# فصل نهم

## راکتورهای شیمیایی

**هدف‌های رفتاری:** پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود بتواند :

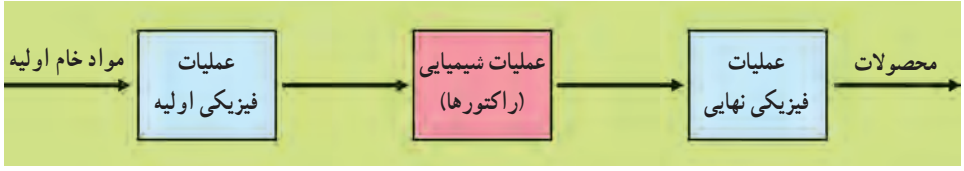
۱ــ راکتور را تعریف کند.

۲ــ جایگاه راکتورها را در یک واحد صنعتی شرح دهد.

۳ــ انواع راکتورها را شرح دهد.

۴ــ اطلاعات موردنیاز و مراحل مختلف طراحی راکتور را شرح دهد.

راکتور[۱] (واکنشگاه) شیمیایی دستگاهی است که در آن واکنش یا واکنش‌های شیمیایی نظیر تبدیل، ترکیب یا تجزیه به منظور تولید مواد موردنظر انجام می‌شود. طبق قرارداد دستگاهی که در آن واکنش سوختن به‌منظور تولید انرژی انجام می‌شود، راکتور نیست. شکل ۹ــ۱ عملیات اصلی در یک واحد صنایع شیمیایی را نشان می‌دهد. مواد خام ابتدا از یک رشته فرآیندهای تغییر فیزیکی اولیه از قبیل جداسازی، مخلوط کردن و ... عبور می‌کنند تا آماده ورود به مرحله بعدی یعنی تغییرات شیمیایی شوند. در این مرحله به کمک راکتور یا راکتورهای مناسب واکنش‌های شیمیایی موردنظر انجام و محصول تهیه می‌شود. به دلیل انجام بعضی از واکنش‌های ناخواسته یا وجود مقداری از مواد خام که در راکتور فرصت انجام واکنش را نداشته و همراه محصول از راکتور خارج شده‌اند، این محصول غالباً قابل عرضه به بازار نمی‌باشد و لازم است عملیات فیزیکی نهایی ازقبیل جداسازی، خالص‌سازی و ... بر روی آن انجام شود. در صنایع شیمیایی، آن بخش از عملیات شیمیایی که در راکتورها صورت می‌گیرد مهم‌ترین و حساس‌ترین عملیات کارخانه محسوب می‌گردد.




**شکل ۹ــ۱ــ بخش‌های اصلی در یک واحد صنعتی شیمیایی**

۱ــ Reactor

## ۹ــ۱ــ تقسیم‌بندی راکتورها

بر اساس دیدگاه‌های متفاوت، تقسیم‌بندی‌های متنوعی برای راکتورهای شیمیایی انجام شده است. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های واکنش‌های شیمیایی تعداد و نوع فازهایی است که واکنش در آن صورت می‌گیرد. بر این مبنا می‌توان راکتورهای شیمیایی را نیز تقسیم‌بندی نمود. این تقسیم‌بندی در زیر آورده شده است :

- راکتورها
  - تک فازی
    - واکنش در فاز گاز انجام می‌شود.
    - واکنش در فاز مایع انجام می‌شود.
  - چند فازی
    - واکنش میان فازهای گاز و مایع انجام می‌شود.
    - واکنش میان دو فاز مایع انجام می‌شود.
    - واکنش میان فازهای سیال[1] و جامد انجام می‌شود.

تقسیم‌بندی دیگر راکتورها بر اساس نوع عملیات آن‌ها است. این تقسیم‌بندی به شکل زیر است :

ــ **راکتورهای ناپیوسته**[2]: مثل راکتور تولید پلی‌کلرید وینیل (PVC) از طریق پلیمر کردن کلرید وینیل.

ــ **راکتورهای پیوسته یا جریان پایدار**[3]: مثل راکتور تولید آمونیاک از طریق واکنش گازهای هیدروژن و نیتروژن.

