

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و  
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشکده فنی و مهندسی  
گروه مهندسی شیمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی شیمی  
گرایش ترمودینامیک و سینتیک

**عنوان پایان نامه**

**بررسی اثر میدان مغناطیسی بر عملکرد کاتالیست های اکسیداسیون جزئی متان پروموت  
شده با فلز آهن**

استاد راهنما:

دکتر شهرام شریف نیا

نگارش:

زهره کرمی

اسفند ماه ۱۳۸۸

## چکیده

امروزه فرآیند کاتالیستی اکسیداسیون جزئی متان مورد توجه زیادی قرار گرفته است. دو گروه اصلی کاتالیست برای این فرآیند گزارش شده است که فعالیت بالایی را از خود نشان داده‌اند. کاتالیست‌های نیکل پایه‌دار و همچنین کاتالیست‌های پایه دار فلزات نجیب. بدلیل ارزان قیمت بودن و قابل دسترس بودن نیکل استفاده از این نوع کاتالیست در کارهای تجربی بیشتر مورد توجه بوده و از دیدگاه صنعتی نیز استفاده از کاتالیست‌های نیکل پایه‌دار ترجیح داده شده و همچنان در حال توسعه است. با توجه به خصوصیات ذاتی فلز نیکل که یک ماده فرومغناطیس محسوب می‌شود تحت شرایط میدان رفتار مغناطیسی در آنها رشد می‌یابد. هم جهت شدن دو قطبی‌های مغناطیسی در این نوع از مواد سبب تحت تاثیر قرار گرفتن حوزه‌های مغناطیسی در آنها شده و به همین دلیل خواص مغناطیسی ماده تقویت می‌شود. ارتقادهنده آهن هم به جهت همین خاصیت در نظر گرفته شده است. برای بررسی عملکرد کاتالیست از یک رآکتور لوله‌ای از جنس کوارتز با قطر داخلی تقریبی ۳ میلی‌متر استفاده شد و انجام واکنش‌ها در فشار اتمسفریک و دماهای بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر تقویت کننده آهن در کاتالیست نیکل همچنین تاثیر میدان مغناطیسی خارجی بر عملکرد واکنش کاتالیستی اکسیداسیون جزئی متان در مرحله ساخت و همچنین در شرایط انجام واکنش بوده است. نتایج بدست آمده بیانگر این است که حضور آهن بعنوان تقویت کننده در ساختار کاتالیست بازده هیدروژن را افزایش می‌دهد. همچنین اثر میدان مغناطیسی در شرایط انجام واکنش افزایش کمی در بازده  $H_2$  و نسبت  $H_2/CO$  نشان می‌دهد. اما با حضور میدان مغناطیسی در مرحله آماده سازی کاتالیست اثر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد کاتالیست مشاهده شد و گزینش پذیری  $CO$  به میزان چشمگیری افزایش پیدا کرد. افزایش دما در آزمایشات باعث افت شدید تاثیرات میدان بر روی نتایج عملکرد کاتالیست شده است که با ارتباط مستقیم کاهش خاصیت مغناطیسی با افزایش دما مطابقت دارد.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲	پیش‌گفتار
	<b>فصل اول: مروری بر منابع علمی</b>
۴	۱-۱- گاز سنتز
۴	۱-۱-۱- مواد اولیه
۵	۱-۱-۲- موارد مصرف گاز سنتز
۶	۲-۱- روش‌های تهیه گاز سنتز
۶	۱-۲-۱- روشهای معمول تولید گاز سنتز
۶	۱-۲-۱-۱- گازی شکل کردن زغال سنگ
۶	۲-۱-۲-۱- رفرمینگ هیدروکربن‌ها
۷	۱-۲-۱-۲-۱- تبدیل متان با بخار آب
۷	۲-۲-۱-۲-۱- تبدیل متان با دی‌اکسید کربن
۸	۱-۲-۱-۳-۱- تبدیل متان با اکسیژن و بخار آب
۸	۳-۱-۲-۱- اکسیداسیون جزئی هیدروکربن‌ها
۸	۱-۳-۱-۲-۱- اکسیداسیون جزئی متان
۹	۲-۲-۱- تکنولوژی‌های جدید تولید گاز سنتز
۹	۳-۱- فرایند مناسب جهت تولید گاز سنتز
۱۰	۱-۳-۱- انتخاب فرایند
۱۲	۴-۱- تاثیر پارامترهای مختلف در اکسیداسیون جزئی متان
۱۲	۴-۱-۱- تاثیر دمای کلسیناسیون
۱۴	۴-۱-۲- تاثیر دمای واکنش
۱۵	۴-۱-۳- تاثیر نسبت $CH_4/O_2$
۱۶	۴-۱-۴- تاثیر سرعت فضایی
۱۶	۵-۱- کاتالیست‌های واکنش اکسیداسیون جزئی متان
۱۷	۱-۵-۱- کاتالیست‌های نیکل، کبالت و آهن پایه‌دار
۱۹	۲-۵-۱- کاتالیست‌های پایه دار فلزات نجیب
۲۰	۳-۵-۱- کاربرد فلزات واسطه
۲۰	۶-۱- ارتقاء دهنده‌ها
۲۱	۱-۶-۱- تاثیر ارتقا دهنده‌ها بر روی کاتالیست $Ni/Al_2O_3$
۲۱	۱-۶-۱-۱- افزایش مساحت سطح کاتالیست
۲۲	۲-۶-۱-۱- کاهش اندازه ذرات و افزایش پراکندگی
۲۴	۳-۶-۱-۱- افزایش مقاومت در برابر تشکیل کک

