افزایش دهند. وی این مواد را که به مقدار کم به محیط واکنش اضافه می‌شوند کاتالیزگر نامید. حدود ۶۰ سال بعد، یعنی در سال ۱۸۹۴ میلادی، استوالد<sup>۲</sup>، شیمی‌دان آلمانی، تعریف برسیلیوس از کاتالیزگر را تکمیل کرد و اعلام نمود که کاتالیزورها موادی هستند که سرعت واکنش‌های شیمیایی را افزایش می‌دهند، بدون آن‌که خود در واکنش مصرف شوند. امروزه با گذشت بیش از ۱۵۰ سال از یافته‌های برسیلیوس، کاتالیزورها جایگاه ویژه‌ای در صنعت و اقتصاد جهانی پیدا کرده‌اند. برای مثال، در سال ۱۹۹۶ تنها در کشور آمریکا، یک میلیارد دلار کاتالیزگر به فروش رفته است، و یا حدود  $\frac{1}{3}$  از محصولاتی که در آمریکا تولید می‌شود، در یکی از مراحل تولید نیازمند استفاده از کاتالیزگر می‌باشد. انواع کاتالیزورها در صنایع پتروشیمی و پالایش نفت، صنایع شیمیایی معدنی (نظیر تولید آمونیاک، سولفوریک اسید، نیتریک اسید)، صنایع پلی‌مری (نظیر تولید الیاف مصنوعی، لاستیک‌ها و پلاستیک‌ها)، صنایع غذایی (نظیر تولید روغن‌های خوراکی) به کار می‌روند. امروزه از کاتالیزورها در کنترل و کاهش آلودگی محیط زیست نیز استفاده می‌شود. مثلاً برای کاهش آلودگی‌های ناشی از حرکت وسایل نقلیه، در لوله‌ی خروج دود (اگزوز)<sup>۳</sup> خودروها نوعی کاتالیزگر قرار می‌دهند که گازهای سمی و خطرناک را به گازهای بی‌خطر تبدیل می‌کند. در بدن موجودات زنده نیز واکنش‌های شیمیایی توسط کاتالیزورهایی به نام آنزیم<sup>۴</sup> انجام می‌شود. آنزیم‌ها مواد آلی بی‌چیده‌ای هستند که در بدن گیاهان و حیوانات تشکیل می‌شوند و هر کدام یک واکنش بیولوژیکی خاص را تسریع می‌کنند. برای مثال لیپاز<sup>۵</sup>

۱ – Berzelius

۲ – Ostwald

۳ – Exhaust

۴ – Enzyme

۵ – Lipase

آنزیمی است که واکنش هیدرولیز چربی‌ها را در داخل بدن انسان سرعت می‌بخشد. تعدادی از آنزیم‌ها نیز به شکل مصنوعی در آزمایشگاه ساخته شده‌اند که در صنعت، به خصوص برای انجام واکنش‌های تخمیری<sup>۱</sup> به کار می‌روند.

## ۲-۲- انواع کاتالیزورها و نحوه عملکرد آنها

گفتیم کاتالیزگر ماده‌ای است که مقدار اندکی از آن سرعت واکنش را زیاد می‌کند. بدون آن که خود مصرف شود یا دست‌خوش تغییر شیمیایی گردد. باید توجه داشت که اگرچه کاتالیزورها غالباً به منظور افزایش سرعت واکنش‌های شیمیایی به کار می‌روند ولی بعضی از آنها نیز هستند که سرعت واکنش‌های شیمیایی را کند کرده یا حتی آنها را متوقف می‌کنند. به این نوع کاتالیزورها، کاتالیزگرهای منفی<sup>۲</sup> یا بازدارنده‌ها<sup>۳</sup> گویند. در بسیاری از صنایع شیمیایی، جهت جلوگیری از واکنش موادخورنده با بدنه‌ی داخلی ظروف و دستگاه‌ها، از انواع بازدارنده‌ها با نام‌های تجارتي مختلف استفاده می‌شود. با این وجود هر جا که از کاتالیزورها صحبت می‌شود منظور نوع سرعت‌دهنده‌ی آن است، مگر این که خلاف آن گفته شود.