ــ **راکتورهای نیمه پیوسته**[4]: مثل راکتور هیدروژن‌دار کردن روغن مایع به منظور اشباع آن و تولید روغن جامد.

## ۹ــ۲ــ راکتورهای ناپیوسته

در این راکتورها مواد اولیه به مقدار معین وارد راکتور می‌شود. در زمان مشخص واکنش انجام می‌گیرد و سپس محصول از راکتور تخلیه می‌شود. بدین ترتیب یک دوره کار راکتور که شامل بارگیری، انجام واکنش و تخلیه است پایان می‌پذیرد و راکتور برای انجام واکنش در دوره بعد پاکسازی و آماده‌سازی می‌شود. (شکل ۹ــ۲)

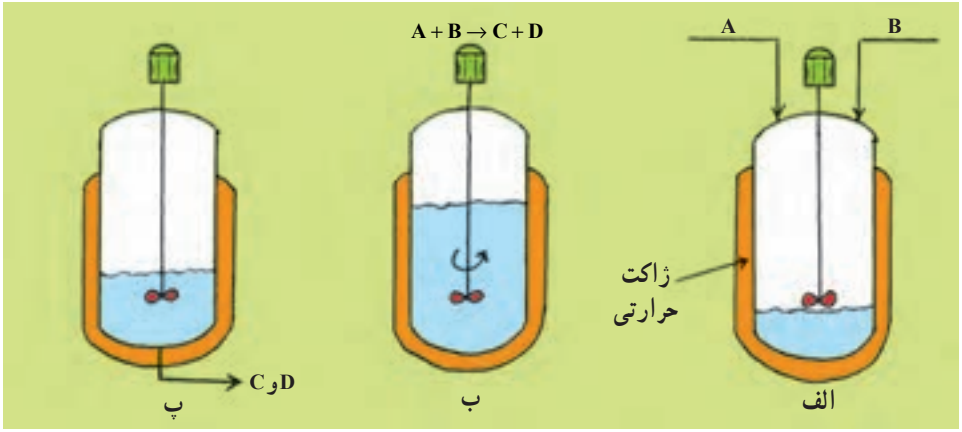
---

۱ــ سیّال منظور مایع یا گاز یا مایع + گاز است.

