# راکتور
# Reactor

## 1-1- شرح وتوصیف

راکتور یک ظرف یا محفظه با شکل‌های مختلف می‌باشد که در آن واکنش شیمیایی صورت می گیرد و در آن مواد ورودی به محصولات تبدیل می‌شوند: که به دو دسته پلیمری و غیرپلیمری تقسیم می‌شوند.

واکنش‌های شیمیایی که در داخل راکتور صورت می گیرند به دو دسته کلی متجانس(Homogenous) و نامتجانس (Heterogeneous)تقسیم‌بندی می‌شوند. واکنش‌های متجانس واکنش‌هایی هستند که در آن تمام ترکیب‌شوندگان در یک فاز که ممکن است گاز، مایع و یا جامد باشد، موجود هستند. همچنین در صورتیکه واکنش کاتالیزوری باشد، کاتالیزور هم بایستی در همان فاز وجود داشته باشد. واکنش‌های نامتجانس، واکنش‌هایی هستند که برای انجام آنها حداقل دو فاز لازم باشد.

متغیرهای زیادی سرعت واکنش را تغییر می‌دهند، در سیستم‌های متجانس، دما، فشار و غلظت متغیرهای واضحی هستند. در سیستم‌های نامتجانس به دلیل آنکه بیش از یک فاز وجود دارد و در طول واکنش مواد بایستی از یک فاز به فاز دیگر متصل شوند، علاوه بر دما، فشار و غلظت، سرعت انتقال جرم و سرعت انتقال حرارت نیز اهمیت دارد.

## 1-2- انواع راکتور

راکتورها از لحاظ عملکردشان به گروههای ریز تقسیم بندی می شوند:

### 1-2-1- راکتورهای ناپیوسته (Batch)

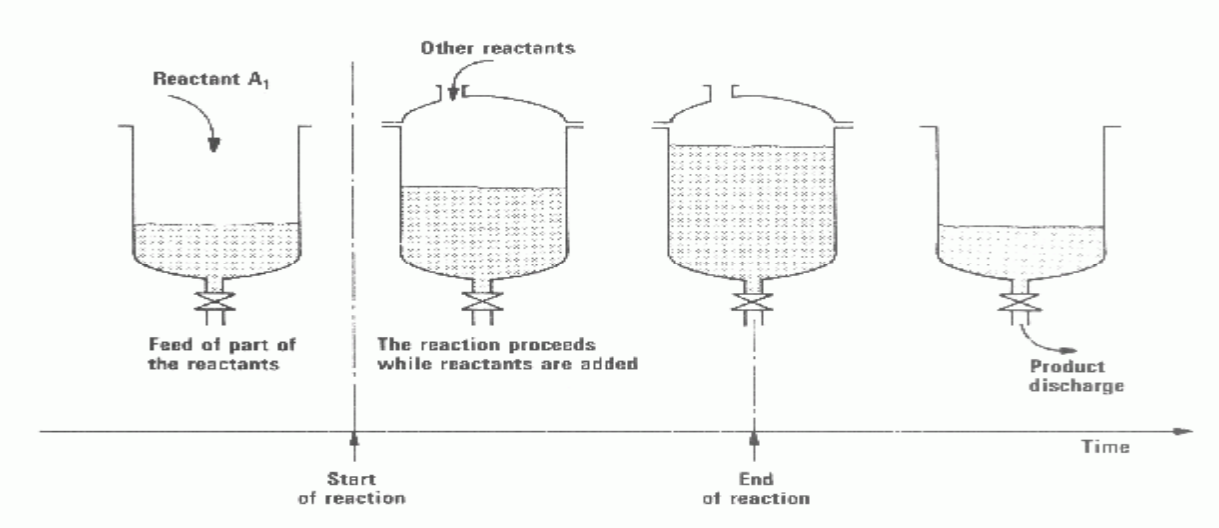
از دیدگاه تاریخی، راکتورهای ناپیوسته از آغاز صنعت شیمیایی مورد استفاده بوده و هنوز هم به صورت وسیعی در تولید مواد شیمیایی با ارزش افزودنی بالا مورد استفاده می‌باشند.

در این راکتورها مواد واکنش‌دهنده در همان ابتدای عمل وارد راکتور می‌شوند. محتویات راکتور برای مدت مشخصی کاملاً مخلوط شده و پس از مدت زمان معینی که واکنش پیشرفت کرد، محتویات داخل راکتور تخلیه می‌شوند. در این راکتورها غلظت در طول زمان تغییر می کند اما اختلاط کامل باعث می‌شود که در هر لحظه درجه حرارت و ترکیب در سرتاسر راکتور یکنواخت باشد(شکل 1-1).

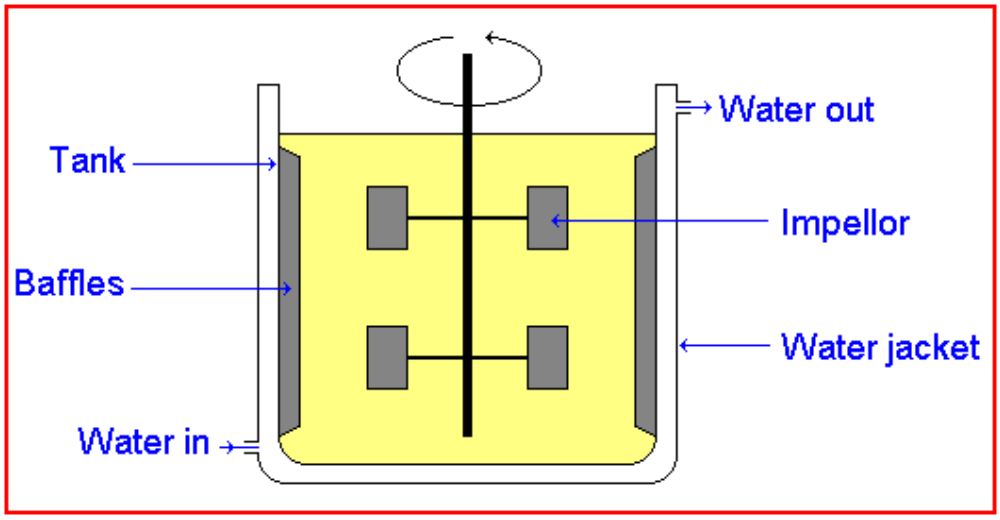
این راکتورها در موارد زیر بکار برده می‌شوند.

- تولید در مقیاس کوچک صنعتی(ظرفیت کم)
- آزمایش کردن فرایندهای ناشناخته
- تولید صنعتی محصولات گران‌قیمت
- برای محصولاتی که تولید آنها در شرایط مداوم مشکل باشد

امتیاز این راکتورها در این است که با دادن زمان لازم برای انجام واکنش، مواد اولیه با درصد تبدیل بالا به محصولات مورد نظر تبدیل می گردند و احتیاج به وسایل اضافی و کمکی کمتری دارند.

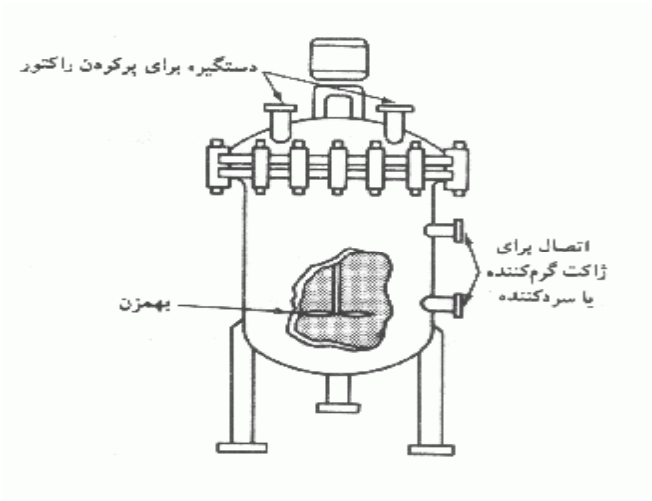



شکل 1-1- مراحل کارکرد راکتور ناپیوسته




شکل 1-2- راکتور ناپیوسته

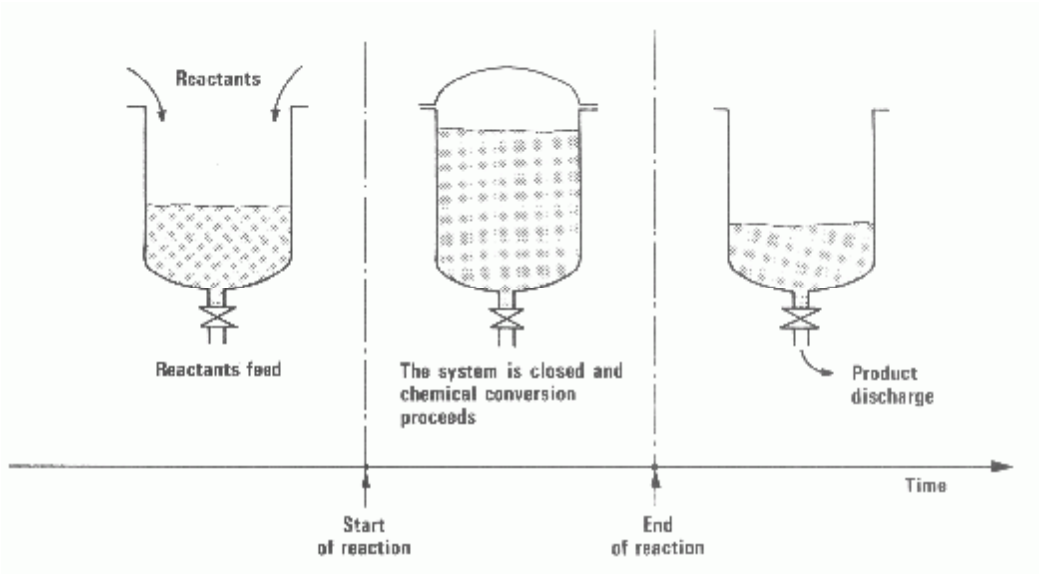
در حالیکه استفاده از این نوع راکتورها محدود به واکنش‌های متجانس فاز مایع می‌باشد. از دیگر محدودیت‌های این نوع راکتورها بالا بودن هزینه تولید در واحد حجم محصول تولید شده می‌باشد (به دلیل بالا بودن زمان سیکل و زمان تخلیه و شستشو). همچنین تولید صنعتی در مقیاس بالا در اینگونه راکتورها مشکل می‌باشد(شکلهای 1-2و1-3).



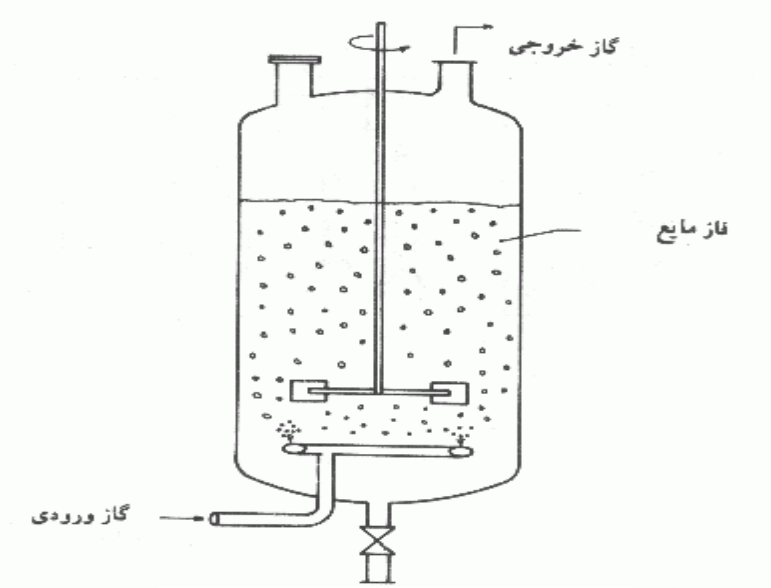
شکل 1-3- راکتور ناپیوسته

## 1-2-2- راکتورهای نیمه‌پیوسته (Semi Batch)

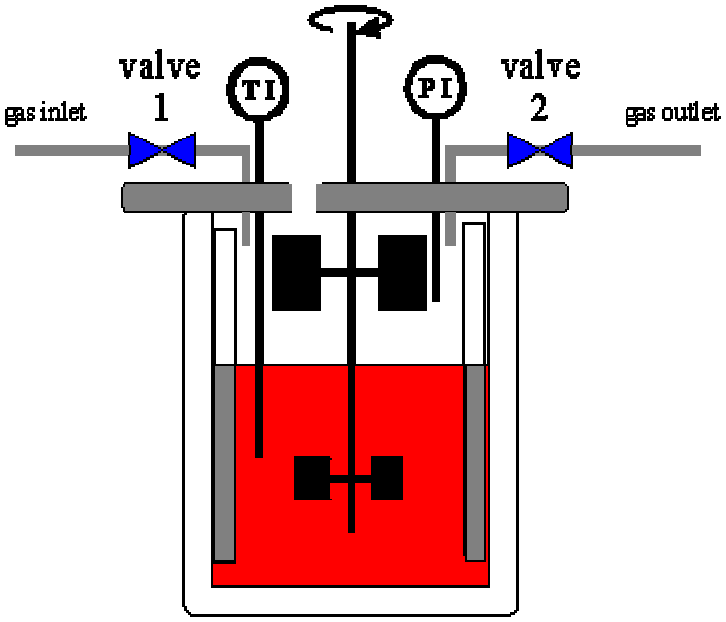
راکتورهای نیمه‌پیوسته نیز همان محدودیت‌های راکتور ناپیوسته را دارد. از امتیازات راکتورهای نیمه‌پیوسته کنترل خوب حرارت و کنترل واکنش‌های نامطلوب و محدود کردن تولید محصولات ناخواسته می‌باشد. این عمل از طریق وارد کردن تدریجی یکی از اجزاء ترکیب‌شونده با غلظت کم میسر می‌گردد. راکتورهای نیمه‌پیوسته اغلب برای واکنش‌های دوفازی که یکی از اجزاء ترکیب‌شونده گاز باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد و جزء گازی به صورت حباب به داخل فاز مایع درون راکتور تغذیه می‌گردد(شکل 1-4).




شکل 1-4- مراحل کارکرد یک راکتور ناپیوسته



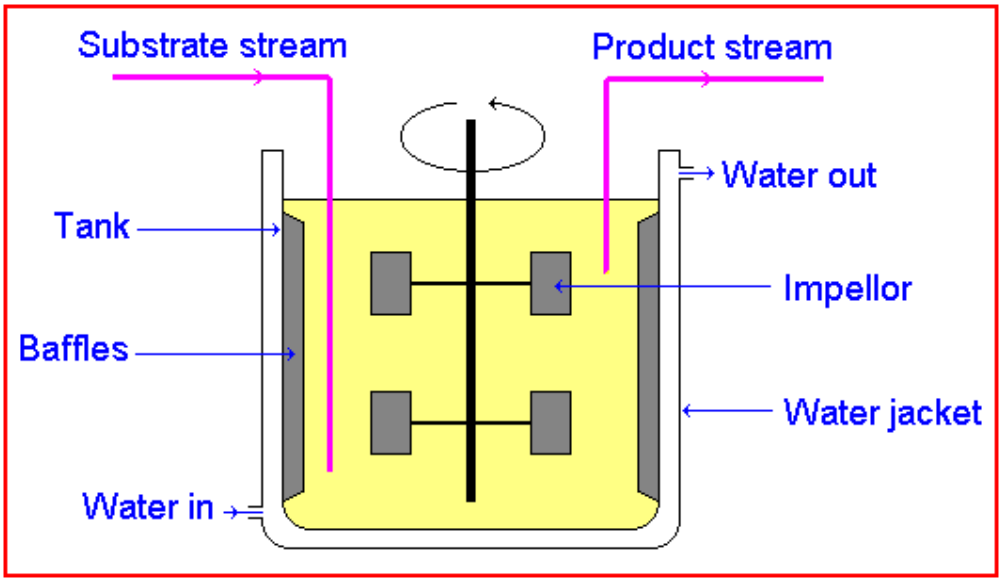

شکل 1-5- راکتور نیمه پیوسته




شکل 1-6- راکتور نیمه پیوسته

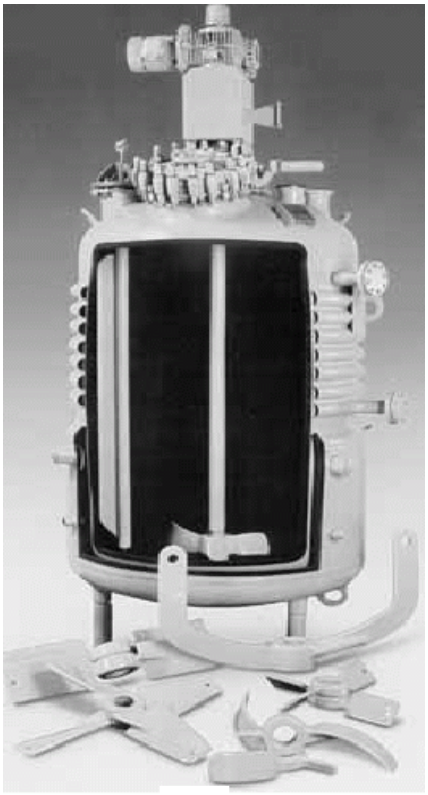
### 1-2-3- راکتورهای مخلوط‌شونده(CSTR)

در این راکتور همان طور در شکل 1-7 مشخص شده است مواد اولیه وارد راکتور می‌شوند و پس از اختلاط در راکتور و اقامت برای مدت‌زمان مشخصی در راکتور، از راکتور خارج می‌شوند.