۲۷	۴-۱-۶-۱- افزایش احیاپذیری کاتالیست
۳۰	۵-۱-۶-۱- افزایش پایداری کاتالیست
۳۲	۶-۱-۶-۱- افزایش فعالیت کاتالیست
۳۶	۷-۱- مغناطیس
۳۶	۱-۷-۱- تاریخچه مغناطیس
۳۷	۱-۱-۷-۱- تولد میدان مغناطیسی
۳۷	۲-۱-۷-۱- مغناطیس های طبیعی و مصنوعی
۳۸	۲-۷-۱- حالت های مغناطیسی مواد
۳۸	۱-۲-۷-۱- فرومغناطیس
۳۸	۱-۱-۲-۷-۱- مواد فرومغناطیس نرم
۳۹	۲-۱-۲-۷-۱- مواد فرومغناطیس سخت
۳۹	۲-۲-۷-۱- پارامغناطیس
۴۰	۱-۲-۲-۷-۱- خاصیت پارامغناطیسی
۴۰	۲-۲-۲-۷-۱- شرط پارامغناطیسی بودن
۴۰	۳-۲-۷-۱- دیامغناطیس
۴۱	۱-۳-۲-۷-۱- اختلاف ساختاری ذرات سازنده مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس
۴۱	۳-۷-۱- قانون کوری
۴۲	۴-۷-۱- پذیرفتاری مغناطیسی
۴۲	۱-۴-۷-۱- پذیرفتاری پارامغناطیسی
۴۲	۲-۴-۷-۱- پذیرفتاری مغناطیسی در فلزات
۴۳	۳-۴-۷-۱- پذیرفتاری فرومغناطیس
۴۳	۵-۷-۱- اثرات میدان مغناطیسی
۴۳	۱-۵-۷-۱- اثر بارز میدان مغناطیسی
۴۴	۲-۵-۷-۱- میدان های مغناطیسی غیر یکنواخت
۴۴	۳-۵-۷-۱- القای مغناطیسی
۴۴	۴-۵-۷-۱- گشتاور مغناطیسی
۴۶	۵-۵-۷-۱- میدان های مغناطیسی در مواد
۴۸	۶-۷-۱- برخی اثرات میدان های خارجی مغناطیسی و الکتریکی در واکنش های شیمیایی متفاوت
	<b>فصل دوم: فعالیت های تجربی</b>
۵۷	۱-۲- مراحل ساخت کاتالیست ها
۵۷	۱-۱-۲- نحوه ساخت کاتالیست نیکل بر پایه آلومینا
۵۸	۱-۱-۲- ساخت کاتالیست نیکل-آهن بر پایه آلومینا به روش معمول
۵۸	۲-۱-۱-۲- ساخت کاتالیست های نیکل-آهن بر پایه آلومینا تحت میدان

۵۸	۲-۱-۲- نحوه احیای کاتالیست‌های نیکل بر پایه آلومینا
۵۸	۲-۲- تعیین مشخصات کاتالیست‌ها
۵۹	۳-۲- سیستم آزمایشگاهی تولید گاز سنتز
۶۰	۱-۳-۲- بخش خوراک دهی
۶۰	۲-۳-۲- بخش واکنش
۶۰	۱-۲-۳-۲- رآکتور
۶۱	۲-۲-۳-۲- دستگاه مولد میدان مغناطیسی
۶۲	۳-۳-۲- بخش آنالیز
۶۳	۱-۳-۳-۲- نحوه کالیبراسیون دستگاه کروماتوگراف گاز
۶۳	۴-۲- روش انجام تست‌های رآکتوری
۶۴	۱-۴-۲- مراحل انجام تست‌ها
۶۴	۲-۴-۲- شرح انجام آزمایشات
۶۵	۳-۴-۲- ترتیب آزمایشات
۶۵	۱-۳-۴-۲- واکنش اکسیداسیون جزئی متان همراه با اعمال میدان

مغناطیسی خارجی

۶۵	۲-۳-۴-۲- اکسیداسیون جزئی متان با کاتالیست نیکل- آهن
۶۵	۳-۳-۴-۲- تست Blank

فصل سوم: نتایج و بحث‌ها

۶۹	۱-۳- نتایج تعیین مشخصات کاتالیست‌های نیکل
۶۹	۱-۱-۳- نتایج آزمایش BET
۶۹	۲-۱-۳- نتایج XRD کاتالیست‌های $\text{Ni-Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
۷۱	۳-۱-۳- نتایج TEM کاتالیست‌های $\text{Ni-Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
۷۴	۴-۱-۳- نتایج TGA کاتالیست‌های $\text{Ni-Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
۷۶	۲-۳- بررسی کاتالیست دو فلزی $\text{Ni-Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ در اکسیداسیون جزئی متان
۸۰	۳-۳- ارزیابی عملکرد کاتالیست‌های $\text{Ni-Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ در هنگام واکنش تحت میدان