۲ــ Batch Reactors

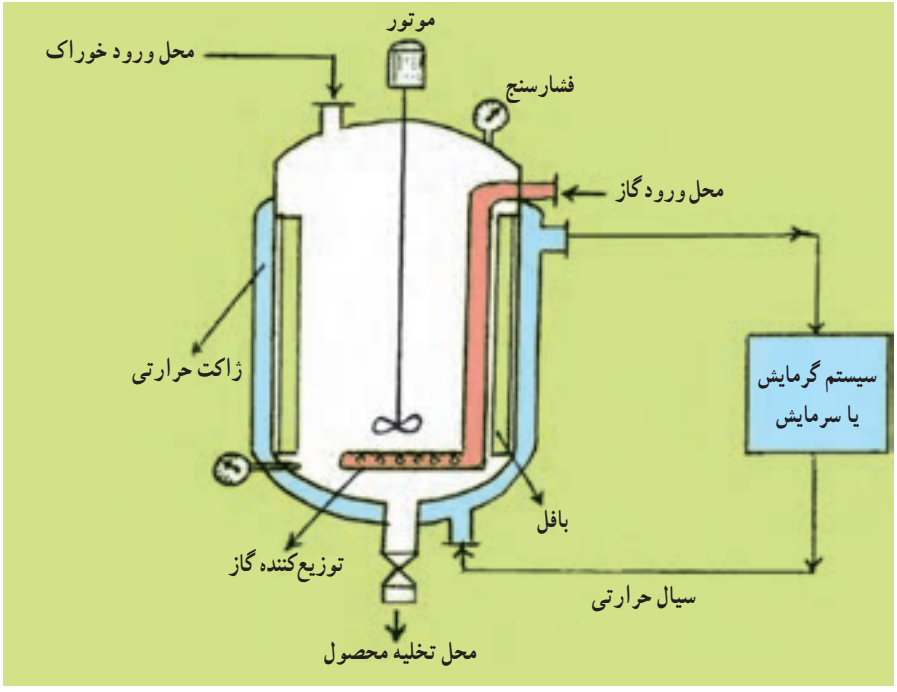
۳ــ Continuous or Steady Flow Reactors

۴ــ Semi Batch Reactors




**شکل ۹ــ۲ــ مراحل مختلف عملیات یک راکتور ناپیوسته. الف ــ بارگیری ب ــ انجام واکنش پ ــ تخلیه**

این نوع راکتورها نسبتاً ساده هستند و احتیاج به وسایل کمکی و سیستم‌های کنترل کمتری دارند. در صنعت از این نوع راکتورها برای انجام واکنش‌های کند، که احتیاج به زمان اقامت زیادی دارند، استفاده می‌شود. مدت اقامت مواد واکنش دهنده در داخل راکتور، که طی آن واکنش‌گرها فرصت انجام واکنش را پیدا می‌کنند، زمان اقامت گویند. یکی دیگر از کاربردهای راکتورهای ناپیوسته هنگامی است که هدف تولید محصول به مقدار کم و مقطعی بوده و دایمی نمی‌باشد. شکل ۹ــ۳ قسمت‌های مختلف یک راکتور ناپیوسته صنعتی را نشان می‌دهد. این راکتورها به‌طور معمول




**شکل ۹ــ۳ــ یک راکتور ناپیوسته صنعتی**

مجهز به موتور و همزن می‌باشند. شکل همزن بسته به نوع سیّال و گرانروی آن متفاوت است. قطر پره همزن بسته به نوع آن معمولاً $\frac{۱}{۳}$ تا $\frac{۱}{۲}$ قطر راکتور است[۱]. این راکتورها غالباً دو جداره می‌باشند. به جداره خارجی این راکتورها، که در آن بسته به گرمازا یا گرماگیر بودن واکنش سیّال سرد یا گرم عبور داده می‌شود، ژاکت حرارتی گویند. سیالی که در داخل یک سیکل بسته جریان دارد و فضای داخل ژاکت را پر می‌کند، می‌تواند آب سرد (جهت سرمایش) یا بخار آب (جهت گرمایش) یا روغن (برای هر دو منظور) باشد. معمولاً تعداد ۴ تیغه عمودی در جداره داخلی راکتور نصب می‌شود. این تیغه‌ها بافل[۲] نام دارند و باعث می‌شوند به هنگام چرخش پره‌های همزن، در مقابل حرکت دورانی سیّال مانع ایجاد شده، آشفتگی شدیدی به‌وجود آمده، اختلاط به نحو مطلوب انجام شود. ارتفاع بافل باید به گونه‌ای باشد که از سطح مایع (که معمولاً $\frac{۲}{۳}$ حجم راکتور را پر می‌کند) بالاتر باشد.

## ۹ــ۳ــ راکتورهای پیوسته

در این نوع راکتورها، مواد اولیه به‌طور دایم وارد راکتور می‌شود و پس از انجام واکنش محصول، پیوسته از راکتور خارج می‌شود. این گونه راکتورها هنگامی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند که هدف تولید مقدار زیادی محصول به‌طور دایم باشد در ضمن راکتورهای پیوسته برای انجام واکنش‌های سریع مناسب‌تر می‌باشند.

این نوع راکتورها نیاز به سیستم‌های کمکی و کنترلی متنوع‌تر و دقیق‌تر دارند. به کمک سیستم‌های کنترل دما، فشار، غلظت و ... تولید محصول با کیفیت بهتر امکان‌پذیر می‌شود. از این راکتورها در بسیاری از صنایع شیمیایی، به خصوص صنایع نفت، گاز و پتروشیمی استفاده می‌شود. راکتورهای پیوسته به دو شکل راکتورهای لوله‌ای[۳] و راکتورهای تانکی[۴] ساخته می‌شوند. شکل ۹ــ۴ این دو نوع راکتور را نشان می‌دهد. در شرایط ایده‌آل، در راکتور لوله‌ای، ذرات مسیر مستقیم را طی می‌کنند و واکنش در غیاب همزن انجام می‌شود. ولی در راکتور تانکی، مواد در داخل راکتور کاملاً هم‌زده و مخلوط می‌شوند. یکی از کاربردهای مهم راکتورهای لوله‌ای انجام واکنش‌های ناهمگن در حضور کاتالیزگر جامد می‌باشد. زمان اقامت برای راکتورهای پیوسته (جریان پایدار) از رابطه زیر محاسبه می‌شود :