شکل 1-7- راکتور مخلوط شونده

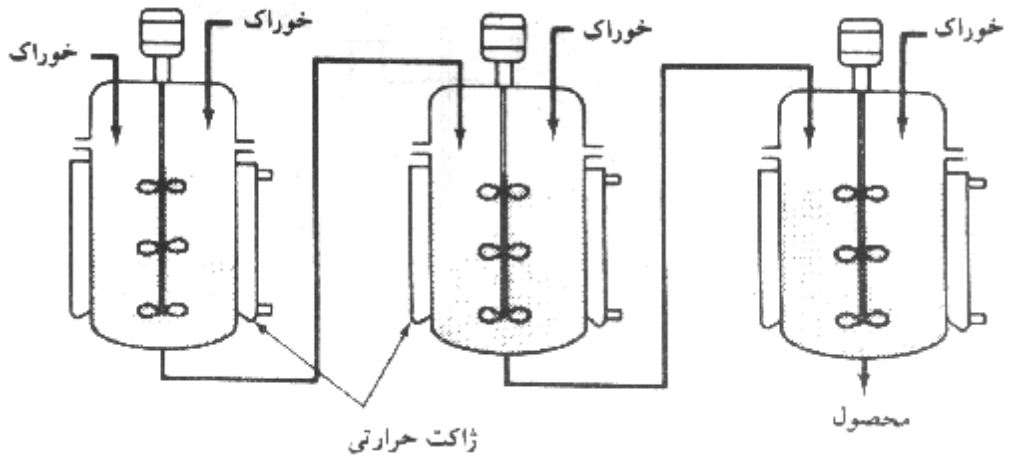
الف



ب

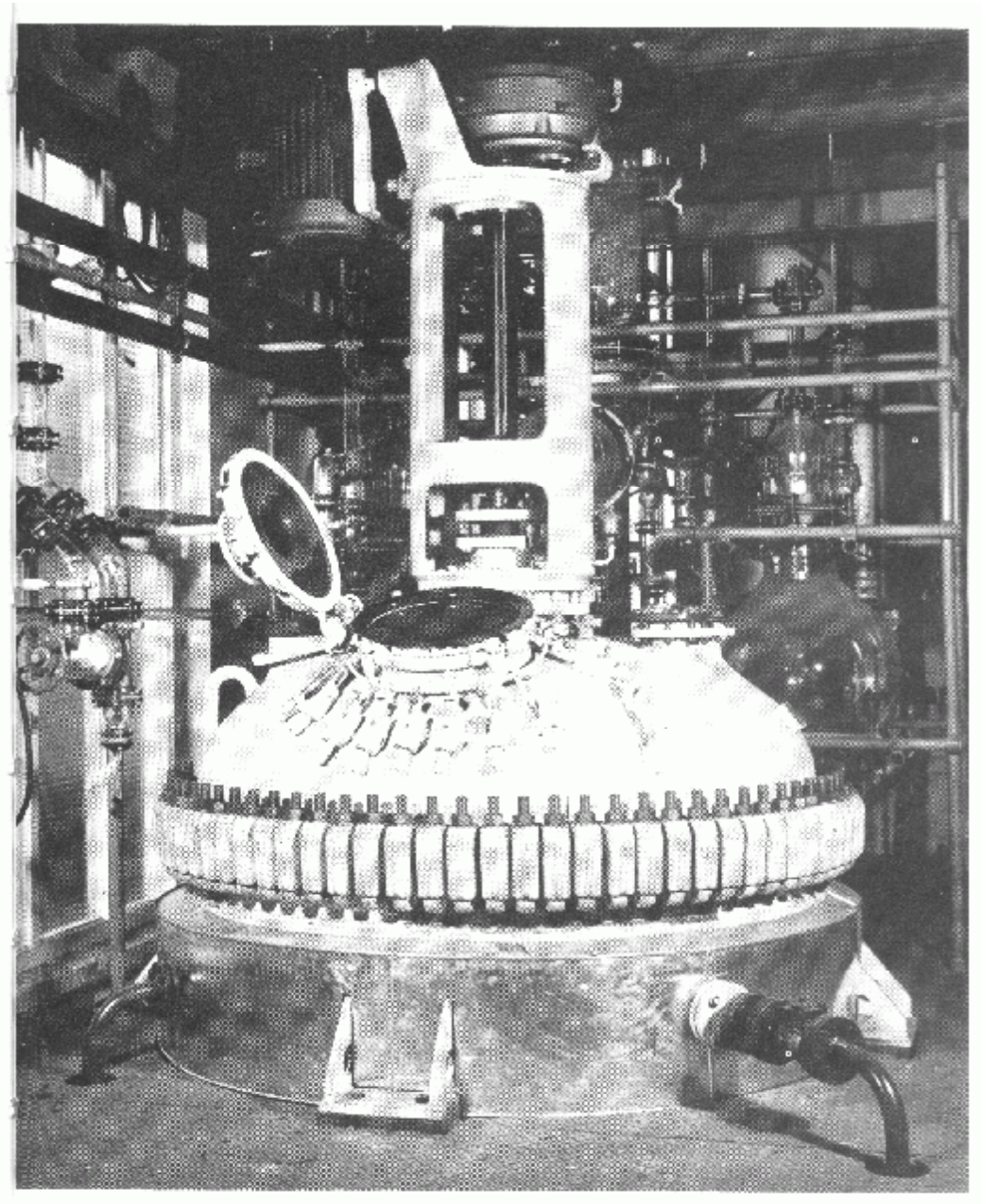
شکل 1-8- راکتور مخلوط شونده
الف. تصویری از راکتور در عملیات
ب. نمایی از داخل راکتور مخلوط شونده مشتمل بر انواع پره‌ها و بافل و سیستم سرمایش و گرمایش

این راکتور زمانی که یک واکنش شیمیایی احتیاج به همزدن شدید داشته باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل حرارت در این راکتورها به آسانی انجام می‌گیرد. یکی از محدودیت‌های این نوع راکتورها درصد تبدیل پایینتر آنها در واحد حجم محصول تولید در مقایسه با سایر راکتورهای پیوسته باز می‌باشد. به همین دلیل حجم راکتور مذکور را باید خیلی بزرگ انتخاب کرد تا به درصد تبدیل بالا دست یافت. در صنعت معمولاً از یک سری راکتور مخلوط‌شونده پشت سر هم استفاده می‌شود(شکل 1-9).




شکل 1-9- سری راکتور مخلوط شونده

شکل 1-10- سری راکتور مخلوط شونده



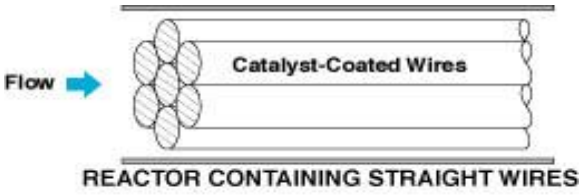
شکل 1-11- تصویری از قسمت فوقانی یک راکتور مخلوط شونده

راکتورهای Mixed برای اغلب واکنش‌های متجانس در فاز مایع استفاده می‌شود. در این راکتورها، جریان خوراک و محصول پیوسته است و فرض می‌شود که محتویات راکتور کاملاً بهم می‌خورد. این عمل منجر به یکنواختی درجه حرارت و ترکیب در راکتور می‌شود. به علت این اختلاط یک جزء سیال ممکن است در همان لحظه‌ای که وارد راکتور می‌شود آنرا ترک کند یا برای مدت‌زمان زیادی در داخل راکتور باقی بماند. زمان اقامت هرکدام از اجزاء سیال در راکتور متفاوت است.

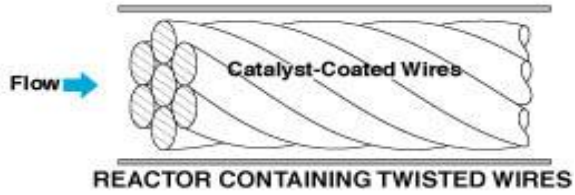
## 1-2-4- راکتورهای لوله‌ای و (Tubular Plug)

در صنایع شیمیایی برای فرایندهای با مقیاس بزرگ معمولاً از راکتورهای لوله‌ای استفاده می‌شود. زیرا نگهداری سیستم راکتورهای لوله‌ای آسان می‌باشد (چون دارای قسمت‌های متحرک نیستند) و معمولاً بالاترین درصد تبدیل مواد اولیه در واحد حجم راکتور را در مقایسه با سایر راکتورهای سیستم جاری دارا هستند(شکل 1-12).

الف

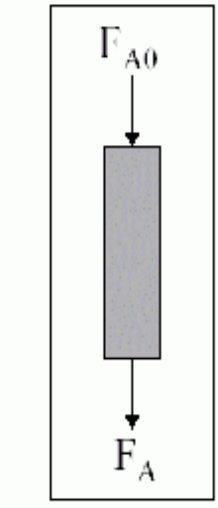



ب



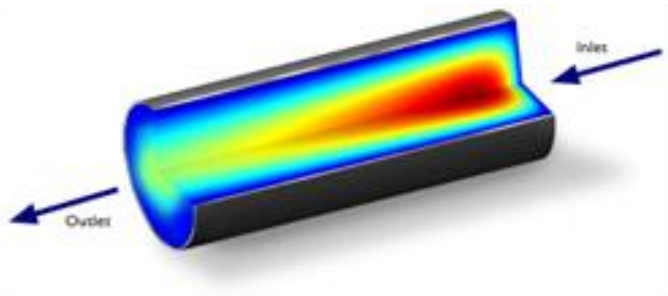

ج

شکل 1-12- نماهایی از راکتور



شکل 1-13- راکتور لوله ای

از محدودیت‌های این راکتورها مشکل کنترل حرارتی برای واکنش‌های گرمازایی است که بسیار سریع عمل می‌کنند و نهایتاً منجر به نقاط داغ Hot Spot می‌گردند.شکل 1-14 یک راکتور لوله‌ای همراه سیستم سرمایشی می‌باشدکه به علت سرعت زیاد واکنش،با وجود خنک شدن، در مرکز آن نقاط داغ Hot Spot بوجود آمده است. نقاط داغ Hot Spot باعث می‌شوند که کیفیت محصول کاهش یابد و دستگاه آسیب ببیند.




شکل 1-14- نمایش نقاط داغ در یک راکتور لوله‌ای

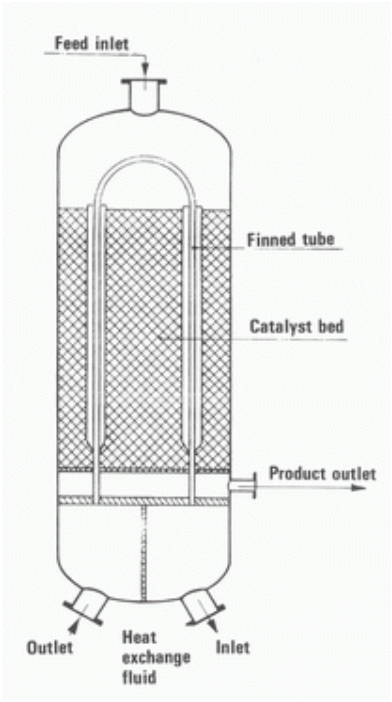
اغلب واکنش‌های متجانس گازی در این نوع راکتورها انجام می‌گیرند.

در این راکتورها نیز مانند راکتورهای Batch زمان اقامت برای تمام اجزاء سیال مساوی است. سیستم متشکل از تعدادی واحدهای سری از راکتورهای مخلوط شونده Mixed، عملکردی مشابه با یک راکتور لوله‌ای دارد. هرچقدر واحدهای پشت سر هم بیشتر باشد، خواص سیستم به حالت لوله‌ای نزدیکتر است.

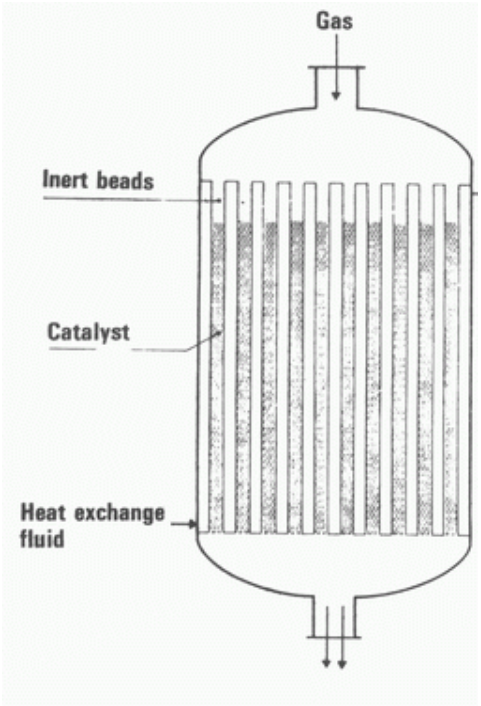
### 1-2-5- راکتورهای بستر ثابت Fixed Bed Reactor

راکتورهای بستر ثابت در واقع همان راکتورهای لوله‌ای پر شده از دانه‌های جامد کاتالیزور هستند. واکنش‌های غیر متجانس از نوع گازی و کاتالیزوری دراین نوع راکتورها انجام می‌گیرد. از معایب این نوع راکتورها مشکل کنترل حرارتی و مشکل جایگزینی کاتالیزور بعد از غیر فعال شدن آن می‌باشد.

همچنین بعضی اوقات پدیده کانالیزه شدن مواد گازی در حین عبور از درون راکتور باعث کاهش زمان اقامت لازم برای انجام واکنش می‌شود که این خود یکی دیگر از محدودیت‌های این نوع راکتور می‌باشد. امتیاز این نوع راکتورها، درصد تبدیل بالای آن در واحد وزن کاتالیزور مصرف شده در مقایسه با سایر راکتورهای کاتالیزوری می‌باشد. از دیگر مزایای این راکتور قیمت پایین‌تر آن نسبت به راکتورهای مشابه مخصوصاً راکتور بستر سیال می‌باشد(شکلهای 1-15و1-16 ).



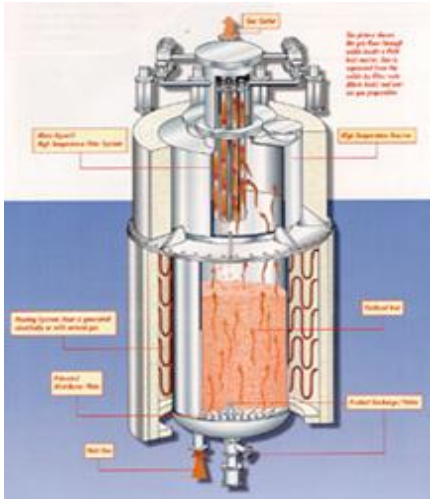

شکل 1-16- راکتور بستر ثابت Fixed Bed Reactor




شکل 1-15- راکتور بستر ثابت Fixed Bed Reactor

### 1-2-6- راکتورهای بستر سیال (Fluidized Bed Reactor)

نوع دیگری از راکتورهای کاتالیزوری، راکتور بستر سیال می‌باشد. در راکتور بستر سیال همانند راکتور مخلوط‌شونده، محتویات داخل راکتور اگرچه غیر متجانس می‌باشند ولی به خوبی با یکدیگر مخلوط شده و باعث توزیع یکنواخت دما در تمام نقاط راکتور می‌گردند. به دلیل توزیع مناسب حرارت در داخل این راکتورها مشکل نقاط داغ وجود ندارد. به دلیل ظرفیت بالا و کنترل حرارت خوب، این نوع راکتورها، کاربرد صنعتی



شکل 1-17- راکتور بستر سیال Fluidized Bed Reactor

زیادی پیدا کرده‌اند. از امتیازات برجسته این راکتورها سهولت احیا و جایگزین کردن کاتالیزور می‌باشد(شکل 1-17).

### 1-2-6-1- مزایا و معایب بسترهای سیال برای عملیات صنعتی

مزایا عبارتند از:

1- جریان ملایم و مایع‌مانندِ ذرات اجازه می‌دهد که عملیات به صورت اتوماتیک و به طور ساده کنترل شود.

2- مخلوط شدن سریع جامدات باعث ایجاد شرایط یکنواخت و جلوگیری از ایجاد نقاط داغ و سادگی و اطمینان کنترل می‌شود.

3- در مقابل تغییرات سریع به آرامی عملکرد نشان می‌دهد.

4- گردش ذرات جامد بین دو بستر سیال امکان برداشت (یا اضافه) کردن مقدار زیاد حرارت تولید شده (یا مورد نیاز) راکتورهای بزرگ را فراهم می‌کند.

5- برای عملیات در مقیاس بزرگ مناسب هستند.

6- در مقایسه با سایر روش‌های تماس، سرعت انتقال جرم و حرارت بالاست.

7- شدت انتقال حرارت بالا می‌باشد، در نتیجه سطح انتقال حرارت نسبتاً کمتری نیاز است.

معایبشان عبارتند از:

1- برای بسترهای حبابی شامل ذرات ریز، نحوه جریان گاز و انحراف از حالت ایده‌آل باعث بهره پایین تماس می‌گردد.

2- زمان اقامت دانه‌های جامد کاتالیست متفاوت است. این موضوع به علت مخلوط شدن ذرات در بستر و خروج تصادفی آنها می‌باشد. این موضوع باعث فراوری غیر یکنواخت کاتالیست در احیاکننده می‌شود که نتیجه آن کم شدن بهره عملکرد است.

3- ذرات شکننده، خرد شده و توسط گاز به بیرون حمل می‌شوند که بایستی جایگزین شوند.

4- خوردگی لوله‌ها و ظروف به وسیله اصطکاک با ذرات می‌تواند جدی باشد.

مزایای اقتصادی قابل توجه بستر سیال عامل اصلی استفاده موفقیت‌آمیزِ این دستگاه در صنعت می‌باشد. اما چنین موفقیتی بستگی به شناخت و فائق آمدن بر معایبشان دارد.

## 1-3- عملکرد راکتور

برای راکتورها، سه پارامتر مهم جهت توصیف عملکرد راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- درصد تبدیل Conversion: نسبت مقدار مواد واکنش‌دهنده مصرفی در راکتور به مقدار مواد واکنش‌دهنده‌ای به راکتور تغذیه می‌باشد. اگر واکنش برگشت‌پذیر باشد، حداکثر درصد تبدیلی که به آن می‌توان رسید درصد تبدیل تعادلی نامیده می‌شود.
- انتخاب‌پذیری Selectivity: نسبت مقدار محصول مطلوب تولید شده به مقدار مواد واکنش‌دهنده مصرفی در راکتور می‌باشد.
- بازده راکتورYield: مقدار محصول مطلوب تولید شده به مقدار مواد واکنش دهنده‌ای که به راکتور تغذیه می‌شود.

حال به بررسی متغیرهای مهمی که بر عملکرد راکتور تاثیر دارند می‌پردازیم.

### 1-3-1- غلظت راکتور

هنگامی که بیش از یک ماده واکنش‌دهنده وجود داشته باشد، اغلب استفاده از مقدار بیش از نیاز یکی از واکنش‌دهنده‌ها نتیجه مطلوبی بدست خواهد داد. مخصوصاً اگر بخواهیم یکی از مواد به طور کامل مصرف شود (به علت قیمت بالا یا خطرناک بودن). گاهی اوقات مناسب است که یک ماده خنثی همراه با خوراک به راکتور تغذیه شود و یا قبل از پیشرفت کامل واکنش، محصول تولیدی خارج شود. بعضی اوقات نیز استفاده از یک مسیر برگشتی از فراورده‌های جانبی ناخواسته به راکتور مطلوب است.

در مورد واکنش‌های برگشت‌ناپذیر اگر یکی از ترکیبات ورودی بیش‌تر از مقدار مورد نیاز به واکنش وارد شود، می‌تواند ماده دیگر را به سمت کامل کردن سوق دهد. به عنوان مثال، واکنش بین اتیلن و کلر برای تولید دی‌کلرواتان را در نظر بگیرید:

$$C_2H_4 + Cl_2 \rightarrow C_2H_4Cl_2$$

اگر از یک مقدار اتیلن اضافی جهت حصول اطمینان از تبدیل کامل ماده کلر استفاده شود مشکل حضور کلر در سیستم جداسازی بعدی از بین می رود. معمولاً در یک واکنش اگر یکی از اجزاء خطرناک‌تر باشد (مانند کلر در این مثال) باید از کامل شدن آن مطمئن شویم.