مغناطیسی

۸۴	۴-۴- ارزیابی عملکرد کاتالیست‌های $\text{Ni-Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ در شرایط متفاوت ساخت
۸۵	۱-۴-۳- عملکرد کاتالیست $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
۸۷	۲-۴-۳- عملکرد کاتالیست $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
۹۰	۳-۴-۳- عملکرد کاتالیست $\text{Ni-3\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
۹۳	۴-۴-۳- عملکرد کاتالیست $\text{Ni-6\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
۹۷	۵-۳- عملکرد کاتالیست $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ تحت میدان مغناطیسی در شدت‌های

مختلف

## فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱۰۳ ۱-۴- نتیجه‌گیری  
۱۰۸ ۲-۴- پیشنهادات

### پیوست‌ها

- ۱۱۱ پیوست الف- محاسبات ساخت کاتالیست  
۱۱۳ پیوست ب- نتایج کالیبراسیون GC  
۱۱۷ پیوست ج- موازنه جرمی  
۱۱۹ پیوست د- نحوه ساخت گاز خوراک

### مراجع

- ۱۲۲ فهرست مراجع



## فهرست شکل ها

### عنوان

### صفحه

- شکل (۱-۱): نمایش اطلاعات ترمودینامیکی روش‌های تولید گاز سنتز ۱۱
- شکل (۲-۱): نمودارهای تعادلی ترمودینامیکی در دو حالت (a) فشار اتمسفری و (b) فشار 8 bar ۱۲
- شکل (۳-۱): عملکرد POM برای ۱٪ وزنی Ni/Ca-AlO بعنوان تابعی از دمای کلسیناسیون (۳) ۱۳  
( $973\text{ K}$ ,  $1\text{ bar}$ ,  $18 \times 10^4\text{ h}^{-1}$ )
- شکل (۴-۱): آنالیز TPR برای ۱٪ وزنی Ni/Ca-AlO در دماهای کلسینه شده: (a) 673 K, (b) 723 K ۱۴  
, (c) 773 K و (d) 873 K
- شکل (۵-۱): تاثیر دما در POM (۱: درصد تبدیل متان, ۲) گزینش پذیری CO و (۳) گزینش پذیری H<sub>2</sub> ۱۵  
( $\text{CH}_4/\text{O}_2=2$ ,  $\text{GHSV}=1 \times 10^5\text{ h}^{-1}$ )
- شکل (۶-۱): تاثیر نسبت متان به اکسیژن در POM (۱: درصد تبدیل متان, ۲) گزینش پذیری CO و (۳) ۱۵  
( $t=600^\circ\text{C}$ ,  $\text{GHSV}=1 \times 10^5\text{ h}^{-1}$ ) H<sub>2</sub> گزینش پذیری
- شکل (۷-۱): تاثیر سرعت فضایی در POM (۱: درصد تبدیل متان, ۲) گزینش پذیری CO و (۳) ۱۶  
( $\text{CH}_4/\text{O}_2=2$ ,  $t=600^\circ\text{C}$ ) H<sub>2</sub> گزینش پذیری
- شکل (۸-۱): تصاویر آنالیز TEM برای کاتالیست های (a) NiB/Ca-AlO و (b) Ni/Ca-AlO ۲۲
- شکل (۹-۱): آنالیز XRD برای کاتالیست های (a) 20%Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و (b) 20%Ni-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ۲۳  
(دمای کلسیناسیون 600°C)
- شکل (۱۰-۱): آنالیز XRD برای کاتالیست های (۱) Ni/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> و (۲) Ni/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و (۳) ۲۳  
Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- شکل (۱۱-۱): آنالیز XRD برای (۱) Ni/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (۲) Ni-Na/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (۳) Ni-Sr/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ۲۴  
(۴) Ni-La/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و (۵) Ni-Ce/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- شکل (۱۲-۱): آنالیز TPO از کاتالیست های ترکیب شده با کربن: (a) Rh/AlO, (b) Ni/Ca-AlO و (c) ۲۵  
NiB/Ca-AlO
- شکل (۱۳-۱): آنالیز TPR برای (۱) Ni/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (۲) Ni-Na/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (۳) Ni-Sr/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ۲۸  
(۴) Ni-La/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و (۵) Ni-Ce/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- شکل (۱۴-۱): آنالیز TPR در دمای کلسیناسیون 800°C برای کاتالیست های (۱) Ni-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و (۲) ۲۸  
Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- شکل (۱۵-۱): آنالیز TPR برای کاتالیست های Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ۲۹
- شکل (۱۶-۱): تغییر درصد تبدیل متان با زمان واکنش برای (۱) Ni/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> و (۲) Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و (۳) ۳۰  
Ni/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- شکل (۱۷-۱): تغییر درصد تبدیل متان با گذشت زمان واکنش در دمای کلسیناسیون 800°C و 20% ۳۱  
وزنی نیکل (N: کاتالیست Ni, L: ارتقادهنده La و A: پایه Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- شکل (۱۸-۱): تاثیر حضور ارتقادهنده Mo در فعالیت کاتالیست Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با گذشت زمان و تست ۳۱