نکته‌ی قابل توجه این است که با استفاده از کاتالیزگرهای مختلف، می‌توان از مواد اولیه‌ی یکسان، محصولات متفاوت تهیه کرد. برای مثال دو گاز منواکسیدکربن و هیدروژن در حضور کاتالیزگر نیکل تولید متان می‌نمایند اما همین دو گاز در حضور کاتالیزگر اکسیدروی و تری‌اکسیدکروم، متانول تولید می‌کنند.



به منظور توجیه چنین پدیده‌هایی باید بدانیم که یک کاتالیزگر در شرایط مختلف چگونه عمل می‌کند و از چه راه یا راه‌هایی بر سرعت واکنش‌های شیمیایی تأثیر می‌گذارد. به عبارت دقیق‌تر باید بدانیم، مکانیسم<sup>۴</sup> یا سازوکار واکنش‌های کاتالیزگری چیست؟

پاسخ به این سؤال بسیار طولانی است و جهت درک جزئیات آن نیاز به داشتن اطلاعات کافی در زمینه‌ی شیمی و سینتیک شیمیایی داریم، اما باید دانست که اگرچه به‌طور کلی طرز کار کاتالیزگرهای مختلف یکسان نیست، ولی می‌توان نحوه‌ی عملکرد آنها را در یک جمله، چنین بیان کرد:

«کاتالیزورها واکنش را از مسیری پیش می‌برند که به انرژی فعال‌سازی<sup>۵</sup> کم‌تری نیاز است و در نتیجه تبدیل مواد واکنش‌دهنده به محصولات سریع‌تر انجام می‌شود.»

شکل ۲-۱ نمودار انرژی فعال‌سازی یک واکنش شیمیایی ( $A_2 + B_2 \rightarrow 2AB$ ) را در دو حالت، با کاتالیزگر و بدون کاتالیزگر، نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌کنید، حضور کاتالیزگر سبب شده که در منحنی زیرین، واکنش‌دهنده‌ها، برای تبدیل شدن به محصول، از سد انرژی کوتاه‌تری عبور کنند. این سد انرژی، که به آن انرژی فعال‌سازی می‌گویند، مقدار انرژی‌ای است که مواد واکنش‌دهنده باید جذب کنند تا به سطح انرژی «کمپلکس فعال» برسند. کمپلکس فعال ترکیبی است با انرژی زیاد و ناپایدار که حد واسط میان واکنش‌دهنده‌ها و محصولات می‌باشد. در کمپلکس فعال (که طول عمر آن بسیار کوتاه است)، پیوندهای مولکول‌های مواد واکنش‌دهنده در حال شکسته شدن و پیوندهای مولکول‌های محصولات در حال شکل‌گیری است:

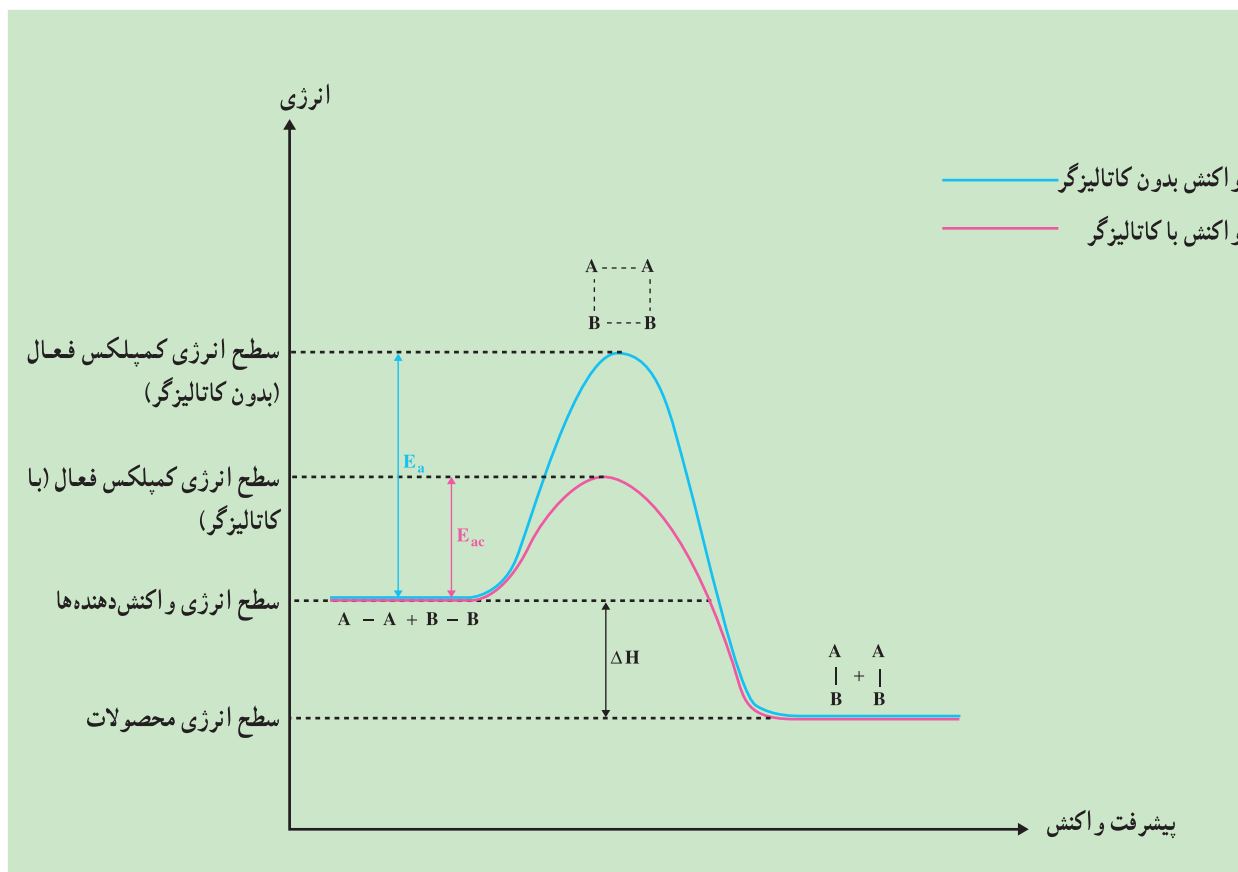
۱ – Fermentation

۲ – Negative Catalysts

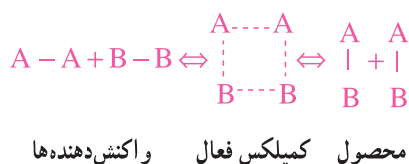
۳ – Inhibitors

۴ – Mechanism

۵ – Activation Energy



شکل ۱-۲- کاتالیزگر واکنش را از مسیری پیش می‌برد که به انرژی فعال‌سازی کم‌تری نیاز است. ( $E_{ac} < E_a$ )



باید توجه داشت که کاتالیزورها تأثیری بر واکنش‌های تعادلی ندارند، زیرا یک کاتالیزگر هم سرعت واکنش رفت و هم سرعت واکنش برگشت را به یک اندازه افزایش می‌دهد. شکل ۱-۲ نیز این مسئله را تأیید می‌کند. با کاهش سطح انرژی فعال‌سازی توسط کاتالیزگر، انجام واکنش‌های رفت ( $\text{A}_\gamma + \text{B}_\gamma \rightarrow 2\text{AB}$ ) و برگشت ( $2\text{AB} \rightarrow \text{A}_\gamma + \text{B}_\gamma$ ) به یک اندازه آسان‌تر می‌شود. با این حال مشاهده می‌شود که در بسیاری از واکنش‌های تعادلی در صنعت، از کاتالیزگر استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال برای تهیه آمونیاک از کاتالیزگر آهن استفاده می‌کنند:



این بدان سبب است که در اینجا استفاده از کاتالیزگر آهن باعث برهم خوردن تعادل و افزایش غلظت آمونیاک نمی‌گردد، بلکه فقط باعث می‌شود نیتروژن و هیدروژن در داخل رآکتور با سرعت بیش‌تری واکنش داده و سریع‌تر به تعادل برسند.





$$S = \frac{\text{تعداد مول‌های تولید شده‌ی محصول مطلوب (D)}}{\text{تعداد مول‌های تولید شده‌ی محصول ناخواسته (U)}} = \text{ضریب گزینش}$$