اگر واکنش برگشت‌پذیر باشد هدف افزایش درصد تبدیل تعادلی می‌باشد. اگر یکی از خوراک‌ها را به مقدار اضافی وارد کنیم می‌توانیم درصد تبدیل تعادلی را افزایش دهیم. گاهی اوقات با حذف مداوم محصول یا یکی از محصولات از راکتوری که واکنش در آن در حال پیشرفت است، می‌توان درصد تبدیل تعادلی را افزایش داد. مثلاً به وسیله تبخیر کردن ماده‌ای از راکتور فاز مایع. یک راه دیگر این است که واکنش در مراحل پشت سر هم همراه با جداسازی محصولات در مراحل میانی صورت گیرد.

### 1-3-2- دمای راکتور

انتخاب دمای راکتور به عوامل زیادی بستگی دارد. عموماً این انتخاب باید به گونه‌ای باشد که سرعت‌های زیاد واکنش و حجم کمتر راکتور را ایجاد نماید. به طور عملی محدودیت‌هایی در انتخاب دمای راکتور وجود دارد، از جمله ملاحظات ایمنی، محدودیت‌های جنس ساختمان راکتور و یا حداکثر دمای عملکرد کاتالیست. بر حسب نوع واکنش انتخاب دما متفاوت خواهد بود.

#### 1-3-2-1- واکنشهای گرماگیر

اگر یک واکنش گرماگیر باشد، عملکرد در دمای بالا باعث افزایش درصد تبدیل می‌شود. همچنین دمای بالا، سرعت واکنش را زیاد و حجم راکتور را کم می‌کند. بنابراین برای واکنش‌های گرماگیر تا آنجا که ممکن است، درجه حرارت بالا در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که با ملاحظات ایمنی، محدودیت‌های جنس ساختمان راکتور و عمر کاتالیست مطابقت داشته باشد.

#### 1-3-2-1- واکنش‌های گرمازا

برای واکنش‌های برگشت‌ناپذیر گرمازا، تا آنجا که ممکن است، با توجه به ساختمان مواد، عمر کاتالیست و مسائل ایمنی، باید درجه حرارت را پایین در نظر گرفت. در این صورت حجم راکتور حداقل خواهد شد. چنانچه واکنشی گرمازا و برگشت‌پذیر باشد، عملکرد در دمای پایین حداکثر مقدار درصد تبدیل را افزایش می‌دهد. لیکن عملکرد در دمای پایین سرعت واکنش را کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث افزایش حجم راکتور خواهد شد. بنابراین در ابتدای واکنش یعنی هنگامی که از حالت تعادل دور هستیم؛ استفاده از درجه حرارت بالا به منظور افزایش سرعت واکنش برتری دارد. اما همانطور که با گذشت زمان به حالت تعادل نزدیک می‌شویم، برای افزایش مقدار حداکثر درصد تبدیل باید درجه حرارت را پایین آورد. لذا برای واکنش‌های برگشت‌پذیر گرمازا، همانطور که درصد تبدیل زیاد می‌شود، درجه حرارت ایده‌آل به طور مداوم کاهش می‌یابد.

اگر در راکتور همراه واکنش اصلی واکنش‌های دیگری نیز صورت گیرد که باعث تولید محصولات جانبی شوند، باید در دمایی عمل کرد که میزان تولید محصول اصلی بیشتر باشد. این کار اغلب به حداقل کردن حجم راکتور ترجیح دارد.

کنترل دما: در وهله اول عملکرد راکتور را آدیاباتیک یا عایق‌بندی‌شده فرض می‌کنیم. طراحی چنین سیستمی ساده‌ترین و ارزان‌ترین طراحی ممکن است. اگر عملکرد عایق‌بندی‌شده در واکنش‌های گرمازا باعث افزایش غیرقابل پذیرش درجه حرارت و در واکنش‌های گرماگیر باعث کاهش غیرقابل پذیرش درجه حرارت شود، با یکی از راهکارهای زیر سر و کار داریم:

1- انتقال حرارت غیرمستقیم با راکتور: اگر امکان عملکرد آدیاباتیک راکتور وجود نداشته باشد باید از حرارت غیر مستقیم و یا با خنک کردن غیر مستقیم استفاده نمود. این کار با استفاده از یک سطح انتقال حرارت داخلی یا خارجی در راکتور امکان‌پذیر است مانند استفاده از کویل‌ها و ژاکت‌ها.

2- تزریق گرم و تزریق سرد: تزریق مستقیم خوراک تازهٔ سرد به نقاط میانی راکتور، تزریق سرد نامیده می‌شود. این عمل جهت کنترل دمای واکنش‌های گرمازا موثر است. اگر واکنش گرماگیر باشد، می‌توان خوراک تازه پیش‌گرم‌شده را به نقاط میانی راکتور تزریق کرد. این عمل تزریق گرم نام دارد.

3- حامل حرارت: افزایش یک ماده خنثی به خوراک راکتور، افزایش دمای واکنش‌های گرمازا و یا کاهش دما در واکنش‌های گرماگیر را کاهش می‌دهد. باید تا آنجا که ممکن است از یکی از سیالات موجود در فرایند به عنوان حامل استفاده کرد.

حتی اگر درجه حرارت راکتور در محدوده‌های قابل قبول کنترل شود، شاید لازم باشد که جریان خروجی از راکتور به سرعت سرد شود تا واکنش سریعاً متوقف شده و از تشکیل بیش از اندازه فراورده‌های جانبی جلوگیری به عمل آید. عملیات خنک کردن را می‌توان به کمک انتقال حرارت غیر مستقیم با استفاده از تجهیزات مناسب و یا به وسیله انتقال حرارت مستقیم از طریق مخلوط کردن با یک سیال دیگر انجام داد. وضعیتی که معمولاً زیاد با آن مواجه می‌شویم زمانی است که محصولات گازی در یک راکتور نیاز به سرد کردن سریع دارند و این کار به وسیله مخلوط کردن محصول با یک مایع صورت می‌گیرد که در حین کار، مایع تبخیر می‌شود. حرارت لازم برای تبخیر مایع باعث می‌شود که محصولات گازی به سرعت سرد شوند.

در واقع سرد کردن محصول خروجی از راکتور به کمک انتقال حرارت مستقیم به بسیاری از دلایل می‌توند مورد استفاده قرار گیرد:

- واکنش بسیار سریع است و باید فوراً متوقف شود تا از تشکیل فراورده‌های جانبیِ اضافی جلوگیری به عمل آید.
- محصولات راکتور آنقدر داغ یا خورنده هستند که اگر به طور مستقیم از یک مبدل عبور کنند، جنس ویژه‌ای برای ساختمان راکتور و مبدل یا طراحی مکانیکی گرانی لازم خواهد بود.
- سرد کردن محصولات راکتور باعث می‌شود که ضریب کثیفی در مبدل‌های حرارتی متداول افزایش یابد. مایعی که برای انتقال حرارت مستقیم بکار می‌رود باید به گونه‌ای انتخاب شود که به آسانی قابل جداسازی از محصول و برگرداندن به راکتور باشد. در چنین وضعیتی هزینه عملیاتی به حداقل خواهد رسید.
- از استعمال مواد خارجی، یعنی موادی که بیش از این در فرایند وجود نداشته‌اند، باید اجتناب کرد. چراکه در اغلب موارد جداسازی و یا برگرداندن این مواد با بازده بالا مشکل است. به علاوه مواد خارجی بازگشت داده نشده در جریان خروجی مشکل‌ساز خواهند بود.

### 1-3-3- فشار راکتور

افزایش فشار در واکنش‌های برگشت‌ناپذیر فاز بخار سرعت واکنش را زیاد می‌کند و لذا حجم راکتور را کاهش می‌دهد. این امر به دو علت ایجاد می‌شود؛ هم به علت کاهش زمان اقامت مورد نیاز برای یک تبدیل معین در راکتور و هم به وسیله افزایش دانسیته بخار. به طور کلی پارامتر فشار اثر ناچیزی بر روی سرعت واکنش‌های فاز مایع دارد.

انتخاب فشار در واکنش‌های برگشت‌پذیر فاز بخار به این امر بستگی دارد که آیا واکنش همراه با کاهش و یا افزایش در تعداد مول‌ها است و یا اینکه تولید محصول با واکنش‌ها و محصولات جانبی همراه است یا نه.

اگر واکنش برگشت‌ناپذیر با کاهش تعداد مول‌ها همراه باشد، افزایش فشار راکتور، درصد تبدیل تعادلی و سرعت واکنش را افزایش و همچنین حجم راکتور را کاهش می‌دهد؛ بنابراین در این حالت باید فشار در بالاترین حد عملیاتی تنظیم شود؛ نباید از این نکته غافل شد که فشار بالا از طریق توان بالاتر کمپرسور تامین می‌شود که از نظر هزینه قابل توجه است. به علاوه ساختمان مکانیکی لازم برای فشار بالا هزینه گزافی را ایجاد می‌کند.

در واکنش‌های برگشت‌ناپذیر که با افزایش تعداد مولها همراه است کاهش در فشار راکتور، درصد تبدیل تعدلی را افزایش می‌دهد؛ لیکن عملکرد تحت یک فشار کم، سرعت واکنش‌های فاز بخار را کاهش و حجم راکتور را افزایش می‌دهد. بنابراین در ابتدای کار که از تعادل دور هستیم، استفاده از فشارهای بالا به منظور افزایش سرعت واکنش مناسب‌تر است؛ اما هنگامی که به شرایط تعادلی نزدیک می‌شویم، برای افزایش درصد تبدیل بالا فشار را باید کاهش داد.

اگر در راکتور واکنش‌های جانبی و محصولات جانبی نیز تولید شود، فشار باید به گونه‌ای انتخاب شود که محصولات جانبی کمتری تولید شود. در این حالت اغلب افزایش تولید محصول مطلوب نسبت به حجم راکتور ترجیح داده می‌شود.

برای واکنش‌های فاز مایع فشار اثر بسیار کمی دارد و فشار احتمالاً باید به گونه‌ای انتخاب شود که:

- از تبخیر محصولات جلوگیری کند
- اجازه دهد تا یکی از محصولات در واکنش برگشت‌پذیر تبخیر شود؛ زیرا با خروج این جزء مقدار حداکثر درصد تبدیل افزایش می‌یابد.

### 1-3-4- فاز راکتور

اگر امکان یک انتخاب آزاد بین واکنش‌های فاز مایع و واکنش‌های فاز گاز وجود داشته باشد، معمولاً عمل در فاز مایع ترجیح داده می‌شود چون حجم راکتور مورد نیاز در واکنش‌های فاز مایع کوچکتر است و نیز تجهیزات مورد استفاده برای فاز مایع کم‌هزینه‌تر می‌باشد.

عدم کارایی راکتور در استفاده از مواد ورودی می‌تواند به صورت‌های زیر باشد:

1- چنانچه درصد تبدیل بدست آمده در راکتور پایین بوده و جدا کردن و بازگرداندن خوراک واکنش نداده دشوار باشد.

2- از طریق تشکیل فراورده‌های جانبی ناخوسته، گاهی اوقات فراورده‌های جانبی خوراک محصول با ارزش است، گاهی اوقات به عنوان یک سوخت ارزش دارد. اما گاهی اوقات مشکل‌آفرین بوده و نیاز به فرایندهای تصفیه پساب گران‌قیمت دارد.

3- ناخالصی‌های خوراک می‌تواند واکنش را به تشکیل فراورده‌های جانبی سوق دهد. بهترین راه اجتناب از این امر، خالص سازی خوراک قبل از واکنش است.

کارایی خوب راکتور مستلزم کنترل دقیق متغیرهای عملیاتی مانند فشار، دما و غلظت می‌باشد.

## 1-4- بررسی راکتورهای پلیمریزاسیون

واکنشهای پلیمریزاسیون با توجه به تنوع تولیدشان از استفاده کننده‌های عمده راکتورها به شمار می‌روند. البته ساختار کلی راکتورها تفاوت چندانی با راکتورهای سایر مواد ندارد: اما با توجه به اهمیت این واکنشها، مطالبی در این مورد بیان می‌شود.

### 1-4-1- انواع راکتورهای پلیمریزاسیون

راکتورهای متنوعی برای انجام واکنشهای پلیمریزاسیون بکار میروند. این راکتورها و کاربرد آن در جدول زیر آورده شده است.

| فرایند پلیمریزاسیون | | راکتور ناپیوسته (Batch) | راکتور نیمه‌پیوسته (Semi-Batch) | راکتور لوله‌ای (Tubular) | راکتور همزن‌دار (Mixed) | راکتور همزن‌دار پیوسته سری |
|---|---|---|---|---|---|---|
| رشد زنجیری با واکنش پایان | محلول | Ö | Ö | Ö | Ö | √ |
| | رسوبی | Ö | | | | |
| | تعلیقی | Ö | | | | |
| | امولسیون | Ö | Ö | | Ö | √ |
| رشد زنجیری بدون | محلول | Ö | Ö | | Ö | √ |
| | رسوبی | Ö | | Ö | Ö | √ |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| واکـــــنش پایان | | | | | | |
| | محلول و یا مذاب | Ö | | Ö | | √ |
| | بین سطحی | Ö | | | | |
| | فاز جامد | √ | | √ | | |

## 1-4-2- تعاریف و بیان تفاوتها

در راکتورهای ناپیوسته (Batch Reactors) تمامی اجزاء مخلوط واکنش به راکتور وارد می‌شوند و تا پایان واکنش در راکتور باقی می‌مانند. معمولاً در ابتدای پلیمریزاسیون در راکتورهای ناپیوسته یک گرم‌کن وجود دارد که طی آن دمای مخلوط به دمای لازم برای شروع واکنش افزایش داده می‌شود. سپس واکنش پلیمریزاسیون شروع شده و به علت گرمازایی قابل توجه آن دمای مخلوط واکنش می‌تواند افزایش یابد به همین دلیل در راکتورهای ناپیوسته باید قابلیت گرم و سرد کردن سریع و کافی و همچنین سیستم کنترل درجه حرارت موثر پیش‌بینی گردد.

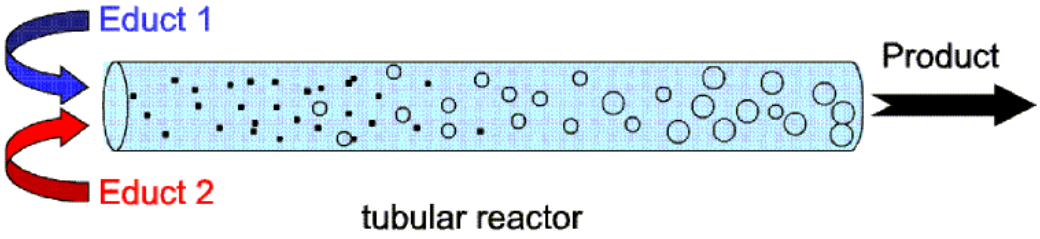
فرایندهای ناپیوسته برای پلیمریزاسیون با درجه تبدیل بالا مناسب است. از طرف دیگر این سیستمها برای بروز انفجار حرارتی مستعد هستند. فرایندهای ناپیوسته عمدتاً در زمینه پلیمریزاسیون رادیکالی به کار می‌روند.

(Semi Continuous Reactors) یا نیمه ناپیوسته (Semi Batch): در راکتورهای نیمه پیوسته مواد برخی از مواد واکنش کننده ممکن است به تدریج به راکتور اضافه شوند . یا آنکه محصولات جانبی تولید شده در طی واکنش از راکتور خارج گردند. در بسیاری از پلیمریزاسیونهای رادیکالی معمول است که منومر، حلال و یا شروع‌کننده را به منظور حفظ درجه حرارت و افزایش سرعت تولید به تدریج به راکتور اضافه می‌کنند. اضافه کردن تدریجی کومنومر در کوپلیمریزاسیون نیز وقتی که اختلاف فعالیت منومرها زیاد است از جمله کاربردهای این فرایند است. در پلیمریزاسیونهای نیمه پیوسته ممکن است که تمامی مواد واکنش کننده در ابتدای واکنش به راکتور اضافه گردند ولی قبل از تشکیل محصولات جانبی ، باید از راکتور خارج شوند. پلیمریزاسیونهای مرحله‌ای از این نوع سیستمها هستند. تبخیر محصولات جانبی یک عامل موثر در جذب حرارت واکنش است که در برخی از موارد می‌تواند به قدری شدید باشند که باعث افت دمای واکنش گردد. در این حالت برای جبران حرارت از دست رفته حتی ممکن است نیاز به حرارت دهی نیز باشد. راکتورهایی که برای فرایند نیمه پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند مشابه با راکتورهای ناپیوسته است با این تفاوت که امکان افزایش مداوم مواد اولیه به آن و یا خروج محصولات جانبی از آن پیش‌بینی شده است. در راکتورهای پیوسته (Continuous Reactors) مواد واکنش دهنده با شدت جریان ثابت به درون راکتور رانده شده و محصولات نیز به طور مداوم از راکتور خارج می‌گردند.

پس از راه‌اندازی یک راکتور پیوسته، راکتور پس از عبور از یک حالت انتقالی به یک شرایط پایدار می‌رسد. در این شرایط شدت حرارت‌زائی سیستم نیز به مقدار ثابتی می‌رسد. فرایندهای مداوم عملیات آسان‌تر و هزینه کمتری دارد و هنگامی که ظرفیت تولید بالا باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در موارد خاص پلیمریزاسیون در راکتورهای ناپیوسته که دارای انعطاف‌پذیری بیشتری برای تولید پلیمرهایی با درجات تبدیل مختلف هستند، انجام می‌گیرد.

فرایندهای پیوسته در راکتورهای همزن‌دار(Continuous Stirred Tank Reactors ,CSTR)

و راکتورهای لوله‌ای (Tubular Reactor) قابل انجام است. راکتورهای همزن‌دار پیوسته مشابه با راکتورهای ناپیوسته هستند با این تفاوت که امکان ورود مداوم مواد اولیه به آنها و خروج محصول نهایی از آنها پیش‌بینی شده است.در شکل نمونه‌ای از راکتور همزن‌دار را مشاهده می کنید.

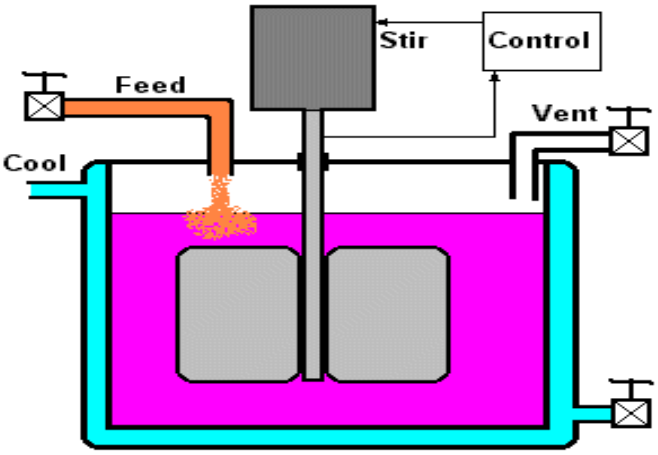



tubular reactor

شکل 1-18- شمایی از راکتور لوله ای

از راکتورهای همزن‌دار پیوسته به صورت سری (Cascade) در صنعت برای پلیمریزاسیون امولسیونی مثل وینیل کلراید و وینیل‌استات استفاده می‌گردد. در راکتورهای لوله‌ای به منظور جذب حرارت آزاد شده، قطر راکتور همواره کوچک اختیار می‌شود.در شکل زیر نمونه ای از این نوع را می بینید.