- شکل (۱-۱۹) : درصد تبدیل متان (N : کاتالیست Ni , L : ارتقادهنده La و A : پایه  $Al_2O_3$ ) ۳۳
- شکل (۱-۲۰) : گزینش پذیری  $H_2$  (N : کاتالیست Ni , L : ارتقادهنده La و A : پایه  $Al_2O_3$ ) ۳۳
- شکل (۱-۲۱) : تاثیر ارتقادهنده های CeCa بر درصد تبدیل متان در کاتالیست  $Ni/MgO-Al_2O_3$  ۳۴
- شکل (۱-۲۲) : تاثیر ارتقادهنده های CeCa بر گزینش پذیری CO در کاتالیست  $Ni/MgO-Al_2O_3$  ۳۴
- شکل (۱-۲۳) : تاثیر ارتقادهنده های CeCa بر گزینش پذیری  $H_2$  در کاتالیست  $Ni/MgO-Al_2O_3$  ۳۵
- شکل (۱-۲۴) : درصد تبدیل متان و گزینش پذیری CO برای کاتالیست های (۱)  $Ni/CeO_2-ZrO_2$  ,  $Ni/Al_2O_3$  (۲) و  $Ni/CeO_2-ZrO_2-Al_2O_3$  (۳) ۳۶
- شکل (۱-۲۵) : نمودار مغناطیسی شدن بر حسب شدت میدان برای مواد فرومغناطیس (H: magnetif field strength و M: magnetization) ۳۹
- شکل (۱-۲۶) : آرایش حوزه‌های میدان مغناطیسی برای مواد پارامغناطیس ۴۰
- شکل (۱-۲۷) : آرایش خطوط میدان اطراف یک دوقطبی مغناطیسی ۴۳
- شکل (۱-۲۸) : شمای سیستم آزمایشگاهی اندازه‌گیری نیروی وارد بر مواد مختلف در هنگامیکه درون میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند ۴۶
- شکل (۱-۲۹) : حجم گاز شرکت کننده در واکنش (۱) به عنوان تابعی از زمان در القاءهای مغناطیسی مختلف (۱) بدون میدان، (۲) شدت 0.1T، (۳) شدت 0.2T، (۴) شدت 0.95T حضور میدان برای مدت زمان ۶۰ دقیقه، نسبت حجمی مخلوط گازهای واکنش دهنده :  $C_2H_4 : H_2 : Ar = 3.2 : 13.8 : 83.0$  ۵۰
- شکل (۱-۳۰) : حجم گاز شرکت کننده در واکنش (۲) نسبت به زمان. حضور میدان مغناطیسی 0.95 T برای ۶۰ دقیقه، (۱) بدون حضور میدان، (۲) در حضور میدان ۵۱
- شکل (۱-۳۱) : حجم هیدروژن شرکت کننده در واکنش (۳) نسبت به زمان، حضور میدان مغناطیسی 0.95 T برای ۱۵ دقیقه. (۱) بدون میدان، (۲) در میدان ۵۱
- شکل (۱-۳۲) : حجم اکسیژن شرکت کننده در واکنش (۴) نسبت به زمان، حضور میدان مغناطیسی 0.95 T برای مدت ۱۵ دقیقه. (۱) بدون حضور میدان، (۲) در حضور میدان ۵۲
- شکل (۱-۳۳) : حجم اکسیژن شرکت کننده در واکنش (۵) نسبت به زمان، حضور میدان مغناطیسی 0.95 T برای مدت ۲۰ دقیقه. نسبت حجمی مخلوط گازهای واکنش دهنده  $O_2 : H_2 : Ar = 2.5 : 10 : 87.5$  (۱) بدون حضور میدان، (۲) در حضور میدان ۵۲
- شکل (۱-۳۴) : شمای setup آزمایشگاهی ; (۱) منبع میدان مغناطیسی DC، (۲) همزن، (۳) رآکتور، (۴) سیلندر گاز، (۵) واحد مانومتری، (A) ammeter. ۵۳
- شکل (۱-۳۵) : نسبت شدت خطوط برای طول موج‌های متداول  $PcCu(626\text{ nm})$  در جذب EAS برای محصولات نهایی (در حدود ۱۲۰ روز) برای حالت تحت میدان (a,b) و بدون میدان (c) خطوط نقطه چین) پودر مس اکسید شده (۳۰ و ۱۰۰ نانومتر) بر حسب مقدار آهن در مس ۵۴
- شکل (۲-۱) : نمایش شماتیک سیستم آزمایشگاهی تولید گاز سنتز ۵۹
- شکل (۲-۲) : نمایش شماتیک بخش رآکتور ۶۱
- شکل (۲-۳) : شمای ساده‌ای از دستگاه مولد میدان مغناطیسی (تصویر از بالا) ۶۲