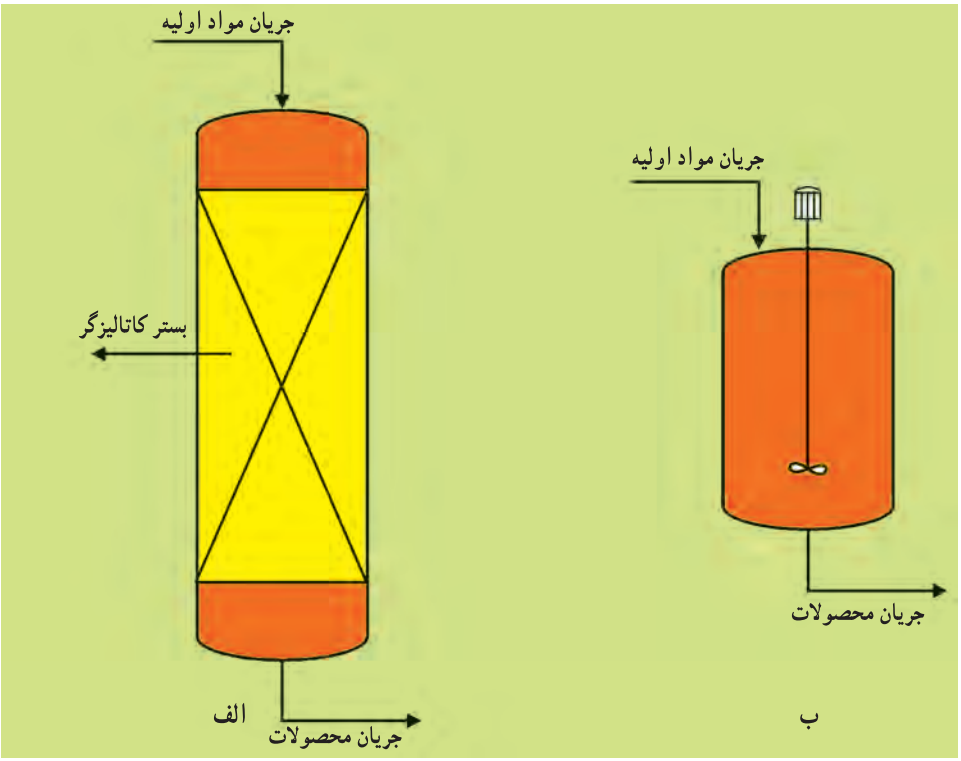
$$\text{زمان اقامت} = \frac{\text{حجم راکتور} \quad (m^3)}{\text{دبی حجمی[۵] خوراک} \quad (m^3/h)}$$

---

۱ــ در خصوص انواع همزن‌ها در فصل بعد توضیح داده شده است.

۲ــ Baffel ۳ــ Plug Flow Reactor ۴ــ Mixed Flow Reactor

۵ــ Volumetric Flow Rate




شکل ۹ــ۴ــ دو نوع راکتور پیوسته الف ــ لوله‌ای (با بستر کاتالیزگر) ب ــ تانکی

**مثال ۱ــ** جرم مخصوص خوراک یک راکتور جریان پایدار لوله‌ای به قطر ۱m و ارتفاع ۵m برابر $۱۰۰۰ kg/m^۳$ می‌باشد. اگر سرعت جریان جرمی خوراک ۵۰۰kg/min باشد، زمان اقامت مواد در داخل راکتور را به‌دست آورید.