## 1-4-3- انجام فرایندهای مختلف پلیمریزاسیون در راکتورهای پلیمریزاسیون




شکل 1-19- راکتور CSTR

تکنولوژی پلیمریزاسیون جرمی برای پلیمریزاسیونهای با رشد مرحله‌ای، مرسوم است، زیرا به واسطه کمی انرژی آزاد شده، جذب حرارت به سهولت انجام می‌پذیرد. به علت پایین بودن ویسکوزیته تا درجات تبدیل بالا، اختلاط نیز به نحو موثری قابل انجام است. حرارت آزاد شده قابل توجه و افزایش سریع ویسکوزیته در پلیمریزاسیون با رشد زنجیری، کارایی تکنولوژی جرمی را برای این نوع مکانیسم پلیمریزاسیون کاهش می‌دهد. زیرا بر خلاف حالت قبل، افزایش سریع ویسکوزیته و در نتیجه عدم امکان کنترل درجه حرارت، دستیابی به درجات تبدیل بالا را مقدور نمی‌سازد. محلول پلیمریزاسیون جرمی از درجه خلوص بالایی برخوردار بوده و عملیات تخلیص کمتری را می‌طلبد. انجام پلیمریزاسیون در حضور یک حلال از مشکلات انتقال حرارت و اختلاط می‌کاهد. پلیمر و منومر در داخل حلال محلول هستند. علاوه بر این ویسکوزیته کمتر سبب بهبود اختلاط و کارایی شروع کننده می‌گردد. مهمترین نقطه ضعف این روش هزینه جداسازی حلال و بازیابی آن است. ویسکوزیته سیستم پلیمریزاسیون تعلیقی در طول واکنش نسبتاً ثابت باقی مانده و عمدتاً به وسیله ویسکوزیته فاز مداوم (آب) تعیین می‌گردد.

اغلب پلیمرها دارای دانسیته بیشتری نسبت به منومرهای خود هستند. به این جهت در پلیمریزاسیون تعلیقی سیستم اختلاط باید به گونه‌ای انتخاب گردد که در ابتدا منومرهای از سطح به زیر کشیده شده و در داخل فاز آبی پراکنده شوند و در انتها از ته‌نشینی ذرات جامد پلیمری جلوگیری به عمل آورده و آنها را به طور یکنواخت در داخل فاز پیوسته پراکنده سازد. فاز پیوسته به عنوان عامل انتقال حرارت عمل نموده و در نتیجه کنترل درجه

حرارت در این فرایند ساده‌تر از نوع جرمی است. چسبندگی و رسوب پلیمر نیز به مراتب کمتر از فرایند جرمی مشاهده می‌شود. پلیمریزاسیون تعلیقی به عنوان مرحله دوم فرایند جرمی نیز قابلیت کاربرد دارد (مانند فرایند تولید پلی‌استیرن مقاوم). زیرا معمولاً ادامه پلیمریزاسیون تا رسیدن به درجه تبدیل نهایی توسط فرایند تعلیقی انجام می‌گیرد. پس از پایان پلیمریزاسیون، دانه‌های پلیمری از طریق سانتریفوژ جدا و خشک می‌گردند.

اختلاط در پلیمریزاسیون امولسیونی نسبت به پلیمریزاسیون تعلیقی از اهمیت کمتری برخوردار است و عمدتاً جهت تسهیل انتقال حرارت طراحی می‌شود. کاربرد زیاد امولسیفایر در پلیمریزاسیون امولسیونی، جداسازی آن را در پایان واکنش دشوار می‌سازد. به همین سبب معمولاً از فرایندهای امولسیونی در جایی استفاده می‌شود که در شکل نهایی مصرف به صورت لاتکس یا امولسیون باشد (مانند امولسیون نهایی اکریلیک). در صورت لزوم استفاده از پلیمر خالص، محلول پلیمریزاسیون ابتدا منعقد و سپس دانه‌های پلیمر به کمک فیلتر جدا و خشک می‌گردد.

### 1-4-4- مقایسه انواع تکنولوژی‌های پلیمریزاسیون و معایب (Fail)

| تکنولوژی پلیمریزاسیون | امتیازات | نقاط ضعف | **محصولات تجاری** |
|---|---|---|---|
| جرمی | -عملکرد مناسب راکتور و ظرفیت تولید بالا<br>-هزینه جداسازی کم<br>-خلوص بالای محصول<br>-عدم وجود واکنش‌های انتقال به حلال یا سایر ناخالصی‌ها | -افزایش شدید ویسکوزیته و بروز اخلال در اختلاط سیستم و جذب حرارت<br>-چسبندگی پلیمر به دیواره‌ها<br>-مشکل انتقال محصول | **PMMA , PS**<br>**PVC**<br>**LDPE**<br>**LLDPE** |
| تعلیقی | -ویسکوزیته کم<br>-انتقال حرارت خوب<br>-هزینه جداسازی کم | -ظرفیت تولید پایین<br>-عدم امکان اجرایی فرایند پیوسته<br>-مشکلات مربوط به پساب | **PMMA**<br>**PS**<br>**SAN** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | -چسبندگی پلیمر به دیواره | |
| امولسیونی | -ویسکوزیته کم (در مقایسه با جرمی و محلول)<br>-انتقال حرارت خوب<br>سرعت پلیمریزاسیون و وزن مولکولی بالا<br>-امکان کاربرد مستقیم لاتکس حاصل | -هزینه جداسازی بالا به در صورت نیاز به بازیابی پلیمر<br>-ناخالصی محصول به واسطه وجود امولسیفایر<br>-مشکلات مربوط به پساب<br>-چسبندگی به دیواره | **PVC , ABS**<br>**PVA**<br>**SBR , CR**<br>**BR** |
| محلول | نسبت به جرمی:<br>-ویسکوزیته کمتر<br>-انتقال حرارت و اختلاط بهتر<br>-جسبندگی کمتر فیلم پلیمر به دیواره<br>-امکان کاربرد مستقیم محصول | -ظرفیت تولید کمتر در مقایسه با جرمی<br>-هزینه جداسازی بالا در صورت نیاز به بازیابی پلیمر<br>-آلودگی و ناامنی محیط کار به دلیل استفاده از حلال<br>-وجود انتقال زنجیر به حلال | **SBR**<br>**PVA**<br>**EPDM**<br>**BR** |

### 1-4-5- بررسی مشکلات فرایند پلیمریزاسیون

مشکلات تولید صنعتی پلیمرها با تولید ترکیبات آلی با وزن ملکولی کم بسیار متفاوت است. در اینجا برخی از مهمترین ویژگی‌های واکنش‌های پلیمریزاسیون مورد بحث قرار می گیرند.

#### 1-4-5-1- افزایش ویسکوزیته

یکی از مهمترین مشکلات واکنش‌های پلیمریزاسیون، افزایش شدید ویسکوزیته با پیشرفت واکنش است. در حقیقت بخش عمده مشکلات در مهندسی فرایندهای پلیمریزاسیون بازتابی از افزایش ویسکوزیته است و علم نوبنیاد " مهندسی واکنش‌های پلیمریزاسیون" نیز چیزی جز چگونگی خنثی نمودن اثر افزایش ویسکوزیته در چارچوب مهندسی شیمی نیست.

در پلیمریزاسیون زنجیری به محض شروع واکنش، پلیمرهای با وزن ملکولی بالا تولید می‌شود. تغییرات وزن ملکولی با درجه تبدیل نسبتاً کم است. از این رو افزایش ویسکوزیته به واسطه افزایش میزان پلیمر در مخلوط واکنش صورت می گیرد. در پلیمریزاسیون مرحله‌ای تنها الیگومرها تا درجات تبدیل بالا وجود دارند و تنها بعد از آن وزن مولکولی پلیمر به طور ناگهانی و به شدت افزایش می‌یابد. ویسکوزیته محلول در حال واکنش نیز تا مراحل پایانی واکنش نسبتاً کم است و سپس به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. بنابراین عامل افزایش ویسکوزیته تا مراحل پایانی واکنش، میزان پلیمر در مخلوط واکنش است. در حالیکه در مراحل پایانی افزایش درجه پلیمریزاسیون یا به عبارت دیگر وزن ملکولی پلیمر سبب افزایش ویسکوزیته می‌شود که اثرات آن به مراتب شدیدتر است.

افزایش ویسکوزیته در سیستم‌های همگن به مراتب شدیدتر از ناهمگن است. افزایش ویسکوزیته در پلیمریزاسیونهای جرمی و محلول تا $10^6$ برابر نیز تخمین زده می‌شود. در حالیکه در پلیمریزاسیون امولسیونی که به واسطه امولسیفایرهایی با وزن ملکولی کم تثبیت می‌شود، ویسکوزیته به طور متوسط تا $10^3$ برابر افزایش نشان می‌دهد. افزایش ویسکوزیته در پلیمریزاسیون تعلیقی مشهود نیست و ویسکوزیته آن به وسیله فاز آب دیکته می‌شود.

از مهمترین اثرات افزایش ویسکوزیته کاهش ضریب نفوذ ملکولی و ضریب انتقال جرم است. کاهش ضریب نفوذ ملکولی باعث کاهش تحرک ماکروراديکال‌های در حال واکنش شده و در نتیجه از وقوع واکنش‌پایان جلوگیری به عمل می‌آورد که این امر پدیده اثر ژل را به دنبال دارد. بروز اثر ژل باعث افزایش ناگهانی و شدید سرعت واکنش می گردد. به موازات افزایش سرعت واکنش،از یک طرف شدت آزادسازی حرارت آهنگ صعودی پیدا می کند و از طرف دیگر توان مکانیکی همزن افزایش می‌یابد.در نتیجه کاهش توان سرمایشی راکتور کاهش می‌یابد .این موضوع منجر به بروز مشکلاتی در کنترل و پایداری راکتور پلیمریزاسیون می گردد. در ناحیه‌ای که تولید ژل زیاد می‌شود، انرژی آزاد شده به اندازه‌ای است که حالت انفجاری به سیستم می‌دهد. در بسیاری از واحدهای صنعتی وقایع مصیبت‌باری به واسطه خارج شدن کنترل واکنش پلیمریزاسیون به دلیل عدم موفقیت در جذب حرارت آزاد شده گزارش شده است. به همین دلیل طراحی دقیق راکتور و سیستم کنترل آن در فرایندهای پلیمریزاسیون از اهمیت خاص برخوردار است.

### 1-4-5-2- حرارت زایی

بسیاری از واکنش‌های پلیمریزاسیون با پیشرفت واکنش مقدار قابل توجهی انرژی از خود آزاد می کنند. علاوه بر این، انرژی مکانیکی لازم برای اختلاط نیز در ویسکوزیته بالا تبدیل به انرژی گرمایی می‌شود. جذب انرژی آزاد شده در پلیمریزاسیونهای با درجه خلوص بالا به واسطه افزایش ویسکوزیته ، چسبندگی پلیمر به سطوح انتقال حرارت و تغییرات فاز در طی واکنش، از مهمترین دشواری‌های مهندسی واکنش‌های پلیمریزاسیون است.

## 1-4-6- طراحی راکتور

واکنشهای پلیمریزاسیون به میزان قابل توجهی انرژی آزاد می کنند. در واکنشهای مواد با وزن مولکولی کم بالاترین شدت حرارت در ابتدای واکنش که در آن غلظت مواد واکنش کننده حداکثر است رخ می دهد. در حالیکه در واکنشهای پلیمریزاسیون به ویژه نوع جرمی آن به علت وقوع اثر ژل و افرایش ناگهانی سرعت واکنش نقطه اوج آزادسازی حرارت در اواسط واکنش رخ می دهد. متوسط مقدار حرارت آزاد شده و همچنین حداکثر مقدار آن همسو با درجه حرارت و مقدار شروع کننده تغییر میکند. مقادیرحرارت و به ویژه حرارت ماکزیمم در پلیمریزاسیون متیل متاکریلات به مراتب بیشتر از پلیمریزاسیون استیرن است. این اختلاف ریشه در وجوذ اثرژل قوی در پلیمریزاسیون متیل متاکریلات نسبت به استیرن دارد. در مورد متیل متاکریلات اثر ژل در اوایل واکنش رخ میدهد. از این رو حرارت آزاد شده دارای یک نقطه اوج کاملاً متمایز است. در حالیکه اثر ژل در مورداستیرن در اواسط واکنش به وقوع میپیوندد یعنی در جایی که سرعت واکنش پلیمریزاسیون به واسطه مصرف مونومر و شروع کننده بسیار کم شده است. بنابراین ممکن است که حتی اثر ژل نیز قادر به افزایش سرعت واکنش تا مرز مقادیر اولیه آن نباشد.

فصل دوم

# برج‌ها
# Towers

## 2-1- شرح و توصیف

یکی از مهمترین فرایندهایی که در صنایع مربوط به نفت انجام می‌شود، جداسازی‌های اجزای موجود در یک ترکیب است که هر کدام از این اجزاء می‌توانند ارزش بسیار بالایی در مقایسه با ترکیب اولیه داشته باشند.

اگر مخلوطی که جداسازی می‌شود همگن باشد جداسازی می‌تواند تنها با افزودن و یا ایجاد فاز دیگری در سیستم انجام شود. به عنوان مثال در جداسازی یک مخلوط گازی، فاز دیگر می‌تواند به وسیله چگالش جزئی انجام شود. بخار حاصل از چگالش جزئی، غنی از ترکیبات فرار و مایع حاصله غنی از ترکیبات با فراریت کمتر خواهد بود. به عنوان یک روش دیگر به جای تولید یک فاز اضافی می‌توان به مخلوط گازی فاز جدیدی نظیر یک حلال را افزود که به طور انتخابی یکی یا چند تا از ترکیبات مخلوط را در خود حل کند. در اینجا یک مرحله جداسازی دیگری خواهیم داشت تا حلال را از سیال حل شده در آن جدا کرده و برای استفاده مجدد به دستگاه جداساز برگردانیم. در صورتیکه یک مخلوط ناهمگن داشته باشیم، جداسازی می‌تواند به طور فیزیکی و با استفاده از تفاوت دانسیته بین فازها انجام گیرد.

جداسازی برای مخلوط‌های زیر صورت می‌گیرد:

1- جداسازی مخلوط‌های ناهمگن

2- جداسازی مخلوط‌های همگن

جداسازی فازهای مختلف یک مخلوط ناهمگن باید قبل از جداسازی مخلوط‌های همگن انجام گیرد زیرا این جداسازی هم ساده بوده و هم باعث تسهیل در جداسازی همگن خواهد شد.

روش‌های جداسازی ممکن است به صورت پیوسته، نیمه‌پیوسته و غیرپیوسته صورت گیرد.

جداسازی فازی که احتمالاً باید انجام گیرد عبارتند از:

- بخار/ مایع، مایع/ مایع، جامد/ مایع، جامد/گاز و جامد/ جامد.

که از حالات بالا بخار/ مایع، مایع/ مایع، که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

دستگاه‌های بکار رفته در عملیات گاز/مایع به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- دستگاه‌هایی که در آنها گاز پراکنده می‌شود:

در این گروه مخازنی که در آنها حباب گاز ایجاد می‌شود و یا مخزن مجهز به همزن و انواع برج‌های سینی‌دار را می‌توان نام برد. در این دستگاه‌ها فاز گاز به صورت حباب یا کف در فاز مایع پراکنده می‌شوند.

- دستگاه‌هایی که در آنها فاز مایع پراکنده می‌شود:

این گروه شامل دستگاه‌هایی می‌شود که در آنها مایع به صورت یک فیلم نازک و یا به صورت قطره‌ای درآمده و در فاز گاز پراکنده می‌شود. در این میان برج‌های دیواره مرطوب، برج‌های پاششی و پاشنده‌ها و نیز ستون‌های پر شده را می‌توان نام برد. ستون‌های پر شده مهمترین نوع دستگاه‌های این گروه به حساب می‌آیند.

معمولاً برج‌های جداسازی، بر اساس عملیات انتقال جرمی که بین فازها انجام می‌شود و بیشتر در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

الف - برج‌های تقطیر

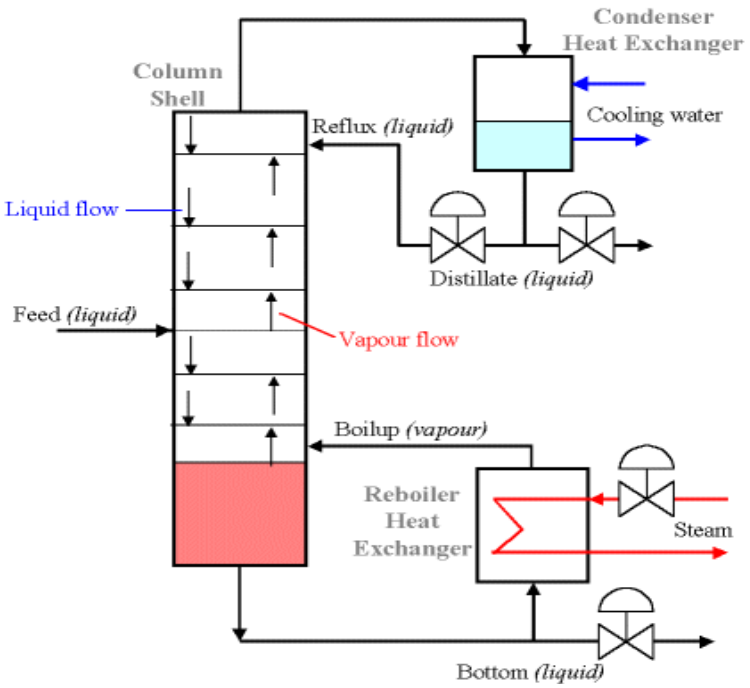
ب - برج‌های استخراج

ج - برج‌های جذب و دفع

ابتدا هریک از فرایندهای تقطیر، استخراج و جذب و دفع معرفی و سپس در مورد برجها و دستگاه‌های بکار برده شده در آنها توضیحاتی داده شود.

## 2-1-1- تقطیر

متداولترین روش، تبخیر و چگاش مکرر یا عمل تقطیر Distillation میباشد(شکل 2-1).




شکل 2-1-- فرایند تقطیر

مزیتهای عمده تقطیر عبارتند از :

- توانایی عملکرد در دامنهٔ وسیعی از حجم خوراک ورودی(بسیاری از روشهای تقطیر، تنها در مقادیر کم خوراک ورودی بکار می‌روند).