هرچه ضریب گزینش یک کاتالیزگر بیش تر باشد، آن کاتالیزگر برای انجام واکنش مورد نظر مطلوب تر است. از دیگر مشخصات یک کاتالیزگر پایداری آن است. یک کاتالیزگر باید تحت شرایط حاکم در داخل رآکتور، به خصوص در دما و فشار بالا، ساختار مولکولی و در نتیجه خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خود را حفظ نماید. هرچه طول عمر یک کاتالیزگر بیش تر باشد، آن کاتالیزگر از نظر اقتصادی جذابیت بیش تری دارد. از نظر تئوری، کاتالیزگرها موادی هستند که مصرف نمی‌شوند و نباید از بین بروند، اما باید توجه داشت که همه‌ی کاتالیزگرها به مرور زمان خاصیت خود را از دست داده و دیگر نمی‌توانند نقش خود را ایفا نمایند؛ به عبارت بهتر غیرفعال<sup>۱</sup> می‌شوند. در چنین شرایطی بسیاری از کاتالیزگرها قابلیت احیاشدن<sup>۲</sup> دارند اگرچه همه‌ی آن‌ها بعد از چندبار احیاشدن دیگر قابل استفاده نیستند که در این صورت می‌گوییم عمر آن‌ها تمام شده است. در این صورت باید کاتالیزگر را تعویض کرد. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های یک کاتالیزگر طول عمر آن است. هرچه فاصله‌ی زمانی میان دو احیا شدن و نیز تعداد دفعاتی که کاتالیزگر قابلیت احیاشدن دارد، بیش تر باشد، آن کاتالیزگر مطلوب تر است.

#### ۲-۴- ساختمان کاتالیزگرهای جامد

همان‌طور که بیان شد، واکنش‌های کاتالیزگری ناهمگن دارای یک مکانیسم سه مرحله‌ای هستند که مرحله‌ی میانی آن‌ها واکنش سطحی (Surface Reaction) است. پس هرچه کاتالیزگر دارای سطح بیش تری باشد، تعداد مولکول‌های بیش تری می‌توانند جذب آن شده و واکنش سطحی انجام دهند. به عبارت بهتر هرچه سطح کاتالیزگر جامد بیش تر باشد، تأثیر آن در افزایش سرعت واکنش شیمیایی بیش تر خواهد بود. به همین دلیل، سعی می‌کنند در ساخت کاتالیزگرهای جامد، هم از مواد و هم از روش‌هایی استفاده کنند که کاتالیزگر تولیدشده ساختمانی متخلخل داشته باشد. هر دانه کاتالیزگر تعداد بسیاری خلل و فرج و حفره‌ی میکروسکوپی دارد. این خلل و فرج‌ها، بر روی هم، سطح بسیار وسیعی را فراهم می‌آورند به گونه‌ای که مولکول‌های مواد واکنش‌دهنده جذب سطوح داخلی این حفره‌ها شده و در همه‌ی نقاط واکنش سطحی انجام می‌دهند. به‌عنوان مثال می‌توان از کاتالیزگر سیلیس-آلومین ( $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ) نام برد که در انجام واکنش‌های شکست<sup>۳</sup>، که در آن‌ها هیدروکربن‌های سنگین به مولکول‌های کوچک تر شکسته می‌شوند، به کار می‌رود. حجم تخلخل<sup>۴</sup> (حجم داخلی حفره‌ها به ازای واحد جرم) این کاتالیزگر حدود  $\frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \times 0.6$  و شعاع متوسط دهانه‌ی حفره‌ها حدود ۴ nm (نانومتر)<sup>۵</sup> است. سطح این کاتالیزگر به ازای واحد جرم بسیار زیاد و حدود  $\frac{\text{m}^2}{\text{g}} \times 300$  است.