**حل:**

$$D = ۱m$$

$$h = ۵m$$

$$\rho = ۱۰۰۰ kg/m^۳$$

$$\dot{m} = ۵۰۰ kg/min$$

$$\text{سرعت جریان حجمی خوراک} = \dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \Rightarrow \dot{V} = \frac{۵۰۰ kg/min}{۱۰۰۰ kg/m^۳} = ۰/۵ m^۳/min$$

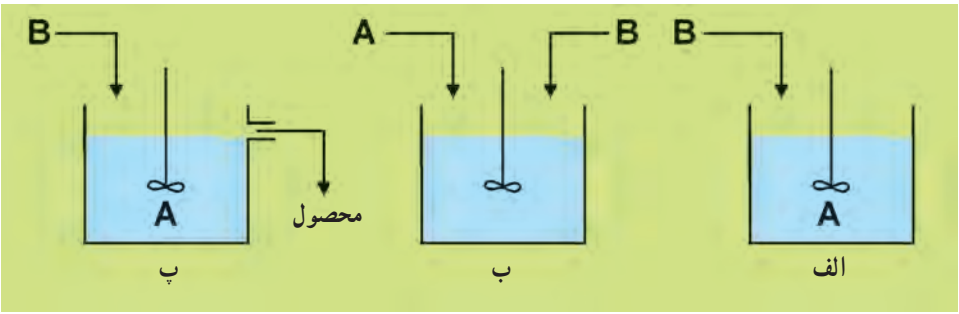
$$\text{حجم راکتور} = V = \frac{\pi D^۲}{۴} \times L = \frac{۳/۱۴ \times (۱)^۲}{۴} \times ۵ = ۳/۹۲۵ m^۳$$

$$\text{زمان اقامت} = t = \frac{۳/۹۲۵ m^۳}{۰/۵ m^۳/min} = ۷/۸۵ min$$

یعنی به‌طور متوسط ۷ دقیقه و ۵۱ ثانیه طول می‌کشد تا ذرات از داخل راکتور عبور کنند.

## ۹ــ۴ــ راکتورهای نیمه پیوسته

این نوع راکتورها دارای انواع متنوعی هستند که سه نوع آن‌ها در شکل ۹ــ۵ نشان داده شده است. در نوع متداول آن (الف) یکی ازمواد اولیه ابتدا در داخل راکتور بارگیری و سپس به تدریج ماده یا مواد اولیه دیگر به آن اضافه می‌شود. شکل (ب) نوع دیگری از راکتورهای نیمه‌ــ پیوسته را نشان می‌دهد که مواد اولیه به‌طور همزمان به راکتور وارد می‌شود ولی تا پایان واکنش هیچ ماده‌ای از راکتور خارج نمی‌شود. در شکل (پ) نیز یکی از مواد اولیه در داخل راکتور بارگیری شده است و ماده اولیه دیگر به تدریج به آن اضافه می‌گردد و همزمان با آن محصول نیز از راکتور خارج می‌شود.




شکل ۹ــ ۵ ــ انواع راکتورهای نیمه پیوسته

## ۹ــ۵ــ طراحی راکتور

یک راکتور باید به نحوی عمل کند که محیط مناسب جهت انجام واکنش را فراهم نماید. منظور از محیط مناسب محیطی است که شرایط موردنیاز واکنش نظیر دما، فشار، غلظت، زمان اقامت و چگونگی حرکت سیالات به نحوی باشد که محصول موردنظر با بهترین کیفیت ممکن و بیشترین بازده به‌دست آید. جهت دستیابی به این هدف لازم است در طراحی و انتخاب راکتورهای موردنظر، اطلاعات، دانش و تجربه در زمینه‌های زیر را به‌کار گرفت.

ــ **ترمودینامیک:** وضعیت واکنش ازنظر رسیدن به نقطه تعادل و گرمای واکنش را مشخص می‌کند.

ــ **سینتیک:** سرعت و نحوه انجام[۱] واکنش را تعیین می‌کند.

ــ **مکانیک سیالات:** با توجه به اطلاعات سینتیکی و ترمودینامیکی، سرعت و نحوه حرکت سیالات در داخل راکتور را مشخص می‌کند.