ـ توانایی عملکرد در دامنهٔ وسیعی از غلظتهای خوراک (بعضی از روشهای تقطیر می‌توانند حتی با خوراک نسبتاً خالص عمل کنند).

- توانایی تولید محصول با خلوص بالا( البته بسیاری از روشهای تقطیر فقط یک جداسازی نسبی را انجام می‌دهند و نمی‌توان محصول 100٪ خالص تولید کنند).

عمده حالاتی که مناسب نیست از عمل تقطیر در آنها استفاده شوند عبارتند از:

- جداسازی مواد با وزن مولکولی کم: مواد با وزن مولکوای کم در فشار بالا تقطیر می‌شوند تا دمای چگالش آنها افزایش یافته ، چنانچه ممکن شود از آب خنک) (Cooling Water و یا هوای خنک در کندانسور (Condenser) برج استفاده شود. مواد با وزن مولکولی کم نیاز به یک مبرد در کندانسور دارند. این عمل افزایش قابل ملاحظه‌ای در هزینه عملیاتی دارد چراکه مبرد بسیار گران است. جذب ) (Absorption و جذب سطحی (Adsorption)و جداکننده‌های غشای گاز، روشهای معمولی برای جداسازی مواد با وزن مولکولی کم هستند.

- جداسازی مواد با وزن مولکولی بالا و حساس به حرارت: مواد با وزن مولکولی بالا اغلب نسبت به حرارت حساس هستند و از این رو معمولاً تحت خلا تقطیر می‌شوند تا نقطه جوششان کاهش یابد.

- جداسازی ترکیبات با غلظت بسیار کم: تقطیر برای این منظور روش مناسبی نیست. جذب سطحی و جذب دو روش موثر در این حالت هستند.

- جداسازی دسته‌ای، از ترکیبات: اگر قرار باشد دسته‌ای از ترکیبات جداشوند ( به طور مثال یک مخلوط ترکیبات حلقوی Aromatics از مخلوط زنجیره‌ای Aliphatic)، تقطیر تنها می‌تواند بر اساس اختلاف نقاط جوش و بدون توجه به نوع ترکیبات عمل جداسازی را انجام دهد. استخراج مایع- مایع می‌تواند برای جداسازی دسته‌ای از ترکیبات بکار رود.

- مخلوط با فراریت نسبی کم یا آنها که رفتار همجوش یا آزوتروپ ) (Azeotropic از خود نشان می‌دهند. در این حالت از تقطیر استخراجی یا تقطیر آزوتروپیک، تشکیل بلور (Crystallization) و استخراج مایع- مایع می توان استفاده کرد.

- جداسازی مایع فرار از یک ترکیب غیر فرار: این فرایند به طور معمول توسط تبخیر و خشک کردن انجام می گیرد.

## 2-1-2- عوامل موثر بر تقطیر

مهمترین عوامل عبارتند از :

1- فشار عملیاتی 2- میزان مایع برگشتی 3- حالت خوراک ورودی

### 2-1-2-1- فشار عملیاتی

وقتی فشار بالا می‌رود:

- جداسازی بسیار مشکل می‌شود(فراریت نسبی کاهش می‌یابد)؛ یعنی به سینی‌ها و یا جریان برگشتی بیشتری نیاز است.
- گرمای نهان تبخیر کاهش می‌یابد. یعنی بار حرارتی جوش‌آورها و کندانسورها کمتر می‌شود.
- دانسیته بخار افزایش می‌یابد و لذا قطر ستون تقطیر کمتر خواهد شد.
- دمای جوش‌آور افزایش می‌یابد. این افزایش به کمک تجزیه حرارتی مواد تبخیر شده و افزایش رسوب در لوله‌ها تعیین می‌شود.
- دمای کندانسور افزایش می‌یابد.

بدیهی است وقتی فشار کاهش می‌یابد این اثرات برعکس خواهد شد. اغلب حد پایین فشار برای اجتناب از موارد زیر تعیین می‌گردند:

- عملیات تحت خلا
- عملیات کندانسور در زیر دمای محیط

هر دو عملیات تحت خلا و استفاده از سیستم برودت‌ساز باعث افزایش هزینه می‌شود. برای اجتناب از این حالت، چنانچه محدودیتهای فرایند اجازه دهند، باید:

- فشار به گونه‌ای تنظیم شود تا نقطه جوش محصول بالای برج $10^{o}C$ بیشتر از دمای آب خنک‌کن در تابستان باشد تا از عملکرد کندانسور در زیر دمای محیط پرهیز شود.
- فشار در حد اتمسفر تنظیم شود تا از تقطیر در خلا جلوگیری شود.

### 2-1-1-2- میزان مایع برگشتی (Reflux Ratio)

هرچقدر میزان مایع برگشتی بیشتر شود طول ستون کوتاه‌تر و تعداد سینی‌ها کمتر خواهد شد ولی بار حرارتی کندانسور و جوش‌آور افزایش می‌یابد.

### 2-1-1-3- شرایط خوراک ورودی

این متغیر از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشد. اگر خوراک زیر نقطه جوش باشد تعداد سینی‌های بالای سینی خوراک را کاهش می‌دهد اما سینی‌ها بخش پایینی سینی خوراک را افزایش می‌دهد ونیاز بیشتری به حرارت در جوش‌آور را دارد اما در کندانسور به سرمایش کمتری نیاز می‌باشد.

خوراکی که به صورت تبخیر شده باشد عکس این ویژگی‌ها را دارد.

## 2-1-2- جذب و دفع

جذب گاز فرایندی است که در آن یک مخلوط گازی در تماس با یک حلال مایع قرار می‌گیرد تا به طور انتخابی یک یا چند جزء مورد نظر از مخلوط گازی را در خود حل کند. اغلب فرایندهای جذب به یک ماده خارجی نیاز دارند که به فرایند وارد شده و به عنوان حلال مایع عمل می‌نماید. نظر به اینکه اصول فرایندهای جذب و دفع یکسان است هردو فرایند به طور همزمان بررسی می‌شود.

دبی مایع و گاز، درجه حرارت و فشار متغیرهای مهمی هستند که باید تعیین شوند.

هرچقدر ضریب جذب بزرگتر باشد به عنوان مثال با افزایش مقدار مایع ، طول ستون جذب یا تعداد سینی‌های مورد نظر برای جذب کاهش می‌یابد.

درجه حرارت: در جذب کاهش دما حلالیت جزء مورد نظر(گاز) را در مایع افزایش می‌دهد.یعنی در جذب کاهش دما و در دفع افزایش دما مطلوب خواهد بود.

فشار: فشار بالا منجر به افزایش حلالیت ماده حل شونده(گاز) در مایع می‌شود.یعنی در جذب افزایش فشار و در دفع کاهش فشار مطلوب خواهد بود( عکس دما).

یکی از مهمترین مباحث مربوط به برج‌های جذب انتخاب حلال می‌باشدکه بر اساس معیارهای زیر صورت می گیرد:

1-حلالیت گاز: حلالیت گاز در حلال مایع باید بالا باشد تا شدت جذب گاز زیاد و مقدار مصرفی حلال مورد نیاز کم شود. معمولاً حلالی که از نظر طبیعت شیمیایی مشابه ماده حل شونده باشد، امکانات زیادی را جهت انحلال حل شونده فراهم می‌سازد.

2-فراریت: فشار بخار باید کم باشد، زیرا گاز خروجی از یک فرایند جذب معمولاً از بخار حلال اشباع است و لذا اتلاف حلال در صورت بالا بودن فشار بخار آن زیاد خواهد بود.

3-قیمت: حلال نباید گران‌بها باشد تا اتلاف آن هزینه زیادی را ایجاب نکند و به علاوه به آسانی تهیه شود.

4-ویسکوزیته: کم بودن ویسکوزیته به دلایل تسریع به سرعت جذب، افت فشار کم در تلمبه کردن و خواص مفید در انتقال حرارت، ترجیح داده می‌شود.

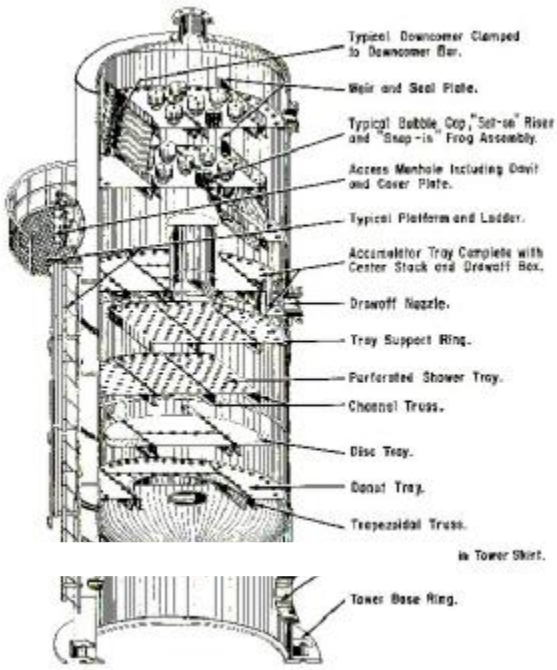
5-خواص متفرقه: حلال در صورت امکان نباید سمی و آتش‌گیر باشد. باید از نظر شیمیایی پایدار بوده و نقطه انجماد آن نیز پایین باشد. همچنین خاصیت خورندگی بالایی نداشته باشد.

### 2-1-3- استخراج

در استخراج مایع- مایع مانند تقطیر، دو فاز را باید در تماس با یکدیگر قرار داد تا عمل انتقال جزء مورد نظر انجام شده و سپس جداسازی صورت می‌گیرد. در تقطیر عمل اختلاط و جداسازی آسان و سریع است. اما در استخراج، چون چگالی دو فاز نزدیک به یکدیگر می‌باشد برای اختلاط و جداسازی نیروی محرکه کمی در دسترس است. در این حالت عمل مخلوط کردن دو فاز مشکل و جداسازی آنها مشکلتر است. ویسکوزیته هر دو فاز نسبتاً بالا و سرعت حرکت مواد در بیشتر قسمتهای دستگاه‌های استخراج پایین است. در نتیجه در بسیاری از دستگاه‌های استخراج، نیروی محرکه لازم برای اختلاط و جداسازی با روشهای مکانیکی تامین می‌شود.

محصول استخراج ممکن است سبکتر یا سنگینتر از محصول پس‌ماند باشد در نتیجه محصول استخراج در بعضی از دستگاهها از قسمت فوقانی و در بعضی دیگر از قسمت تحتانی دستگاه خارج می‌شود. اگر به بیش از

یکبار تماس بین مایعات نیاز باشد، عملیات تکرار می‌شود. اما وقتی تعداد کمیت‌ها زیاد و نیاز به چند بار تماس باشد، از جریان پیوسته استفاده می‌شود.

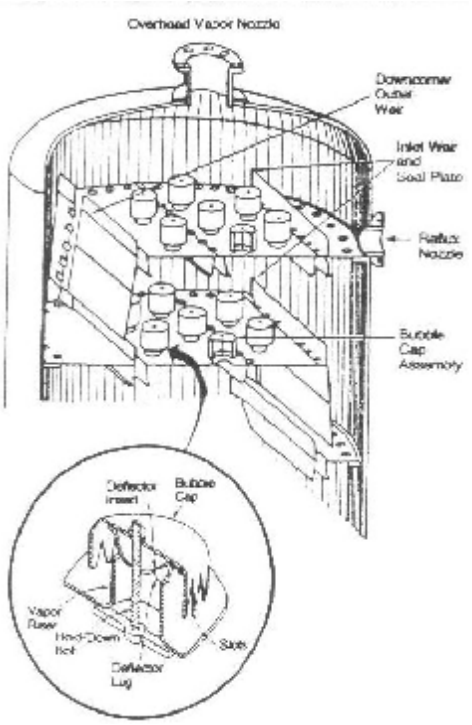



شکل 2-2 یک برج تقطیر همراه قسمت های داخلی آن

## 2-2- برج‌های تقطیر(Distillation Columns)

اساس کار برج‌ها افزایش سطح تماس بین فازها می‌باشد که این افزایش ممکن است توسط سینی یا پرکن تامین شود. چگونگی تماس گاز و مایع بسته به نوع وسیله متفاوت است. در برخی از برج‌های پرشده برای بهبود توزیع و افزایش سطح، هر بستر پرکن را روی یک سینی قرار می‌دهند. در برخی از نواع سینی‌ها، مایع صرفاً مانند دوش پایین می‌ریزد و گاز از وراء فیلم مایع عبور می‌کند. در انواع دیگر سینی‌ها، اساس کار تولید حباب و گذراندن آن از داخل لایه‌ای از مایع است.

در ساخت برجها بر حسب شرایط عملیاتی و خوردگی می‌توان از انواع مواد مانند شیشه، فلزات، فلزات با آستر شیشه‌ای، کربن نفوذ ناپذیر و ... استفاده کرد. عموماً شکل برجها به صورت استوانه‌ای است. در برجهای کوچک به منظور تمیز کردن دریچه‌هایی در اطراف آن نصب می‌کنند و در برجهای بزرگ به ازاء هر ده سینی، یک راه ورود(Man way) ( به برج در نظر گرفته می‌شود. سینی‌ها عموماً از ورق‌های فلزی و در صورت لزوم از آلیاژهای بخصوص ساخته می‌شوند. ضخامت سینی‌ها با توجه به میزان خوردگی مجاز تعیین می‌شود. برای جلوگیری از حرکت سینی در اثر تغییرات حرکت گاز، سینی‌ها به بدنه برج وصل شده ونیز از میله‌های



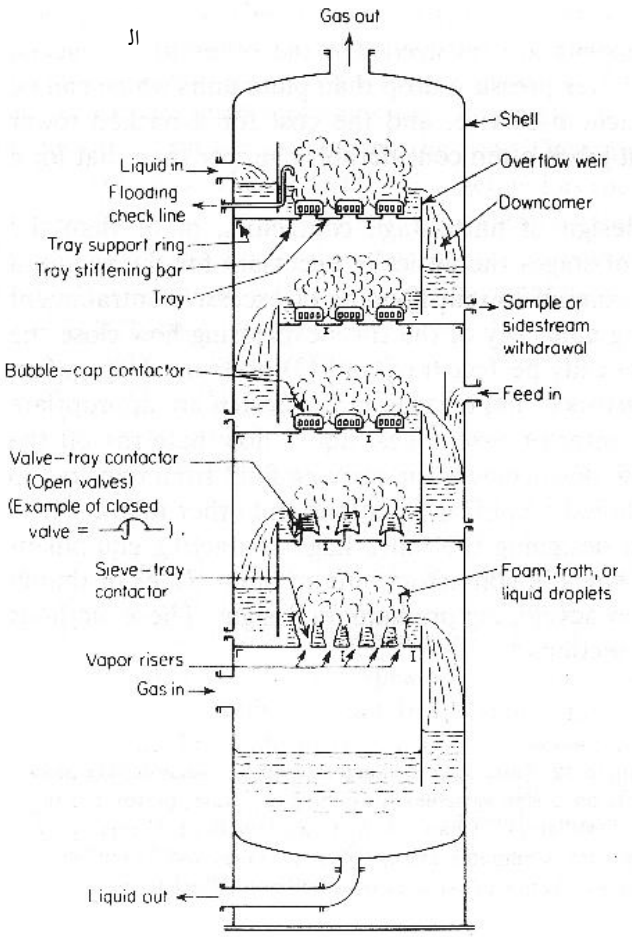

شکل 2-3- قسمتی از یک برج

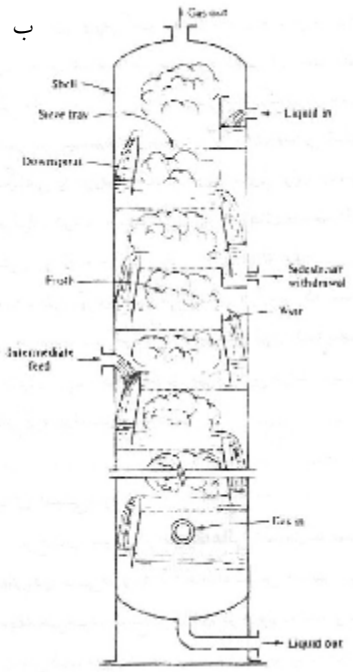
نگه‌دارنده در زیر آنها استفاده میشود. در نصب سینی‌ها فاصله کافی بین بدنه برج وسینی به منظور پیش‌بینی انبساط حرارتی در نظر گرفته می‌شود. در نصب سینی‌ها از حلقه‌های محافظ سینی استفاده می‌شود. بر روی حلقه‌ها شکاف‌هایی وجود دارد که از طریق آنها سینی به حلقه پیچ می‌شود. سینی‌های بزرگ چند تکه ساخته می‌شوند تا در هنگام تعمیر و تمیز کردن بتوان به آسانی از یک سینی به سینی دیگر راه یافت. سینی‌ها باید حداکثر با اختلاف mm6 در دو انتها تراز شوند تا توزیع مایع روی سینی به درستی انجام گیرد. انتقال مایع از یک سینی به سینی پایین‌تر آن از طریق مجرای ریزش مایع انجام می‌گیرد. این مجرا ممکن است به صورت یک لوله و یا ترجیحاً قسمتی از خود سینی باشد که به کمک یک صفحه عمودی مجرایی را تشکیل می‌دهد. شکل 2-2 ساختار داخلی یک برج را نشان می‌دهد.

## 2-2-1- برج‌های سینی‌دار

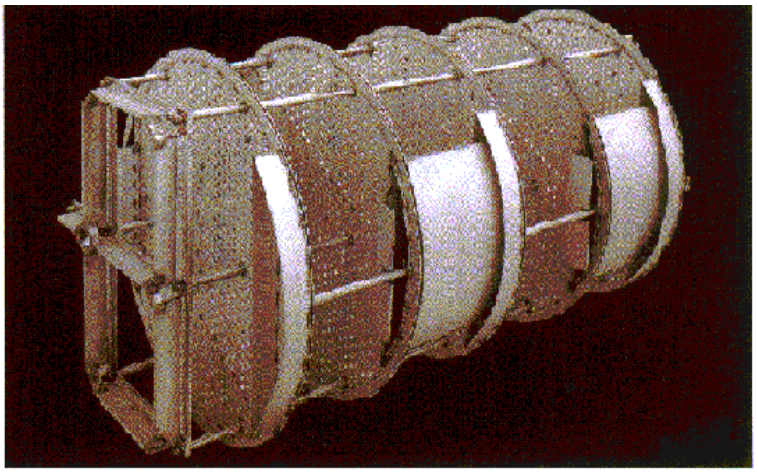
برج‌های سینی‌دار مهمترین نوع برج‌هایی هستند که در مراکز مهم صنعتی مانند پالایشگاهها از آنها استفاده می‌شود. لفظ سینی‌دار به این دلیل به این برج‌ها اطلاق می‌شود که داخل برج به فواصل معینی صفحه‌های فلزی سوراخداری که بعداً در مورد آنها بحث می‌کنیم قرار داده شده است. این برج‌ها به ارتفاعهای مختلفی ساخته

می‌شود که ممکن است از چند متر تا بیش از 50 متر متغیر باشد. قطر این برج‌ها نیز ممکن است تا بیش از 5 متر هم ساخته شود.