بسیاری از مواد می‌توانند، به‌عنوان کاتالیزگر جامد، سرعت واکنش‌های شیمیایی را افزایش دهند، ولی خلل و فرج لازم را ندارند. در این صورت بایستی این مواد را بر روی سطوح داخلی حفره‌ها و خلل و فرج یک جسم کاملاً متخلخل قرار داد. به

۱ - Deactive

۲ - Regeneration

۳ - Cracking

۴ - Pore Volume

۵ - nm = نانومتر ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ )

این گونه کاتالیزگرها، «کاتالیزگرهای پایه‌دار»<sup>۱</sup> می‌گویند. در صنعت از کاتالیزگرهای پایه‌دار استفاده‌ی زیادی می‌شود. بنابراین لازم است با ساختمان آن‌ها بیشتر آشنا شویم. کاتالیزگر پایه‌دار از سه جزء تشکیل می‌شود:

۱- سطح فعال<sup>۲</sup> (جزء فعال)

۲- پایه<sup>۳</sup>

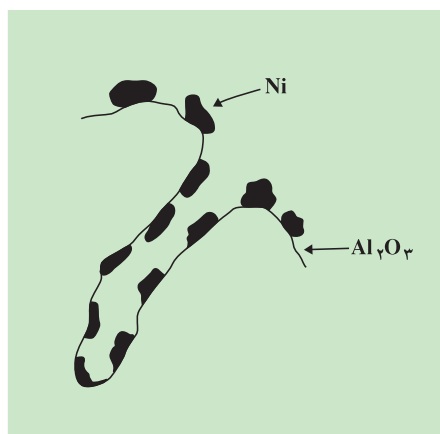
۳- تقویت‌کننده<sup>۴</sup>

**سطح فعال** همان سطح کاتالیزگر است که واکنش سطحی بر روی آن انجام می‌شود. فلزاتی مانند نیکل، پلاتین، آهن، مس، نقره، پالادیم و بعضی اکسیدهای فلزی نظیر اکسید نیکل، اکسید روی، اکسید مس، همچنین سولفید بعضی فلزات نظیر سولفید مولیبدن به‌عنوان جزء فعال مورد استفاده قرار می‌گیرند.

پایه ماده‌ای است بسیار متخلخل که وظیفه‌ی اصلی آن ایجاد سطح مورد نیاز جهت قرار گرفتن کاتالیزگر (جزء فعال) بر روی آن است. متداول‌ترین موادی که به‌عنوان پایه به‌کار می‌روند عبارت‌اند از اکسیدهایی با نقطه‌ی ذوب بسیار بالا نظیر آلومین ( $Al_2O_3$ ) و سیلیس ( $SiO_2$ ) و نیز خاک رس، زئولیت‌ها و کربن. جزء پایه معمولاً خنثی بوده و نقشی در انجام یا توقف واکنش‌های مورد نظر ندارد. البته در بسیاری از موارد، کاتالیزگر را به‌گونه‌ای طراحی می‌کنند که پایه نیز در انجام یا توقف تعدادی از واکنش‌های شیمیایی مطرح در آن فرآیند نقش داشته باشد. به‌رحال جزء پایه باید از نظر خواص فیزیکی و استحکام مکانیکی شرایط مطلوب را داشته باشد و در مقابل فشار، حرارت و جریان سیالات خواص خود را از دست ندهد. شکل ۲-۳ یکی از منافذ یک کاتالیزگر را نشان می‌دهد که جزء فعال آن نیکل و پایه‌ی آن آلومین است. این کاتالیزگر را به اختصار چنین نمایش می‌دهند:



در ساخت کلیه‌ی کاتالیزگرها، چه پایه‌دار و چه بدون پایه، از تقویت‌کننده‌ها استفاده می‌شود. تقویت‌کننده‌ها موادی هستند که به مقدار کم در ساختمان کاتالیزگرها به‌کار می‌روند و باعث افزایش خواص مطلوب کاتالیزگر (هم‌سطح فعال و هم‌پایه‌ی آن) می‌شوند. تقویت‌کننده‌ها برای واکنش‌ها به منزله‌ی نمک و ادویه برای غذا می‌باشند، همان‌طور که مقدار کمی نمک و ادویه به شکل چشم‌گیری طعم و مزه‌ی غذا را بهبود می‌بخشد (به‌گونه‌ای که بدون آن‌ها ممکن است غذا قابل مصرف نباشد)، تقویت‌کننده‌ها نیز خواص کاتالیزگرها نظیر فعالیت و قدرت‌گزینش آن‌ها را افزایش می‌دهند.