ــ **انتقال حرارت:** چگونگی گرم کردن یا سردکردن راکتور را تعیین می‌کند.

---

۱ــ Mechanism

**ـ انتقال جرم:** با توجه به اطلاعات سینتیکی و ترمودینامیکی روش اختلاط مواد و جداسازی مخلوط‌ها را مشخص می‌کند.

**ـ اقتصاد:** با استفاده از زمینه‌های فوق‌الذکر، در نهایت طراحی راکتور باید به نحوی انجام شود که واحد صنعتی بیشترین سوددهی را داشته باشد.

اصولاً مهم‌ترین عامل در طراحی یک واحد صنعتی، توجه به مسایل اقتصادی است. بدین معنی که طراحی قسمت‌های مختلف یک کارخانه باید به گونه‌ای انجام شود که هزینه‌های ساخت و عملیات آن حداقل و مرغوبیت و در نتیجه قیمت محصول آن حداکثر باشد. بنابراین طراحی راکتور یا راکتورهای یک واحد صنعتی مستقل از بخش‌های عملیات فیزیکی مفید نخواهد بود. به عبارت دیگر در یک طرح اقتصادی تنها هزینه‌های مربوط به راکتور شیمیایی نیست که باید به حداقل برسد، زیرا ممکن است بتوان هزینه راکتور را کاهش داد ولی این امر باعث افزایش هزینه‌های جداسازی ناخالصی‌های همراه محصول گردد و در مجموع باعث افزایش هزینه‌های عملیات کل کارخانه شود. بنابراین در یک واحد صنعتی باید تمامی دستگاه‌ها ازجمله راکتورها را به‌گونه‌ای طراحی نمود که سوددهی آن واحد حداکثر شود. طراحی راکتور در واقع مرحله اصلی طراحی یک فرآیند شیمیایی است.

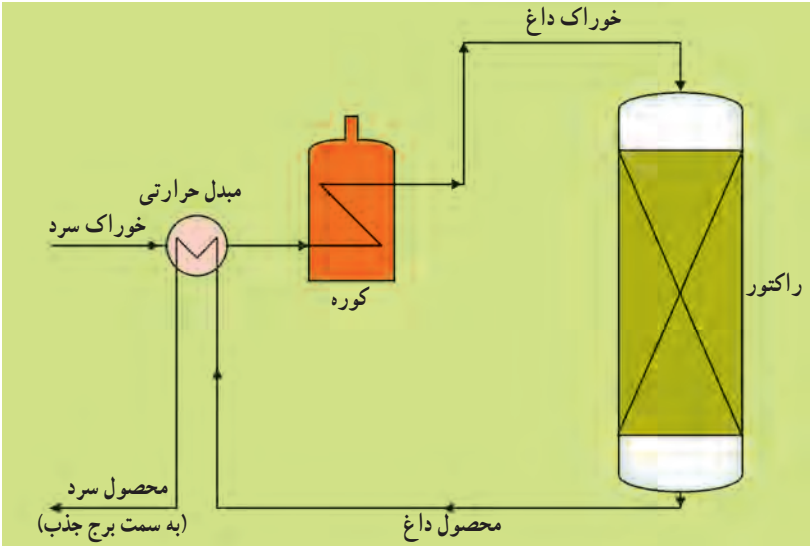
پس از طراحی راکتور، نوبت به طراحی سیستم‌های جداسازی (عملیات فیزیکی اولیه و نهایی) می‌رسد. در این مرحله دستگاه‌هایی نظیر برج جذب، برج تقطیر، فیلتر، کریستالیزور، خشک‌کن، و ... طراحی می‌شوند، در پایان این مرحله دمای عملیاتی کلّیه دستگاه‌ها از جمله راکتور مشخص شده است و این آمادگی به‌وجود آمده است تا مرحله سوم طراحی، یعنی طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی انجام شود. این طراحی باید به‌گونه‌ای انجام شود که اتلاف انرژی به حداقل برسد. برای مثال اگر خروجی راکتور گرم باشد و بخواهیم آن را سرد کرده به برج جذب بفرستیم و ورودی راکتور سرد باشد و بخواهیم آن را گرم کنیم، این دو جریان را وارد یک مبدل حرارتی می‌نماییم تا با یکدیگر تبادل حرارت نموده از اتلاف انرژی جلوگیری شود. شکل **۹ـ۶** این طرح را نشان می‌دهد. البته باید توجه داشت که ورودی راکتور همچنان نیاز به کوره جهت رسیدن به دمای موردنظر را دارد، امّا با عبور از مبدل حرارتی، از بار حرارتی کوره کاسته می‌شود.