- شکل (۳-۱): الگوی XRD برای کاتالیست های (۱) Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (۲) Ni-1%Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (۳) NiO (◆),  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (▲), Ni-6%Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (۴), Ni-3%Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- شکل (۳-۲): الگوی XRD برای کاتالیست Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (۱) کلسیناسیون معمولی, (۲) کلسیناسیون تحت میدان مغناطیسی, NiO (◆),  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (▲)
- شکل (۳-۳): الگوی XRD برای کاتالیست Ni-1%Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (۱) کلسیناسیون معمولی, (۲) کلسیناسیون تحت میدان مغناطیسی, NiO (◆),  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (▲)
- شکل (۳-۴): تصاویر TEM و توزیع اندازه ذرات برای کاتالیست 10%Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a) کلسیناسیون عادی, (b) کلسیناسیون تحت میدان مغناطیسی
- شکل (۳-۵): تصاویر TEM و توزیع اندازه ذرات برای کاتالیست 10%Ni-1%Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a) کلسیناسیون عادی, (b) کلسیناسیون تحت میدان مغناطیسی
- شکل (۳-۶): تصویر TEM از کاتالیست 10%Ni-3%Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در شرایط کلسیناسیون عادی
- شکل (۳-۷): نمودار TGA برای کاتالیست Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در شرایط: (a) کلسیناسیون عادی, (b) کلسیناسیون تحت میدان مغناطیسی
- شکل (۳-۸): نمودار TGA برای کاتالیست Ni-1%Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در شرایط: (a) کلسیناسیون عادی, (b) کلسیناسیون تحت میدان مغناطیسی
- شکل (۳-۹): درصد تبدیل متان برای کاتالیست های Ni-Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- شکل (۳-۱۰): گزینش پذیری CO برای کاتالیست های Ni-Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- شکل (۳-۱۱): بازده H<sub>2</sub> برای کاتالیست های Ni-Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- شکل (۳-۱۲): نسبت H<sub>2</sub>/CO برای کاتالیست های Ni-Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- شکل (۳-۱۳): درصد اختلاف بازده H<sub>2</sub> برای کاتالیست Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (در حالت مبنا) و کاتالیست های Ni-Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- شکل (۳-۱۴): اختلاف نسبت H<sub>2</sub>/CO برای کاتالیست Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (در حالت مبنا) و کاتالیست های Ni-Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- شکل (۳-۱۵): درصد تبدیل متان برای کاتالیست Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در شرایط متفاوت واکنش, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- شکل (۳-۱۶): درصد گزینش پذیری CO برای کاتالیست Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در شرایط متفاوت واکنش, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- شکل (۳-۱۷): درصد بازده H<sub>2</sub> برای کاتالیست Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در شرایط متفاوت واکنش, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- شکل (۳-۱۸): نسبت H<sub>2</sub>/CO برای کاتالیست Ni/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در شرایط متفاوت واکنش, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر

- ۸۲ شکل (۳-۱۹): درصد تبدیل متان برای کاتالیست  $\text{Ni-3\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط متفاوت واکنش، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۳ شکل (۳-۲۰): درصد گزینش پذیری  $\text{CO}$  برای کاتالیست  $\text{Ni-3\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط متفاوت واکنش، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۳ شکل (۳-۲۱): درصد بازده  $\text{H}_2$  برای کاتالیست  $\text{Ni-3\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط متفاوت واکنش، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۴ شکل (۳-۲۲): نسبت  $\text{H}_2/\text{CO}$  برای کاتالیست  $\text{Ni-3\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط متفاوت واکنش، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۵ شکل (۳-۲۳): درصد تبدیل متان برای کاتالیست  $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۵ شکل (۳-۲۴): درصد گزینش پذیری  $\text{CO}$  برای کاتالیست  $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۶ شکل (۳-۲۵): درصد بازده  $\text{H}_2$  برای کاتالیست  $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۶ شکل (۳-۲۶): نسبت  $\text{H}_2/\text{CO}$  برای کاتالیست  $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۷ شکل (۳-۲۷): درصد اختلاف تبدیل متان، گزینش پذیری  $\text{CO}$ ، بازده  $\text{H}_2$  و نسبت  $\text{H}_2/\text{CO}$  بین حالت-های کلسیناسیون در شرایط عادی (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان برای کاتالیست نیکل بر پایه آلومینا
- ۸۸ شکل (۳-۲۸): درصد تبدیل متان برای کاتالیست  $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۸ شکل (۳-۲۹): درصد گزینش پذیری  $\text{CO}$  برای کاتالیست  $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۹ شکل (۳-۳۰): درصد بازده  $\text{H}_2$  برای کاتالیست  $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۸۹ شکل (۳-۳۱): نسبت  $\text{H}_2/\text{CO}$  برای کاتالیست  $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۹۰ شکل (۳-۳۲): درصد اختلاف تبدیل متان، گزینش پذیری  $\text{CO}$ ، بازده  $\text{H}_2$  و نسبت  $\text{H}_2/\text{CO}$  بین حالت-های کلسیناسیون در شرایط عادی (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان برای کاتالیست با  $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
- ۹۰ شکل (۳-۳۳): درصد تبدیل متان برای کاتالیست  $\text{Ni-3\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر
- ۹۱ شکل (۳-۳۴): درصد گزینش پذیری  $\text{CO}$  برای کاتالیست  $\text{Ni-3\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در شرایط ساخت متفاوت، دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر

- شکل (۳-۳۵): درصد بازده  $H_2$  برای کاتالیست  $Ni-3\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۱
- شکل (۳-۳۶): نسبت  $H_2/CO$  برای کاتالیست  $Ni-3\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۲
- شکل (۳-۳۷): درصد اختلاف تبدیل متان, گزینش پذیری  $CO$ , بازده  $H_2$  و نسبت  $H_2/CO$  بین حالت-های کلسیناسیون در شرایط عادی (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان برای کاتالیست  $Ni-3\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  ۹۲
- شکل (۳-۳۸): درصد تبدیل متان برای کاتالیست  $Ni-6\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۳
- شکل (۳-۳۹): درصد گزینش پذیری  $CO$  برای کاتالیست  $Ni-6\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۳
- شکل (۳-۴۰): درصد بازده  $H_2$  برای کاتالیست  $Ni-6\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۴
- شکل (۳-۴۱): نسبت  $H_2/CO$  برای کاتالیست  $Ni-6\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۴
- شکل (۳-۴۲): درصد اختلاف تبدیل متان, گزینش پذیری  $CO$ , بازده  $H_2$  و نسبت  $H_2/CO$  بین حالت-های کلسیناسیون در شرایط عادی (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان برای کاتالیست  $Ni-6\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  ۹۵
- شکل (۳-۴۳): درصد تبدیل متان برای کاتالیست  $Ni-1\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۷
- شکل (۳-۴۴): درصد گزینش پذیری  $CO$  برای کاتالیست  $Ni-1\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۸
- شکل (۳-۴۵): درصد بازده  $H_2$  برای کاتالیست  $Ni-1\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۸
- شکل (۳-۴۶): نسبت  $H_2/CO$  برای کاتالیست  $Ni-1\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در شرایط ساخت متفاوت, دماهای مختلف و فشار ۱ اتمسفر ۹۹
- شکل (۳-۴۷): درصد اختلاف گزینش پذیری  $CO$  برای کاتالیست  $Ni-1\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  بین حالت‌های کلسیناسیون در شرایط عادی (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان مغناطیسی با شدت های مختلف ۹۹
- شکل (۳-۴۸): درصد اختلاف بازده  $H_2$  برای کاتالیست  $Ni-1\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  بین حالت‌های کلسیناسیون در شرایط عادی (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان مغناطیسی با شدت های مختلف ۱۰۰
- شکل (۳-۴۹): اختلاف نسبت  $H_2/CO$  برای کاتالیست  $Ni-1\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  بین حالت‌های کلسیناسیون در شرایط عادی (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان مغناطیسی با شدت های مختلف ۱۰۰
- شکل (۴-۱): مقایسه درصد تبدیل متان برای کاتالیست های  $Ni/\gamma-Al_2O_3$  و  $Ni-1\%Fe/\gamma-Al_2O_3$  در دو حالت کلسیناسیون در شرایط عادی و تحت میدان ۱۰۴

- شکل (۲-۴) : مقایسه درصد گزینش پذیری CO برای کاتالیست های  $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در دو حالت کلسیناسیون در شرایط عادی و تحت میدان  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- شکل (۳-۴) : مقایسه درصد بازده  $\text{H}_2$  برای کاتالیست های  $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در دو حالت کلسیناسیون در شرایط عادی و تحت میدان
- شکل (۴-۴) : مقایسه نسبت  $\text{H}_2/\text{CO}$  برای کاتالیست های  $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Ni-1\%Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در دو حالت کلسیناسیون در شرایط عادی و تحت میدان
- شکل (۵-۴) : درصد اختلاف گزینش پذیری CO بین حالت های کلسیناسیون در شرایط عادی برای کاتالیست نیکل بر پایه آلومینا (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان
- شکل (۶-۴) : درصد اختلاف بازده  $\text{H}_2$  بین حالت های کلسیناسیون در شرایط عادی برای کاتالیست نیکل بر پایه آلومینا (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان
- شکل (۷-۴) : درصد اختلاف نسبت  $\text{H}_2/\text{CO}$  بین حالت های کلسیناسیون در شرایط عادی برای کاتالیست نیکل بر پایه آلومینا (بعنوان حالت پایه) و در حضور میدان

## فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
۲۱	جدول (۱-۱): مساحت سطح مخصوص توسط BET در کاتالیست Ni با ارتقادهنده B
۲۱	جدول (۲-۱): مساحت سطح مخصوص توسط BET در کاتالیست Ni با ارتقادهنده های La و Ce
۲۱	جدول (۳-۱): مساحت سطح مخصوص توسط BET در کاتالیست Ni با ارتقادهنده CeO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>
۲۲	جدول (۴-۱): مساحت سطح مخصوص برای کاتالیست (N : کاتالیست Ni , L : ارتقادهنده La و A : پایه Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
۲۶	جدول (۵-۱): میانگین سرعت تشکیل کک در کاتالیست ها ( در T <sub>f</sub> =873K , 500000h <sup>-1</sup> و 7bar )
۲۷	جدول (۶-۱): مساحت سطح و مقدار کربن تشکیل شده بر روی کاتالیست نیکل همراه با ارتقادهنده
۲۷	جدول (۷-۱): سرعت متوسط تشکیل کک در کاتالیست ها
۳۲	جدول (۸-۱): تاثیر ارتقادهنده ها بر کاتالیست Ni/Ca-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> =2 , t=1023K , GHSV=18×10 <sup>4</sup> h <sup>-1</sup> )
۳۲	جدول (۹-۱): تاثیر ارتقادهنده ها بر کاتالیست Ni/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> =2 , t=600°C , GHSV=1×10 <sup>5</sup> h <sup>-1</sup> )
۳۵	جدول (۱۰-۱): تاثیر ارتقادهنده های Mo , Mn و Sn بر درصد تبدیل متان , گزینش پذیری H <sub>2</sub> و CO در کاتالیست Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( space velocity = 600h <sup>-1</sup> )
۴۵	جدول (۱۱-۱): پذیرفتاری مغناطیسی کاتالیست های گاز سنتز
۴۷	جدول (۱۲-۱): رفتار مغناطیسی بعضی مواد
۵۴	جدول (۱۳-۱): خلاصه نتایج اثرات میدان در واکنش های مختلف
۵۹	جدول (۱-۲): مشخصات گازهای مورد استفاده در سیستم آزمایشگاهی تولید گاز سنتز
۶۵	جدول (۲-۲): برنامه ی آزمایشات پس از تغییر روش آزمایشات

# پیشگفتار



تبدیل هیدروکربن‌های سبک به گاز سنتز یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تبدیل شیمیایی است. گاز سنتز ترکیبی از هیدروژن و مونوکسید کربن است که اصلی‌ترین ماده میانی برای تولید هیدروژن و برخی ترکیبات شیمیایی از جمله متانول، آمونیاک، سوخت‌های مایع و حلال‌ها می‌باشد. از لحاظ صنعتی تولید گاز سنتز از چندین روش قابل انجام است. مهم‌ترین این روش‌ها شامل تبدیل کاتالیستی متان همراه بخار آب، اکسیداسیون جزئی متان، تبدیل متان همراه بخار آب و اکسیژن و تبدیل متان توسط دی‌اکسید کربن می‌باشد. در مقالات و تحقیقات بسیاری فرآیندهای فوق با استفاده از رآکتورهای معمول شیمیایی شرح داده شده‌اند و تاثیر شرایط مختلف عملیاتی و انواع گوناگون کاتالیست بر این فرآیندها بررسی شده است. فرآیندهای معمول صنعتی که تاکنون برای تولید گاز سنتز از متان توسعه یافته‌اند واحدهای عظیم صنعتی با مصرف انرژی بالا می‌باشند. تحقیقات بر روی روشهای پیشرفته و جدید تولید گاز سنتز بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

سه نوع اصلی کاتالیست‌ها برای اکسیداسیون جزئی متان (POM)<sup>1</sup> توسعه یافته بوده‌اند: کاتالیست‌های نیکل پایه دار، کاتالیست‌های پایه دار فلزات نجیب و کاتالیست‌های فلز واسطه کاربیدی. در میان آنها، کاتالیست‌های نیکل پایه دار ارزان و در دسترس و مؤثر هستند و بنابراین برای بخش تجاری مطلوب می‌باشند. نیکل به عنوان یکی از سه عنصر فرومغناطیس در طبیعت دارای خواص ذاتی مغناطیسی می‌باشد که تحت تاثیر میدان مغناطیسی خاصیت مغناطیسی در آن القاء شده و مغناطیس می‌شود. در بسیاری از موارد اثرات اعمال میدان مغناطیسی بر روی عملکرد کاتالیست‌ها در واکنش‌های شیمیایی توسط محققین زیادی بررسی شده و نتایج جالب توجهی در این موارد بدست آمده که سعی می‌شود در فصل اول به برخی از این تحقیقات اشاره شود.