شکل ۲-۳- نحوه‌ی قرار گرفتن جزء فعال (نیکل) بر روی سطح یکی از حفره‌های پایه (آلومین)

۱ - Supported Catalyst

۲ - Active Site (Active Component)

۳ - Support

۴ - Promoter

ساخت کاتالیزگر آمیزه‌ای از صنعت و هنر است. هم‌اکنون شرکت‌های سازنده‌ی کاتالیزگر در سرتاسر دنیا سعی دارند محصولاتی با خواص بهتر تولید کنند و در این راه رقابت شدیدی میان آن‌ها جریان دارد. هریک از این سازمان‌ها روش‌های ساخت خود را، که غالباً به صورت تجربی و حتی اتفاقی به آن دست یافته‌اند (بخصوص نوع، مقدار و نحوه‌ی اضافه کردن تقویت‌کننده‌ها) همچون گنجینه‌ای گران بها مخفی نگه می‌دارند تا بتوانند محصول خود را در بازارهای جهانی بدون رقیب عرضه نمایند. البته تعداد کشورهایی که توانایی ساخت کاتالیزگر را دارند محدود است. آمریکا، کشورهای اروپایی، روسیه، چین و هند از مهم‌ترین سازندگان کاتالیزگر می‌باشند. در ایران نیز فعالیت‌هایی جهت تولید انبوه بعضی از انواع کاتالیزگرها هم‌اکنون به نتیجه رسیده است. جدول ۱-۲ بعضی از انواع کاتالیزگرها و کاربردهای آن‌ها را بیان می‌کند.

جدول ۱-۲- چند نمونه از کاتالیزگرهای متداول و مورد استفاده‌ی آن‌ها<sup>۱</sup>

کاتالیزگر	پایه	مورد استفاده
نیکل (Ni)	ندارد	اشباع روغن‌های نباتی و حیوانی توسط هیدروژن، بدین ترتیب روغن مایع به جامد تبدیل می‌شود.*
نیکل (Ni)	آلومین (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	تولید هیدروژن از گاز طبیعی (متان)*
پلاتین (Pt)	آلومین (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	رآکتورهای دستگاه تبدیل پالایشگاه که در آن نفتا به بنزین با عدد اکتان بالا تبدیل می‌شود.*
آهن (Fe)	ندارد	واکنش هیدروژن و نیتروژن و تولید آمونیاک*
پنتا اکسید وانادیم (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	سیلیس (SiO <sub>2</sub> )	تبدیل SO <sub>2</sub> به SO <sub>3</sub> (در صنعت تولید اسیدسولفوریک)*
SiO <sub>2</sub> - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ندارد	هیدروژن‌زدایی از بوتان و تولید بوتادین

\* در فصل‌های آینده با جزئیات این واکنش‌ها آشنا می‌شوید.

## ۲-۵- غیرفعال شدن<sup>۲</sup> کاتالیزگرها

همان‌طور که بیان شد، میزان فعالیت کاتالیزگرها ضمن کار به تدریج کاهش می‌یابد و این مواد غیرفعال می‌شوند تا جایی که باید فرآیند را متوقف و کاتالیزگر را احیا یا تعویض کرد.

سه عامل مهم که سبب غیرفعال شدن کاتالیزگر می‌شوند عبارت‌اند از:

۱- فرسودگی<sup>۳</sup>: با عبور سیال از داخل رآکتور، به مرور زمان کاتالیزگر فرسوده شده و خلل و فرج و سطوح فعال آن بر اثر

سایش و دیگر عوامل فیزیکی نظیر حرارت از بین می‌رود.

۲- مسموم شدن<sup>۴</sup>: مسموم شدن، در اصطلاح، یک پدیده‌ی شیمیایی است که طی آن بعضی از ترکیبات یا عناصر یا یون‌ها

۱- اطلاعات این جدول فقط جنبه‌ی آگاهی‌دادن دارد و نیازی به حفظ کردن مطالب آن نیست.