آخرین مرحله طراحی مربوط به طراحی سیستم‌های سرمایش و گرمایش می‌باشد. معمولاً برج‌های خنک کننده یا چیلرها جهت سرمایش و دیگ‌های تولید بخار یا کوره‌های روغن داغ جهت گرمایش به‌کار می‌روند. این‌گونه تجهیزات را تسهیلات جانبی[1] می‌نامند. مراحل مختلف طراحی یک فرآیند شیمیایی که به الگوی پوست‌پیازی معروف است در شکل **۹ـ۷** نشان داده شده است.

---

۱ـ Utilities

در کلیه مراحل طراحی یک فرآیند، مهندسین شیمی نقش اصلی را دارند، اما طراحی راکتورها مبحثی است که با توجه به اطلاعات مورد نیاز تنها در حیطه فعالیت مهندسین شیمی می‌باشد و شاید بتوان گفت تنها زمینه‌ای است که مهندسی شیمی را به‌عنوان رشته جداگانه‌ای از رشته‌های مهندسی توجیه می‌نماید.




شکل ۹ــ۶ــ نمونه‌ای از طراحی شبکه مبدل حرارتی به منظور جلوگیری از اتلاف انرژی

شکل ۹ــ۷ــ مراحل مختلف طراحی یک فرآیند (الگوی پوست پیازی)

## خودآزمایی

۱ــ راکتور شیمیایی را تعریف کنید و با رسم شکل، بخش‌های اصلی یک کارخانه شیمیایی و موقعیت راکتور در آن را شرح دهید.

۲ــ انواع مهم راکتورهای شیمیایی را فقط نام ببرید. الف) بر اساس فاز مواد واکنش دهنده، ب) بر اساس نوع عملیات.

۳ــ مراحل مختلف عملیاتی در یک راکتور ناپیوسته را نام ببرید، دو کاربرد این نوع راکتورها را بنویسید.

۴ــ دو نوع راکتور پیوسته (جریان پایدار) را نام ببرید. تفاوت آن‌ها را بیان کنید و دو کاربرد راکتورهای پیوسته را بنویسید.

۵ ــ سه نوع از راکتورهای نیمه پیوسته را با رسم شکل شرح دهید.

۶ ــ شش زمینه علمی و مهندسی که در طراحی راکتور به‌کار می‌روند را نام ببرید و بگویید در هر مورد چه موضوعاتی مشخص می‌گردد؟

۷ــ در هر مورد نوع راکتور را ازنظر **فاز** و **عملیات** مشخص کنید :

الف) گاز کلر از داخل اسید استیک مایع در دمای C ۸۰ عبور می‌کند و در حضور کاتالیزگر انیدرید استیک (مایع)، منوکلرواستیک اسید (مایع) تولید می‌شود. در صورتی که بخشی از گاز کلر واکنش انجام ندهد و از بالای راکتور خارج شود آن را به مخازن محتوی سود هدایت می‌نمایند تا جذب آن گردد.

ب) جهت تولید گاز سنتز (مخلوط CO و $H_2$) گاز متان با بخار آب در دمای بالا از روی نوعی کاتالیزگر عبور داده می‌شود.

ج) وینیل‌کلرید را به همراه کاتالیزگر مناسب مایع وارد راکتور پلیمریزاسیون می‌نماییم سپس با تنظیم دما و فشار موردنظر، زمان لازم جهت انجام واکنش پلیمریزاسیون را به آن می‌دهیم.

۸ ــ نحوه عملکرد راکتور را در دو جمله توضیح دهید.