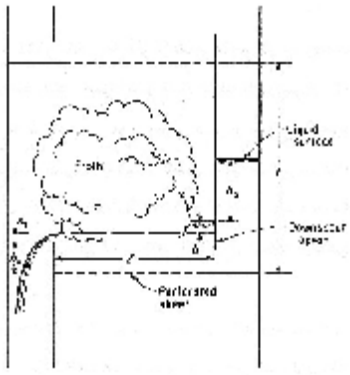




شکل 2-4- الف. برج تقطیر سینی دار(با سینی های متفاوت)
ب. برج تقطیر سینی دار



شـــــــــکل 2-5- تصـــــــــویری از قسـمت‌هـای داخلـی یک برج سـینی‌دار بـه طور افقی

بحث سینی‌ها یکی از گسترده‌ترین مباحث مربوط به برج است که طی سالهای اخیر محققان را بر آن داشته تا سینی‌هایی با شکلها و کاربردهای مختلف طراحی کنند. سینی‌ها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد که در زیر به این تقسیم‌بندی اشاره می‌کنیم.



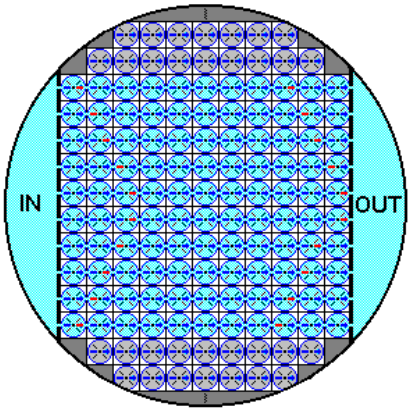
شکل 2-6- عملکرد یک سینی در داخل ستون

### 2-2-1-1- سینی‌های غربالی (Sieve Tray)

سینی غربالی عبارت است از یک صفحه مشبک که از سوراخهای آن حبابهای گاز تولید و پس از گذشتن از لایه مایع روی سینی به سمت بالا حرکت می‌کند(شکل 2-7).

از مزایـای ایـن سـینی‌هـا بـه مـی‌تـوان قیمـت ارزان آنهـا و همچنـین ظرفیـت بـالا در مقایسـه بـا انـواع دریچه‌ای(Valve) و فنجانی(Cap ) اشاره کرد. مزیت دیگر این سینی‌ها افت فشار کـم آنهـا اسـت کـه مجموعـاً

باعث شده که در طراحی‌ها در صورتی که مشکل عمده‌ای در میان نباشد به عنوان اولین انتخاب در نظر گرفته شود.



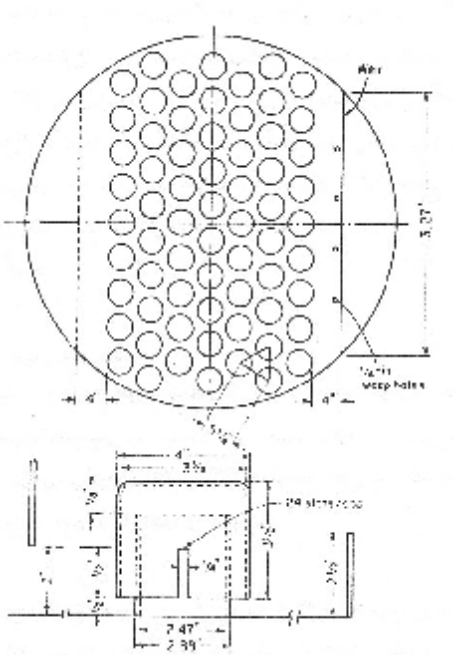

الف

ب

شکل 2-7- الف- یک سینی غربالی
ب- قسمتی از یک سینی غربالی

### 2-2-1-2- سینی‌های دریچه‌ای (Valve Tray)

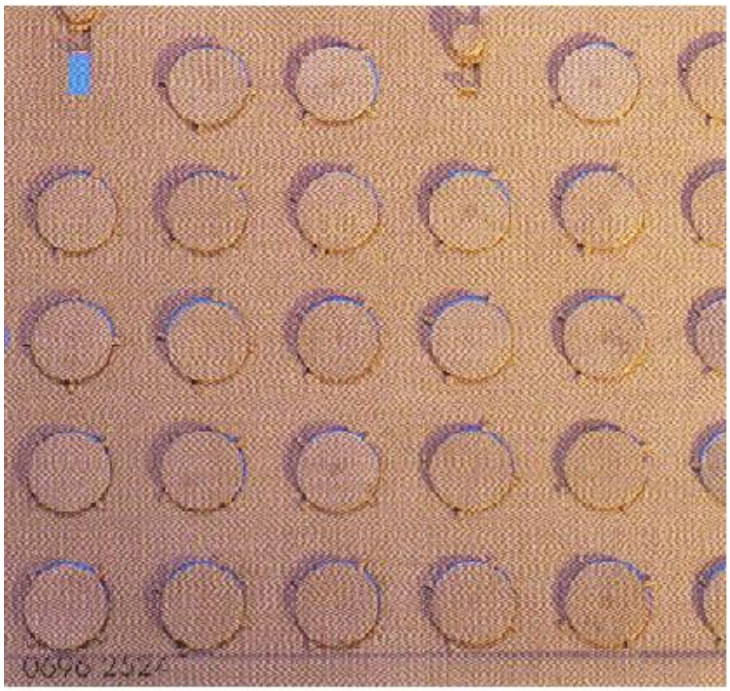
این نوع از سینی عبارت است از یک صفحه سوراخدار که هر سوراخ مجهز به یک صفحه کوچک (دیسک) متحرک است. سوراخها و صفحه ممکن است مدور و یا مستطیل‌شکل باشند. در دبی کم بخار، صفحه بر روی سوراخ مستقر شده و آنرا به نحوی می‌پوشاند که مایع چکه نکند. با افزایش دبیِ بخار دریچه در امتداد قائم به طرف بالا حرکت کرده و مجرا را برای عبور بخار باز می‌کند. حرکت قائم صفحه توسط یک قفس یا پایه‌های نگه‌دارنده محدود می‌شود. بعلاوه پایه‌ها و قفس مانع از حرکت افقی دریچه می‌شوند.از مزایای این سینی‌ها می‌توان به قیمت مناسب آن در مقایسه با نوع Cap Tray اشاره کرد. یکی دیگر از مزایای این سینی انعطاف‌پذیری این سینی به تغییرات دبی بخار ورودی است.



شکل2- 8- نمونه ای از یک سینی و یک دریچه با جزییات

شکل 2-9-نمایی ازسینی دریچه‌ای

شکل 2-10- تعدادی از دریچه‌های موجود

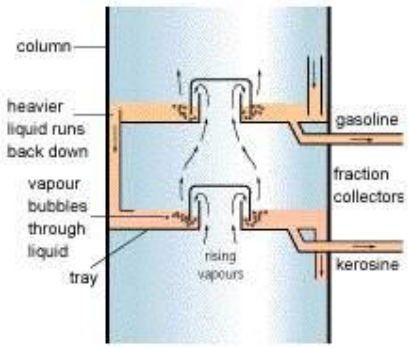


شکل 2-11- نوعی از سینی دریچه‌ای

### 2-2-1-3- سینی‌های فنجانی (Bubble Cap Tray)

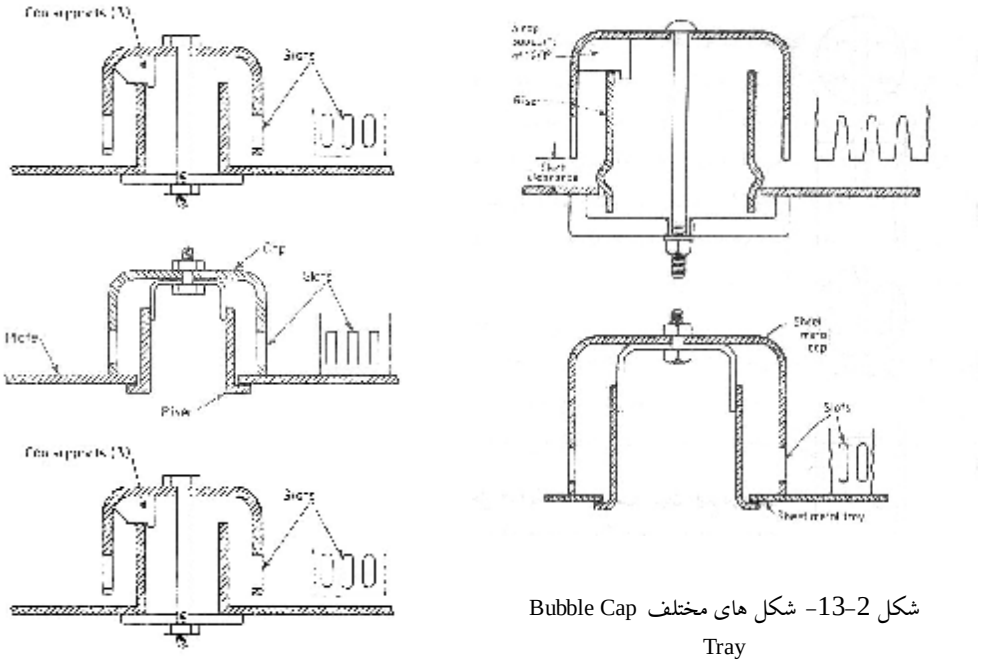
این سینی متشکل از یک صفحه سوراخدار است که روی هر سوراخ یک لوله هدایت گاز به بالا و یک فنجان وارونه وجود دارد. شکلهای متنوعی از این نوع فنجانها به بازار عرضه شده است (شکلهای 13 و 14).

در سینی فنجانی معمولاً لایه‌ای از مایع بر روی سینی باقی می‌ماند و گاز خروجی از زیر فنجان باید از داخل این لایه عبور کند(شکل 2-12).




شکل 2-12- نمایی از مسیر عبور گاز در سینی فنجانی

آرایش فنجانها معمولاً به نحوی است که در رئوس یک مثلث متساوی‌الاضلاع قرار می‌گیرند. فنجانها معمولاً به لوله بالابر گاز پیچ شده یا توسط میله‌ای به لوله یا سینی مهار می‌شوند (شکلهای 3 و15). شکافهای روی هر فنجان، مستطیلی با عرض 0/3 تا 0/95 سانتی‌متر و طول 1/3 تا 3/8 سانتی‌متر می‌باشد. فنجانهای عرضه شده به بازار از 2/5 تا 15 سانتی‌متر قطر دارند. از مزایای این سینی‌ها این است که اولاً نشتی مایع از طریق سوراخهای سینی وجود ندارد ، همچنین در دبی‌های بسیار کم گاز به خوبی عمل می‌کند.



شکل 2-13- شکل های مختلف Bubble Cap Tray

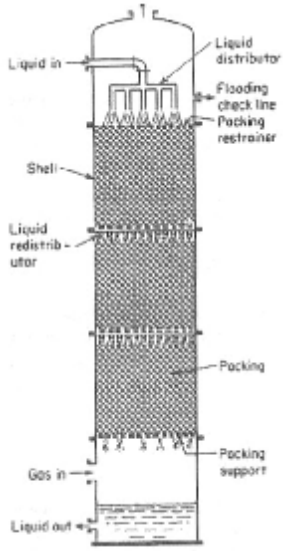
شکل 2-14- شکل یک Bubble Cap Tray

شکل 2-15- شکلهایی از یک سینی فنجانیBubble Cap Tray

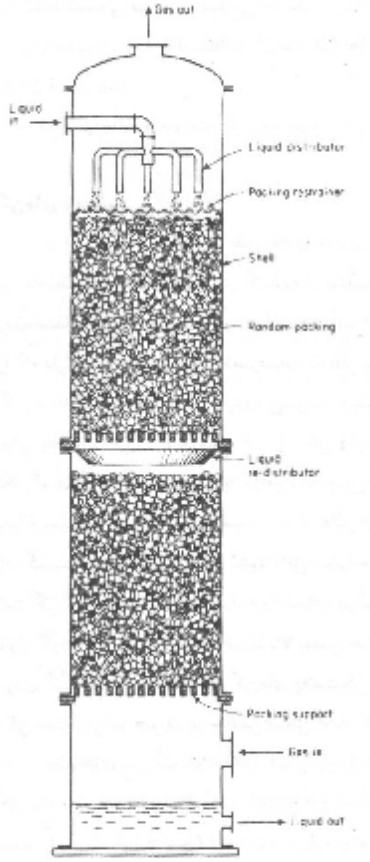
## 2-2-2- برج‌های پرشده(Packed Bed Tower)

طرز کار برج‌های پر شده به همان صورت برج‌های سینی‌دار بوده و تفاوت این دو برج را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:همانطور که گفته شد در برج‌های سینی‌دار در فواصل معین صفحات سوراخداری قرار داده شده که عمل انتقال جرم بین فازها توسط آن تسهیل می‌شود. اما در برج‌های پر شده سینی وجود ندارد بلکه تمام برج از اجسامی با جنس و شکل معین پر شده است که به این اجسام پرکن(Packing) می‌گویند.

پرکن‌ها عموماً بر دو نوع منظم و نامنظم تقسیم‌بندی می‌شوند؛ پرکن‌های منظم طی دو دهه اخیر بازار عرضه شده‌اند که در برخی موارد حتی بر سینی‌ها نیز برتری دارند. در این برج‌ها نیز همانند برج‌های سینی‌دار مایع از بالا و گاز از پایین جریان پیدا می‌کند. توزیع مایع در برج‌های پرکن حائز اهمیت بسیاری است زیرا توزیع




ب




الف

شکل 2-16- الف و ب ستونهای های پر شده

ناهمسان موجب خشک ماندن برخی قسمت‌های بستر و در نتیجه کاهش راندمان تماس گاز-مایع می‌شود.به همین خاطر انواع بسیار متنوعی از توزیع‌کننده‌ها توسط سازندگان ساخته و به بازار عرضه شده است. جهت نگه داشتن بستر پرکن یک سینی زیرین و برای جلوگیری از انبساط بستر یک سینی بالایی در برج‌های پرکن تعبیه می‌شود(شکل 17).

همانطور که گفته شد پرکن‌ها بر دو نوع منظم و نامنظم تقسیم‌بندی می‌شوند که نوع منظم آن دارای مزایای زیر است:

-افت فشار بسیار کمتر در مقایسه با سینی‌ها

-ارتفاع کمتر به ازاء تبادل جرم مساوی با سینی‌ها

-قابلیت پاسخگویی به محدوده وسیعی از دبی مایع

پرکن‌ها باید دارای خصوصیات زیر باشند:

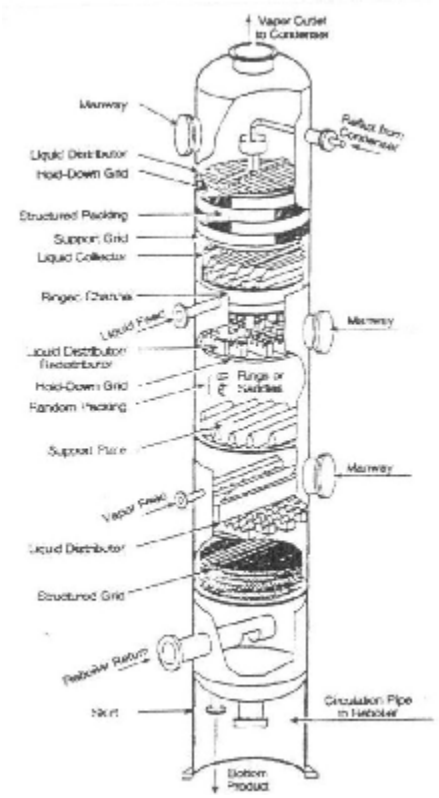
1- سطح تماس زیادی بین مایع و گاز ایجاد کنند.

2- افت فشار گاز در هنگام عبور از بستر باید کم باشد.

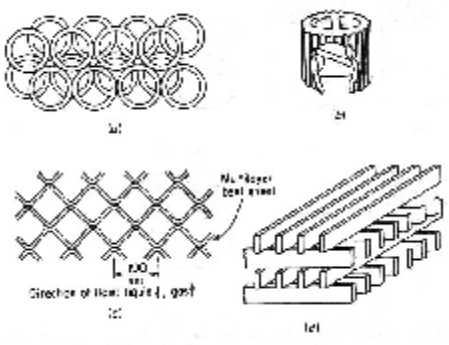
3- از لحاظ شیمیایی در مقابل سیالاتی که بکار می‌روند بی‌اثر باشند.

4- دارای استحکام باشند تا استفاده از آن به آسانی صورت گیرد.

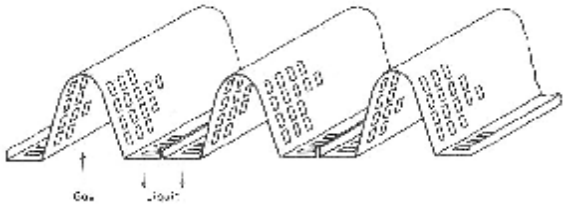
5- ارزان‌قیمت باشد.