۲- Deactivation

۳- Aging

۴- Poisoning



(نظیر  $\text{CO}_2$ ، آرسنیک، گوگرد، نیتروژن، فسفر و یون کلر) با نواحی فعال کاتالیزگر واکنش داده و آن‌ها را از بین می‌برند. هر کاتالیزگر به تعدادی از سموم (ترکیبات، عناصر، یون‌ها) حساس است. ممکن است ماده‌ای برای یک نوع کاتالیزگر سم باشد ولی بر کاتالیزگرهای دیگر اثر نامطلوب نداشته باشد. به‌رحال اثر اغلب سموم بر کاتالیزگرها دائمی و برگشت‌ناپذیر است و در صورت مسموم شدن کاتالیزگر باید آن را تعویض کرد. در صنایع شیمیایی به این مسئله کاملاً توجه می‌شود و همواره مواظب هستند تا خوراک رآکتور عاری از سموم کاتالیزگر باشد. برای مثال یون‌های  $\text{Zn}^{2+}$ ،  $\text{Cu}^+$ ،  $\text{Cu}^{2+}$  و  $\text{Ag}^+$  باعث مسموم شدن کاتالیزگر پلاتین می‌شوند.

**۳- کک‌گرفتنی<sup>۱</sup>:** این پدیده بخصوص بر روی کاتالیزگرهای صنایع پالایش نفت و پتروشیمی بیش‌تر به چشم می‌خورد. در داخل رآکتور و تحت شرایط دما و فشار بالا، احتمال تجزیه‌ی هیدروکربن‌ها به کربن (کک) و هیدروژن بسیار زیاد است. در این صورت کک تولید شده بر روی سطوح کاتالیزگر رسوب کرده، منافذ را مسدود می‌کند و سطوح فعال را می‌پوشاند؛ در نتیجه کاتالیزگر از فعالیت باز می‌ماند. خوشبختانه کک‌گرفتنی پدیده‌ای است برگشت‌پذیر و معمولاً با توقف عملیات تولید و عبور دادن هوای داغ از روی بستر کاتالیزگر، کک را می‌سوزانند و آن را به شکل  $\text{CO}_2$  از داخل رآکتور خارج می‌کنند.

### تمرین



- ۱- به‌نظر شما آزمون‌ها چه نوع کاتالیزگری می‌توانند باشند، همگن یا ناهمگن؟ دلیل خود را توضیح دهید.
- ۲- با راهنمایی مربی و با استفاده از کتب شیمی خود، برای هریک از واکنش‌های کاتالیستی همگن و ناهمگن دو مثال، به‌غیر از مثال‌های متن درس، پیدا کنید.
- ۳- کاتالیزگر را تعریف کنید. نحوه‌ی عملکرد کاتالیزگرها را در یک جمله بیان کنید.
- ۴- بازدارنده چیست؟
- ۵- مکانیسم واکنش‌های کاتالیستی ناهمگن (کاتالیزگر جامد) را فقط نام ببرید. برای واکنش  $2\text{N}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Au}} 2\text{N}_2 + \text{O}_2$  این مراحل را با رابطه نشان دهید.
- ۶- چهار مشخصه‌ی مهم یک کاتالیزگر صنعتی را نام برده و هریک را در یک یا دو جمله توضیح دهید.
- ۷- مهم‌ترین نقش «پایه» در کاتالیزگرها چیست؟
- ۸- عواملی را که باعث غیرفعال شدن یک کاتالیزگر می‌شوند فقط نام ببرید.
- ۹- مسمومیت کاتالیزگرها را به‌طور کامل شرح دهید.
- ۱۰- اضافه‌کردن کاتالیزگر به یک واکنش تعادلی چه تأثیری بر تعادل دارد؟ به‌طور کامل و با ذکر یک مثال توضیح دهید.

۱۱- می‌دانیم که در بسیاری از موارد استفاده از کاتالیزگر بدین منظور است که واکنش با همان سرعت اما در دما و فشار کم‌تری انجام شود. فکر می‌کنید بدین ترتیب کاتالیزگر در هزینه‌های مربوط به کدام اقلام زیر صرفه‌جویی می‌کند؟ توضیح دهید.

الف) مواد اولیه      ب) سوخت      پ) حمل و نقل      ت) نیروی انسانی

۱۲- شکل ۱-۲ نمودار انرژی یک واکنش گرماده را نشان می‌دهد. مشابه این نمودار را برای یک واکنش گرماگیر (با کاتالیزگر و بدون کاتالیزگر) رسم کنید. بگویید استفاده از کاتالیزگر چه تأثیری بر گرمای واکنش ( $\Delta H$ ) دارد؟ توضیح دهید.