---

<sup>1</sup> -Partial Oxidation of Methane

# فصل اول

مروری بر منابع علمی

## ۱-۱- گاز سنتز :

گاز سنتز، گازی است بی بو، بی رنگ و سمی که در حضور هوا و دمای ۵۷۴ درجه سانتیگراد بدون شعله می سوزد. گاز سنتز یکی از گازهای مهم در صنعت شیمی برای تولید بسیاری از مواد شیمیایی از جمله متانول، آمونیاک و انجام هیدروژناسیون میباشد و در بعضی از مواقع به عنوان سوخت استفاده می شود. اصطلاح گاز سنتز به مخلوطهای گازی اطلاق می شود که محتوی منوکسید کربن، دی اکسید کربن و هیدروژن و آب به نسبت های مختلف باشند. هیدروژن و منوکسید کربن دو ماده مهم در صنایع شیمیایی محسوب شده و دارای مصارف و کاربردهای فراوانی می باشند. منوکسید کربن در تولید رنگ ها، پلاستیک ها، فوم ها، حشره کش ها، علف کش ها، اسیدها و ... به کار می رود. از جمله مصارف هیدروژن نیز می توان به تولید آمونیاک، هیدروژناسیون و هیدروکراکینگ اشاره نمود. همچنین مطرح شدن هیدروژن به عنوان سوخت تمیز در پیل های سوختی و با توجه به اینکه گاز سنتز عمده ترین منبع تولید هیدروژن خالص است، گاز سنتز نقش بسیار مهمی در صنایع شیمیایی ایفا می کند. از آنجاییکه تولید گاز سنتز تقریباً دوسوم هزینه چنین واحدهایی را در بر می گیرد، فرآیندهای تولید گاز سنتز و ارایه روش های جدید و بهینه بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳].

از لحاظ فرآیندی گاز سنتز را می توان از هر نوع خوراک هیدروکربنی تولید کرد. ابتدایی ترین منبع هیدروکربنی برای تولید گاز سنتز ذغال سنگ بوده است، اما به تدریج فرآیندهایی که از گاز طبیعی، ته مانده ستون تقطیر پالایشگاه و هیدروکربن های سنگین به عنوان خوراک استفاده می کنند توسعه یافتند [۴]. با توجه به اینکه مخازن عظیم گاز طبیعی که متان جزء عمده آن می باشد از گزینه های جایگزین نفت خام می باشد و با توجه به نسبت بالای هیدروژن به کربن در متان، گاز طبیعی به عنوان بهترین خوراک برای واحدهای تولید گاز سنتز شناخته شده است [۵]. در حال حاضر اگرچه روش های مختلفی مطرح می باشند و در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته اند اما همچنان تنها راه اقتصادی ممکن برای تبدیل متان به مواد شیمیایی با ارزش تر از طریق تولید گاز سنتز میسر است. این در حالی است که افزایش تقاضا برای تولید هیدروژن سبب توجه بیشتر به این روش شده است [۶].

## ۱-۱-۱- مواد اولیه :

عمده موادی که می توان از آنها گاز سنتز تولید نمود به شرح زیر است:

۱- گاز طبیعی<sup>۱</sup>: این روش که در جهان متداول تر است در دو مرحله کراکینگ و خالص سازی، گاز طبیعی به گاز سنتز تبدیل می گردد. در این روش از کبالت، مولیبدیم و اکسید روی به عنوان کاتالیست استفاده می شود.

۲- مواد سنگین نفتی<sup>۲</sup>: مواد سنگین نفتی با اکسیژن (نه هوا) در دمای ۱۳۷۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱۰۲ اتمسفر ترکیب شده و گاز سنتز تولید می کند.

۳- زغال سنگ<sup>۳</sup>: در فرایند تهیه گاز سنتز از زغال سنگ و یا گازی کردن زغال سنگ بخار آب و اکسیژن در دمای ۸۷۰ درجه سانتیگراد و فشار ۲۷ اتمسفر با زغال سنگ ترکیب می شود.

۴- نفتا: نفتا با بخار آب در مجاورت کاتالیست نیکل در دمای ۸۸۵ درجه سانتیگراد و فشار ۲۵ اتمسفر ترکیب و گاز سنتز حاصل می شود.

گاز سنتز ماده اولیه بسیار با ارزشی جهت تولید مواد متنوع شیمیایی می باشد. با استفاده از این گاز و فرایندهای مختلف، می توان مواد متنوع شیمیایی را تولید نمود که بسته به روش تولید آن نسبت های مختلف هیدروژن به منوکسید کربن به دست می آید. همچنین در موارد مصرف در صنعت، بسته به فرایندی که گاز در آن مورد استفاده قرار می گیرد، نسبت های مختلف لازم است [۷].

#### ۱-۱-۲- موارد مصرف گاز سنتز:

عمده موارد مصرف گاز سنتز به شرح ذیل است:

۱- تهیه متانول: از آنجایی که متانول به مقدار زیاد در سنتز استیک اسید مصرف می شود، اهمیت فراوانی در صنعت دارد.

۲- تهیه آمونیاک

۳- واکنش های هیدروفرمیل دار کردن: در این نوع واکنش ها از اولفین ها با استفاده از گاز سنتز، آلدئید تولید می شود. این واکنش اکسو سنتز نیز نامیده می شود.

۴- سنتز فیشر- تراپش: در این فرایند گاز سنتز به مولکول های بنزینی در گستره تبدیل می شود. در اصل این واکنش اولیگومریزاسیون منوکسید کربن به وسیله هیدروژن جهت تشکیل محصولات آلی می باشد.

۵- احیای سنگ آهن: جهت احیای سنگ آهن به دست آمده از معادن، از گاز سنتز استفاده می شود در این فرایند آهن یا پودر آن به وسیله احیای مستقیم کانی های آهن به دست می آیند.

<sup>1</sup> - Natural Gas

<sup>2</sup> - Petroleum Residue

<sup>3</sup> - Coal