شکل 2-17-یک ستون پر شده با ساختار داخلی

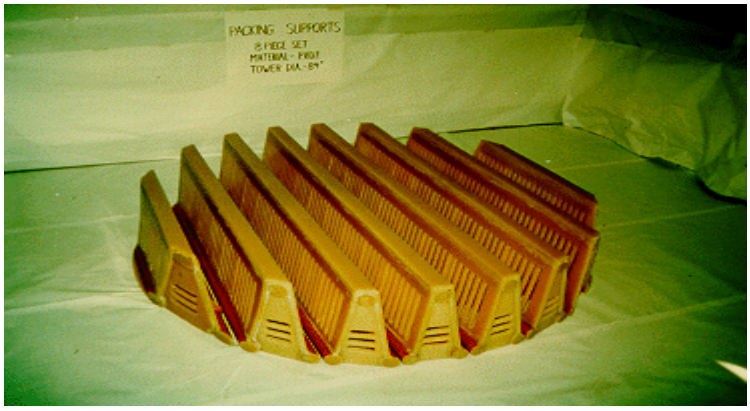


شکل 2-18 پرکن‌های منظم

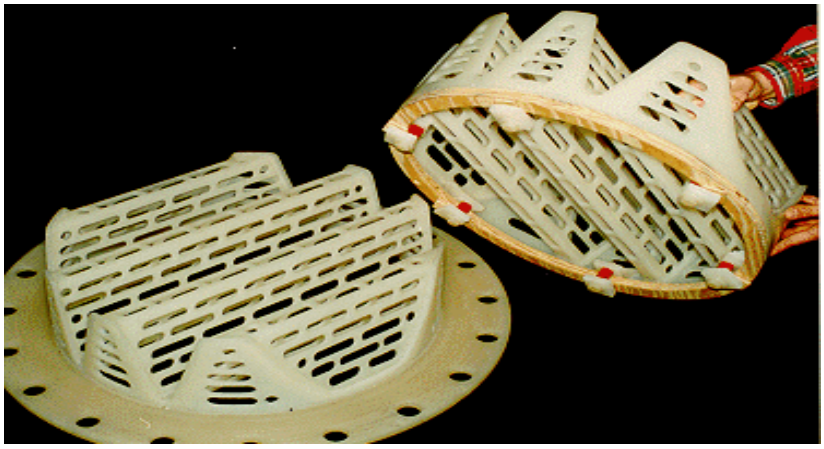


شکل 2-19- نمونه ای از صفحه نگهدارنده پر کن ها با منافذ جداگانه برای حرکت گاز و مایع

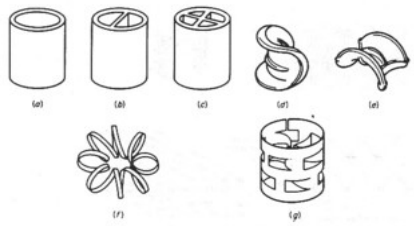
شکل 2-20- صفحه نگهدارنده پر کن




شکل 2-21- صفحه نگهدارنده پر کن ها



شکل 2-22- صفحه نگهدارنده پر کن ها



شکل 2-23- انواع پرکن ها

شکل 2-24- انواع پرکن ها

شکل 2-25- پرکن‌های نامنظم

## 2-2-3- کاربرد برج‌های تقطیر

مهمترین کاربرد برج‌های تقطیر، در تصفیه نفت خام است. محصولات حاصل از نفت خام، نظیر بنزین،نفت سفید، گازوئیل، سوختها و روغنهای روان کننده هر یک مخلوطی از صدها هیدروکربن می‌باشند. تعداد این سازندگان هیدروکربنی به اندازه ای زیاد است که تشخیص نوع و شماره آنها به آسانی امکان پذیر نیست.خوشبختانه بدست آوردن مواد خاصی از این ترکیبات مورد نظر نمی‌باشد بلکه خواص کلی آنها مطرح است. بنابراین ویژگیهای محصولات را می‌توان به صورت محدوده جوش، چگالی، ویسکوزیته و غیره در نظر گرفت.

برج‌های تقطیر در جداسازی ترکیباتی بکار می‌روندکه خواص آنها به نحوی است که به وسیله روشهای فیزیکی ساده نمی‌توان آنها را از هم جدا کرد . این روش جداسازی را بر اساس توزیع مواد بین فازهای مایع و گاز انجام می‌دهد و لذا در مواردی به کار می‌رود که کلیه سازندگان در هر دو فاز موجود باشند.شرط لازم برای اینکه بتوان از تقطیر برای جداسازی دو جزء استفاده کرد این است که نقطه جوش دو ترکیب به اندازه کافی از هم فاصله داشته باشد.

## 2-2-4- مشکلات موجود در برج‌های تقطیر

یکی از اشکالات موجود در برجها پدیده ماندگی (Entrainment) می‌باشد که همان کشیدگی قطرات مایع توسط جریان گاز می‌باشد. سرعت زیاد گاز سبب می‌شود قطرات ریزی از مایع در گازبه طرف سینی بالا حرکت کند که باعث کاهش بازده می‌شود. با افزایش (Entrainment) ارتفاع مایع زیاد شده و افت فشار گاز زیاد می‌شود در نهایت منجر به طغیان (Flooding) می‌شود، که باعث انسداد برج می‌شود و جریان گاز از وضعیت عادی خارج شده ، مایع نیز ممکن است از لوله خروجی بالای برج خارج گردد. در صورتی که شدت گاز خیلی باشد قسمت اعظم مایع ممکن است از منافذ صفحه به پایین چکه کند (Weeping) و لذا جریان مایع در سراسر سینی وجود نخواهد داشت. اگر جریان گاز فوق‌العاده کم باشد تمامی مایع از منافذ به پایین ریخته و اصولاً مایعی به محل ریزش مایع نخواهد رسید (Dumping).

مسئله مکانیکی عمده‌ای که در سینی‌های دریچه‌ای مشاهده می‌شود، سایش و خوردگی پایه‌ها و سوراخها است. حرکت قائم دریچه و حرکت دورانی دریچه‌های دوار در سوراخها موجب خستگی و سایش پایه‌ها می‌شود. کنده شدن دریچه‌ها به همین دلیل امری رایج است و مشاهده دریچه‌های کنده شده در بخش مکش پمپ یا کندانسور و یا حین تعمیرات جای تعجبی ندارد.

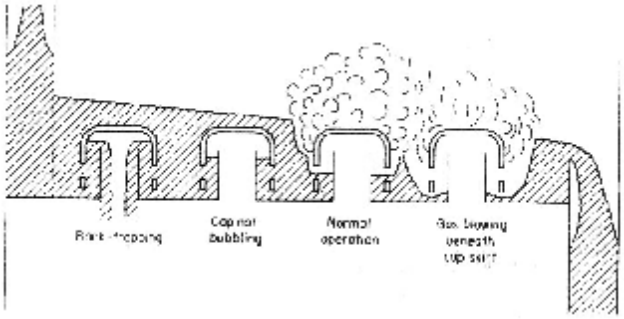
مشکل مکانیکی رایج دیگر مسئله چسبندگی دریچه به سینی است که به دلیل تشکیل رسوبات و یا محصولات خورندگی بر روی دریچه وقتی به حالت تقریباً بسته باشد رخ می‌دهد. طبعاً این چسبندگی سطح معبر بخار را کاهش می‌دهد و باعث افزایش افت فشار می‌گردد. چاره کار راهبری برج با دبی بخار زیاد است.

سرعت زیاد بخار موجب راندن رسوبات از لبه دریچه‌ها می‌شود. برای جلوگیری از چسبندگی، زائده‌های کوچکی در زیر دریچه‌ها پیش‌بینی شده که از بسته شدن کامل دریچه جلوگیری می کند.

معایبی که برای سینی‌های نوع فنجانی (Cap Tray) ذکر شده عبارتند از:

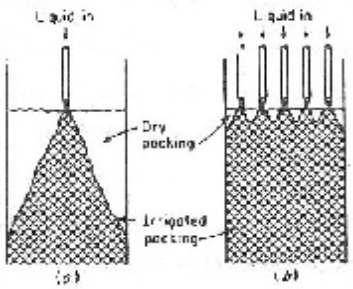
1-عبور پر پیچ و خم گاز توام با افت فشار زیادی است.

2-راندمان این سینی کمتر از سینی‌های غربالی و دریچه‌ای است.




3-دارای قیمت‌های بالاتری از نوع غربالی و دریچه‌ای هستند.

در برج‌های پرکن(Packed) پدیده ناخواسته و رایجی که ممکن است پیش آید عبارت است از جاری شدن مایع بر روی جداره برج در عوض جاری شدن بر بستر پرکن‌ها. این مشکل باعث می‌شود که پرکن‌ها خشک شده و بازدهی برج به مقدار قابل ملاحظه‌ای پایین آید. توزیع نامناسب مایع نیز از عوامل کاهش بازده در این ستون ها به شمار می آید.




شکل 2-30- توزیع نامناسب سیال

## 2-3- انواع برج‌های استخراج

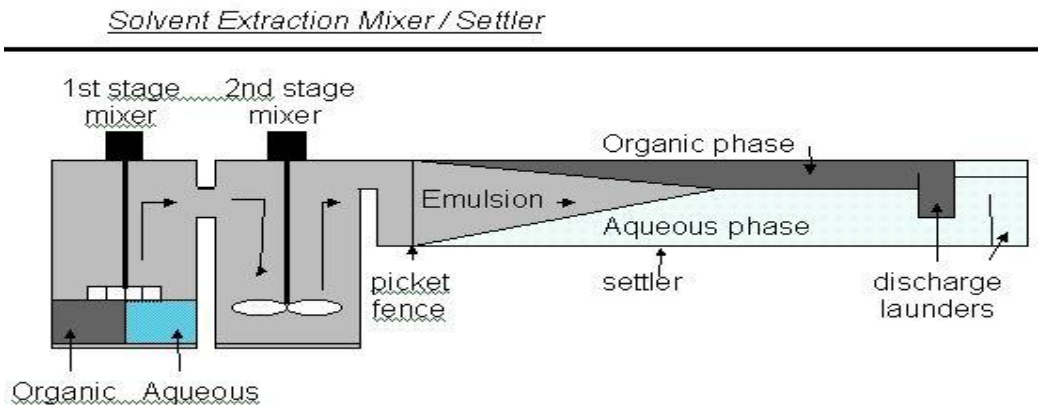
مهمترین دستگاه‌ها و برج‌هایی که در استخراج بکار برده می‌شوند عبارتند از :

- دستگاه‌های مخلوط کننده-ته‌نشین کننده(Mixer-Settlers)

- برج‌های سینی‌دار-مشبک
- برج‌های استخراج پاششی(اسپری)
- برج‌های پر شده
- برج‌های استخراج‌کننده با همزن مکانیکی
- استخراج‌کننده CM
- تماس دهنده با دیسک چرخانRDC
- ستونهای ضربه‌ای(Pulsed Columns)
-استخراج‌کننده سانتریفوژی
- برج‌های استخراج صفحه‌ای

### 2-3-1- دستگاههای مخلوط‌کننده-ته‌نشین‌کننده (Mixer-Settlers)

این نوع از دستگاه‌های استخراج عبارت است از یک مخزن همزن‌دار که فازهای مورد نظر پس از ورود با یکدیگر مخلوط می‌شوند. پس از اختلاط کامل همزن خاموش شده و فازها تحت تاثیر نیروی وزن خود از هم




شکل2-31- نحوه کار Mixer Settler

جدا می‌شوند. محصول استخراج شده به همراه حلال از طریق مجرایی در بالا و یا پایین دستگاه خارج می‌شود.

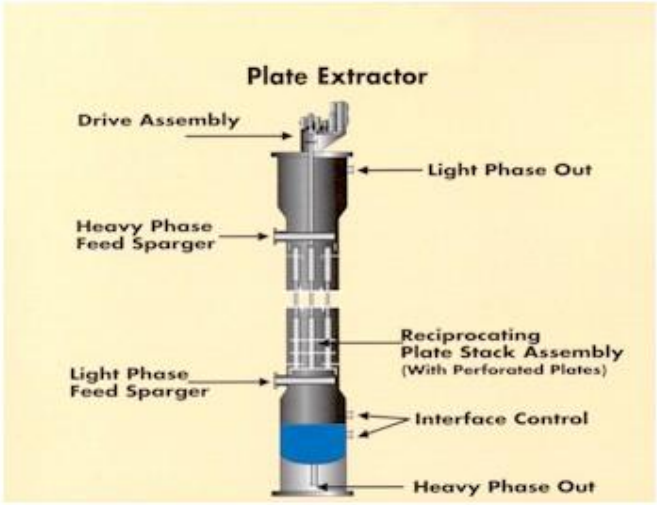
### 2-3-2- برج‌های استخراج پاششی و پرکن (Spray and packed extraction towers)

دراین برج‌ها مخلوط و ته‌نشین شدن به طور همزمان و پیوسته صورت می‌گیرد. در برج پاششی مایع سبک‌تر از پایین وارد و با عبور از قسمتی شبیه به آب‌پاش به صورت قطرات کوچک پخش می‌شود. قطرات مایع سبک از داخل توده مایع سنگین که به طور پیوسته به طرف پایین حرکت می‌کند عبور کرده و به طرف بالا می‌روند. این قطرات در حین بالا رفتن انتقال جرم را انجام داده و بالای برج به هم ملحق می‌شوند.

در روش گفته شده فاز سبک پراکنده و فاز سنگین پیوسته است. عکس این حالت نیز ممکن است، بدین صورت که فاز سنگین در قسمت فوقانی ستون در فاز سبک پاشیده می‌شود و به صورت پراکنده از داخل جریان پیوسته مایع سبک، به طرف پایین حرکت کند. به منظور ایجاد سطح تماس بیشتر فاز دارای شدت جریان بیشتر را پراکنده می‌کنند، اما اگر اختلاف ویسکوزیته بالا باشد، فاز دارای ویسکوزیته بالاتر را برای افزایش سرعت ته‌نشینی پراکنده می‌کنند.

### 2-3-3- برج‌های دارای سینی مشبک (Plate Tower)

طرز کار این نوع از برج‌ها به صورت برج‌های پاششی است با این تفاوت که در داخل این برج‌ها به فاصله‌های معین سینی‌های سوراخداری قرار داده شده است. در این سینی قطر سوراخها 1/5 تا 4/5 میلی‌متر و فاصله آنها از یکدیگر 1/5 تا 6 میلی‌متر است.در این سینی‌ها معمولاً مایع سبک فاز پراکنده را تشکیل می‌دهد به طوری که در زیر هر سینی لایه‌ای از مایع تشکیل می‌گردد که به درون مایع سنگین پاشیده می‌شود.




شکل2-32- نمایی از Plate Extractor

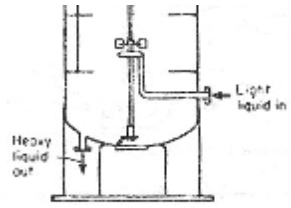
### 2-3-4- برج‌های استخراج صفحه‌ای (Baffle tower)

این گونه از برج‌های استخراج صفحه‌هایی افقی دارند که مایع سنگین از بالای هر صفحه جریان یافته و از لبه به داخل فازسنگین و به طرف بالا پاشیده می‌شود. در این نوع از برج‌ها فاصله بین صفحه‌ها در حدود 100 تا 150 میلی‌متر است.

### 2-3-5- برج‌های استخراج همزن‌دار

در این نوع از برج‌های استخراج، انرژی مکانیکی لازم را همزنهای داخلی نصب شده روی میله دوار مرکزی تامین می‌سازد. دیسک‌های مسطح مایعات را پراکنده و به طرف دیواره برج می‌رانند. در آنجا حلقه‌های

شکل 2-33- نمونه‌ای از سینی‌های مورد استفاده در Plate Tower

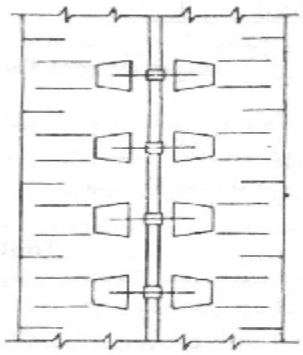



شکل 2-34- برج‌های استخراج همزن‌دار

استاتور (Stator rings) مناطق ساکنی را ایجاد کرده و دو فاز از یکدیگر جدا می‌شوند.

### 2-3-6- استخراج‌کننده CM

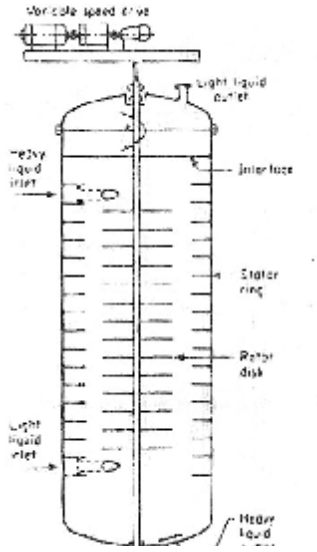
شکل زیر قسمتی از این استخراج‌کننده را نشان می‌دهد. این دستگاه از پره‌های توربینی دیسکی با پره‌های ساخت برای پخش و مخلوط کردن مایعات استفاده می‌کند و صفحات افقی برای کاهش اختلاط محوری استفاده می‌نماید.



شکل 2-35- استخراج‌کننده CM

## 2-3-7- تماس دهنده (استخراج‌کننده) با دیسک چرخان RDC

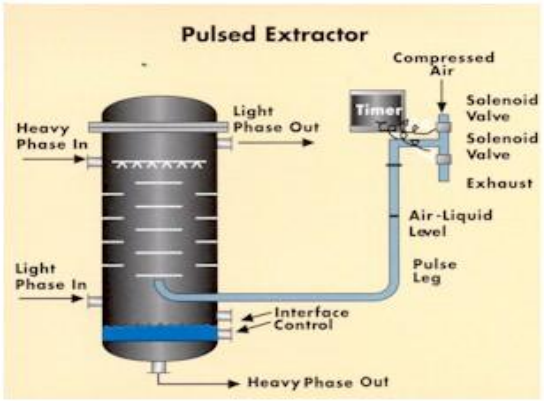
این دستگاه خیلی مشابه قبلی است با این تفاوت که بافل‌های عمودی در آن وجود ندارد و همزدن در اثر دیسک‌های چرخان انجام می‌شود که معمولاً سرعت بیشتری از پره‌های توربینی دارند.




شکل 2-36- استخراج‌کننده با دیسک چرخان RDC

## 2-3-8- ستونهای ضربه‌ای (Pulsed Columns)

در این دستگاه پالسی به صورت هیدرولیکی به مایع داخل ستون اعمال می‌شود. چون این استخراج‌کننده‌ها هیچ قسمت متحرکی ندارند خیلی عملی هستند. صفحات سوراخ‌دار، طوری سوراخ شده‌اند که جریان عادی در آنها رخ نمی‌دهد. عمل نوسان که روی مایعات انجام می‌شود، مایعات سبک و سنگین را از سوراخ‌ها عبور می‌دهد. ستون‌های پر شده نیز می‌توانند به صورت ضربه‌ای عمل کنند. در این دستگاه شدت انتقال جرم در برابر افزایش هزینه انرژی، افزایش می‌یابد.



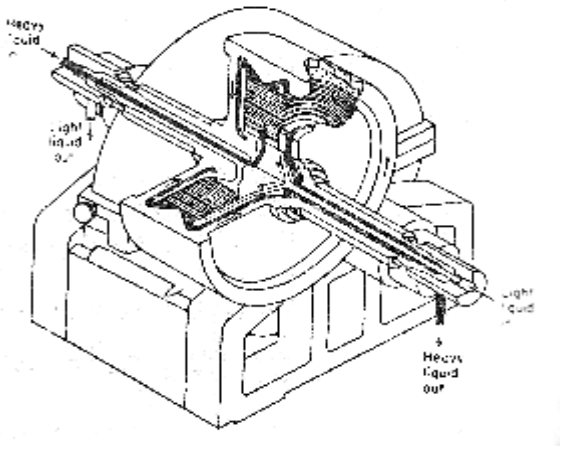

شکل 2-37- نمایی از Pulsed Column

در این نوع از ستونها فرایند هم زدن با دستگاههای خارجی انجام می‌گیرد. یک پمپ رفت و برگشتی با ضربه‌های متوالی تمام محتویات برج را در فواصل زمانی خاصی حرکت می‌دهد تا این حرکت تناوبی باعث ایجاد اختلاط در فازهای موجود در برج گردد.

### 2-3-9- دستگاههای گریز از مرکز (Centrifugal Extractors)

این دستگاه دارای محفظه‌ای معمولاً استوانه‌ای شکل است که حول محوری با سرعت بالا می‌تواند بچرخد. حلال و ترکیب مورد نظر در داخل محفظه قرار داده شده و نیروی گریز از مرکز به وجود آمده باعث می‌شود که انتشار و جداسازی فازها شتاب بیشتری بگیرد.

دستگاههای گریز از مرکز گران‌قیمت بوده و کاربردهای نسبتاً محدودی دارند. از مزایای این دستگاه تعداد تماس زیاد در یک فضای کوچک و در زمان کوتاه است.



شکل 2- 39- استخراج کننده سانتریفوژی

شکل 2-40- نمونه‌ای از دستگاه‌های سانتریفوژی

## 2-3-10- کاربرد برج‌های استخراج

اگر جداسازی از طریق تقطیر کارایی لازم را نداشته و یا خیلی دشوار باشد به جای آن می‌توان از استخراج مایع- مایع استفاده کرد. مخلوطهایی که نقطه جوش نزدیک به هم دارند را می‌توان به وسیله این روش از هم جدا کرد. اجزای روغن‌های مخصوص روغن‌کاری با نقطه جوش بالاتر از 300 درجه را با حلالهایی نظیر فنل، فورفورال یا متیل‌پیرولیدون که قطبیت کمی دارند جدا می‌کنند.

در انتخاب یکی از دو عمل استخراج یا تقطیر، معمولاً تقطیر انتخاب می‌شود هرچند که نیاز به سیستمهای گرم‌کننده و سردکننده می‌باشد. در استخراج، حلال را مجدداً باید بازیابی کرد که این راه معمولاً از طریق تقطیر صورت می‌گیرد. البته تلفیق این دو عملیات پیچیده‌تر و گرانتر از تقطیر معمولی بدون استخراج است.

بعضی از برج‌های جداسازی کاربردهای ویژه‌ای دارند. مثلاً برج‌های ضربه‌ای برای استخراج مایعات رادیواکتیو و بسیار خورنده استفاده میشود. همچنین برای استخراج محصولات حساسی مانند ویتامین‌ها معمولاً از دستگاههای گریز از مرکز که در آنها زمان ماند بسیار کوتاه است استفاده می‌شود.

### 2-3-11- مشکلات موجود در برج‌های استخراج

همانطور که توضیح داده شد در برج‌های جداسازی پس از اینکه عمل اختلاط صورت گرفت، ذرات مایع پراکنده شده به هم ملحق می‌شود و جریان خروجی از برج را تشکیل می‌دهند. اما مشکل عمده با مایعاتی است که به راحتی امولسیون تشکیل می‌دهند، زیرا ذرات این مایعات به همان صورت مجزا باقی مانده و عمل جداسازی را بسیار مشکل می‌کنند. یکی از راههای رفع این مشکل این است که خروجی مخلوط شده را از صفحه‌ای از جنس فایبرگلاس عبور دهند تا قطره‌های پراکنده شده به یکدیگر متصل و در اثر نیروی وزن ته‌نشین شوند. در جداسازیهایی که این روش به خوبی عمل نکند از دستگاههای گریز از مرکز استفاده می‌شود.

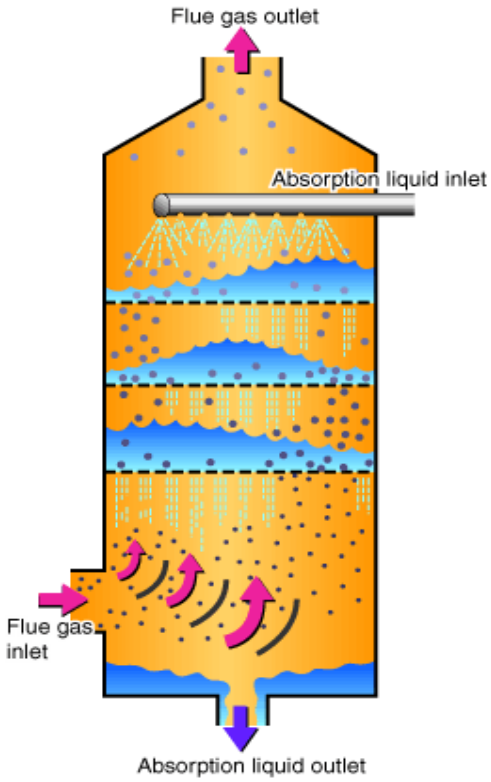
مشکل عمده دیگری که در برج‌های استخراج روی می‌دهد به هم پیوستن قطرات پخش شده قبل از انتقال جرم کامل و رسیدن به خروجی برج است. برای رفع این مشکل گاهی داخل برج‌های استخراج سینی‌های سوراخداری قرار می‌دهند تا عمل ریز کردن قطرات کامل شود. البته در این حالت به دلیل کوچکی سوراخها احتمال گرفتگی آنها بالا می‌رود.

## 2-4- برج‌های جذب و دفع گاز

نحوه کار برجهای جذب دقیقاً همانندبرجهای تقطیر است،بنابراین به توضیح مختصری بسنده می کنیم. همانند شکل 40 گاز از پایین و مایع از بالا وارد برج شده و انتقال جرم بین فازها به وسیله پرکن‌ها تقویت می‌شود. دستگاه متداول در جذب گاز برج پرکن است. این دستگاه از یک ستون یا برج استوانه‌ای تشکیل شده که شامل ورودی گاز و فضایی برای توزیع آن در قسمت تحتانی، ورودی مایع و توزیع‌کننده در قسمت فوقانی، خروجی‌های گاز و مایع به ترتیب در قسمت فوقانی و تحتانی و توده جامد نگه‌دارنده‌ای به نام پرکن‌های برج است.

مایع ورودی که حلالی خالص یا محلول رقیقی از ماده حل شده می‌باشد توسط توزیع‌کننده در بالای پرکن‌ها توزیع می‌شود و سطوح پرکن‌ها را به طور یکنواخت مرطوب می‌کند. گاز حاوی ماده حل شده یا گاز غنی شده، وارد فضای زیر پرکن‌ها می‌شود و مخالف جریان مایع از روزنه‌های موجود در پرکن‌ها بالا می‌رود.

پرکن‌ها سطح تماس زیادی بین مایع و گاز فراهم می‌کنند و تماس نزدیک بین فازها را تقویت می‌نمایند. ماده حل شده در گاز غنی شده توسط مایع تازه‌ای که وارد برج می‌شود جذب و گاز رقیق از بالا خارج می‌شود. هرچه مایع به طرف پایین برج حرکت می‌کند از ماده حل شده غنی‌تر می‌گردد.




شکل 2- 41- نحوه کار برج تقطیر

### 2-4-1- انواع برجهای جذب

تقسیم‌بندی این نوع از برجها همانند برجهای تقطیر است یعنی شامل برجهای سینی‌دار و پرکن هستند.

### 2-4-2- مشکلات موجود در برجهای جذب

یکی از مشکلاتی که ممکن است در مورد پرکن‌های فلزی رخ دهد، خوردگی است. در برجهایی که حاوی محیط خورنده‌ای هستند معمولاً از پرکن‌های غیر فلزی مانند سرامیک استفاده می‌شود. مشکلات گفته شده در مورد برجهای تقطیر پر شده در اینجا نیز صادق است، مثلاً ممکن است مایع به جای انکه پرکن‌ها را مرطوب کند بر روی جداره برج جاری شود. این مشکل باعث پایین آمدن بازده به مقدار زیادی می‌شود.

فصل سوم

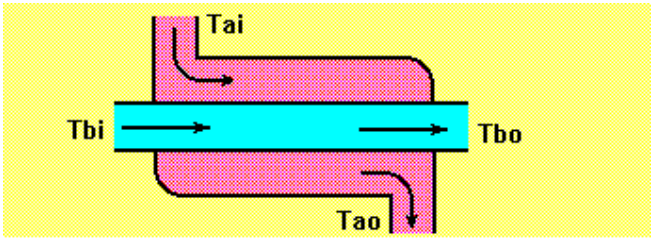
# مبدلهای حرارتی
# Heat Exchangers

## 3-1- شرح و توصیف

مبدلها وسایلی هستند که در صنعت برای انتقال حرارت بین دو سیال بکار می‌روند. در ابتدا سعی می‌شود تا آنجا که ممکن است برای گرم کردن و سرد کردن جریانها از خود سیالهای موجود در فرایند استفاده شود.بعد از حداکثر کردن میزان بازیافت حرارت در شبکه مبدل حرارتی بارهای گرمایشی و سرمایشی که از طریق بازیافت حرارت تامین نشده اند باید توسط سرویسهای جانبی((Utility تهیه شوند.مکانیزم انتقال حرارت بصورت جابجایی و هدایت می‌باشد.

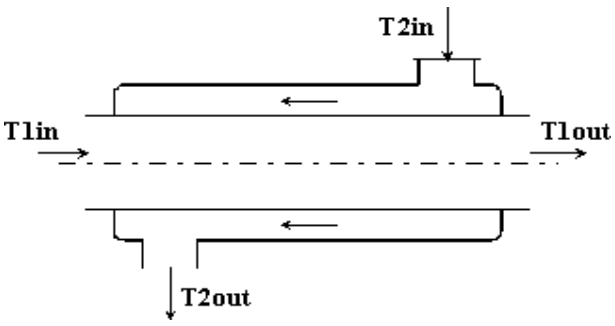
نحوه قرار گرفتن سیالها در کنار یکدیگر می‌تواند به چندین صورت مختلف باشد:

- جریان همسو(co-current) :دو سیال از یک طرف مبدل وارد شده و هر دو از طرف دیگر خارج می‌شوند. بعضی در مبدل نیز هردو در یک سو حرکت می‌کنند. نتیجتاً در مبدل نیز هر دو در یک سو حرکت می‌کنند(شکل3-1).



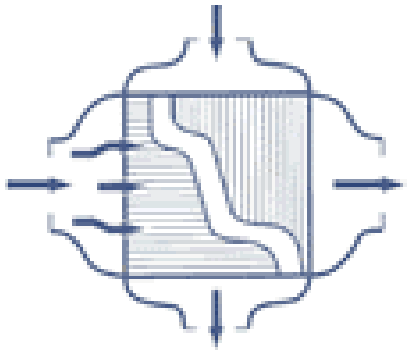

شکل 3-1- جریان‌های همسو

- جریان ناهمسو(counter-current): هرکدام از سیال‌ها از جهات مخالف وارد و خارج می‌شوند ( یکی از سیال‌ها از یک جهت و سیال دیگر از جهت دیگر وارد می‌شود) و دو سیال در مبدل به صورت ناهمسو جریان دارند(شکل 3-2).



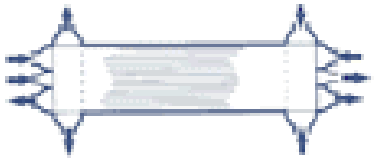

شکل 3-2- جریان‌های ناهمسو

- جریان متقاطع (cross-flow): یکی از سیال‌ها از یک جهت و سیال دیگر در جهت عمود بر آن جریان دارد. مشخص‌ترین نمونه آن رادیاتور ماشین می‌باشد که جریان آب از بالا به پایین در لوله‌ها و جریان هوا عمود بر آن می‌باشد(شکل 3-3).



شکل 3-3- جریان‌های متقاطع

- جریان چندگذر (multi pass):که در آنها جریان‌های دو سیال به صورت چندتایی در مبدل چیده شده‌اند (شکل 3-4).



شکل 3-4- جریان‌های چند گذر

## 3-2- تقسیم‌بندی مبدلها

مبدلها را می‌توان از جهات گوناگون تقسیم‌بندی کرد. ابتدا عناوین این تقسیم‌بندی ذکر می‌گردد و سپس در مورد هرکدام توضیحاتی ارائه می‌شود.

### 3-2-1- تقسیم‌بندی بر اساس خصوصیات سیالهایی که در مبدلها جریان دارد

این تقسیم بندی بر اساس سیال فرایندی مبدل شکل گرفته است. البته تفاوت بین ضرایب انتقال حرارت گازها و مایعات در تعیین شکل مبدل نقش موثری دارد.

### 3-2-1-1- مایع/ مایع

در این نوع مبدلهای حرارتی هر دو سیال مایع هستند و مکانیزم انتقال حرارت برای هردو، انتقال حرارت اجباری است. انتقال حرارت در این مبدلها به علت بالا بودن ضریب انتقال حرارت مایعات بالاست.

### 3-2-1-2- گاز/ مایع

در این مبدلها یک سیال مایع و سیال دیگر گاز است. معمولاً برای خنک نمودن سیال گرم توسط هوا استفاده می‌شود. جریان مایع با سرعت کافی داخل لوله پمپ می‌شود که این موجب بالا بودن ضریب انتقال حرارت طرف لوله‌ها می‌شود. هوا به صورت متقاطع بر روی لوله‌ها جریان می‌یابد. جریان هوا می‌تواند به صورت جابجایی اجباری یا آزاد باشد.

### 3-2-1-3- گاز/گاز

معمولاً کمتر اتفاق می‌افتد که در مبدلها هر دو سیال گاز باشند مگر اینکه یکی از گازها در فشار بالا باشد. گاز فشار بالا که دانسیته آن بیشتر است در داخل لوله‌ها جریان می‌یابد. البته ضریب انتقال حرارت در این موارد خیلی کوچک است و برای انتقال حرارت مناسب باید تدابیری اندیشید که در مباحث بعد در این مورد بحث می‌شود.

### 3-2-1-4- کندانسورها

در این مبدلهای حرارتی جریان بخار یک سیال توسط مایع(مثلاً آب) و یا جریان گاز(مثلاً هوا) خنک وکندانس می‌شود. گاهی اوقات بخار خارج لوله است مثل کندانسورهای نیروگاههای حرارتی و گاهی اوقات بخار داخل لوله است مثل کندانسورهای فرئون.

## 3-3- تقسیم‌بندی بر اساس شکل ساختمانی

تقسیم بندی مهم دیگری برای مبدلها وجود دارد که بر اساس شکل ساختمانی آنها می‌باشد. اهمیت این نوع تقسیم بندی از آنجا مشخص می‌شود که در صنعت از مبدلها با توجه به همین نوع تقسیم بندی از روی شکلشان یاد می‌شود.

### 3-3-1- مبدلهای لوله‌ای (Tubular Heat Exchanger)

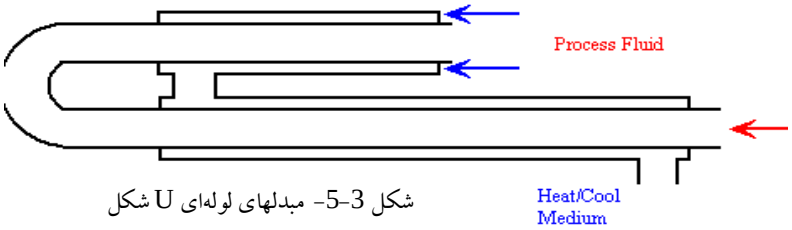
این گونه از مبدلها از دو لوله هم‌محور تشکیل شده‌اند. یکی از سیالها در داخل لوله میانی و در امتداد طول آن جریان می‌یابد و سیال دیگر در داخل حلقه بین دو لوله جریان خواهد یافت. سایر اجزاء ساختمانی این مبدلها عبارتند از :

- زانوی برگشت، — سر برگشت، - اتصالات T برای ورودی و خروجی سیالها

هنگامی که اختلاف انبساط حرارتی بین لوله خارجی و داخلی وجود دارد در کاربرد نوع اتصالات می‌باید دقت کافی شود تا تنش حرارتی مینیمم گردد.

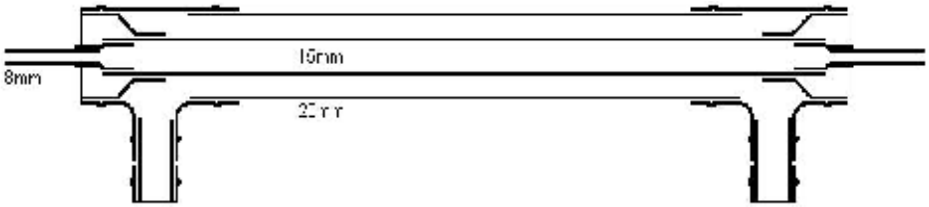
مبدلهای لوله‌ای را می‌توان بر اساس شکل تقسیم‌بندی نمود:

1- مبدلهای لوله‌ای U شکل( شکل 3-5).



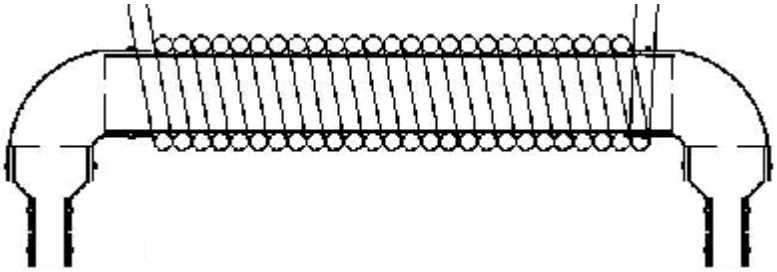

شکل 3-5- مبدلهای لوله‌ای U شکل

2- مبدلهای دو لوله‌ای ساده ( شکل 3-6).




شکل 3-6- مبدلهای دو لوله‌ای ساده

3- مبدلهای دو لوله‌ای کویل‌دار( شکل3-7).



شکل 3-7- مبدلهای دو لوله‌ای کویل‌دار

### 3-3-1-1- موارد کاربرد و مزایای مبدلهای لوله‌ای

هنگامی که ضریب انتقال حرارت سیال داخل لوله نسبت به خارج آن بزرگتر از 2:1 باشد، مثلاً داخل لوله مایعات کم‌لزج مثل آب با ضریب انتقال حرارت بالا باشد و خارج آن از مایعات لزج استفاده شود معمولاً بجای استفاده از مبدلهای پوسته و لوله از مبدلهای لوله‌ای استفاده می‌شود. البته در این موارد از پره با طول بلند که باعث افزایش سطح می‌شود، در خارج لوله استفاده می‌شود. همچنین اگر سرویسهای فشار بالا مورد نیاز باشد، مبدلهای لوله‌ای ترجیحاً استفاده می‌شود. در سرویسهای کوچک نیز از این مبدلها استفاده می‌شود.

استفاده و کاربرد زیادی که مبدهای لوله‌ای دارند به خاطر مزایای زیر می‌باشد:

این سیستم‌ها دارای انعطاف‌پذیری زیادی هستند. در طولهای مختلف و از انواع لوله‌های مختلف و از مواد مختلف ساخته می‌شوند و خیلی سریع از سوار کردن قطعات استاندارد پیش‌ساخته آماده می‌گردند. با انتخاب صحیح اتصالات به آسانی می‌توان قطعات آن را پیاده نمود تا درون و بیرون لوله‌ها تمیز شوند. محاسبات طراحی آنها به صورت دقیق و خوبی تدوین شده‌است. توزیع و پخش سیال را می‌توان در واحدهای مختلف کنترل نمود. این کار با انتخاب پمپ‌های جداگانه برای هر سری مبدل امکان پذیر است.

### 3-3-1-2- معایب مبدلهای لوله‌ای

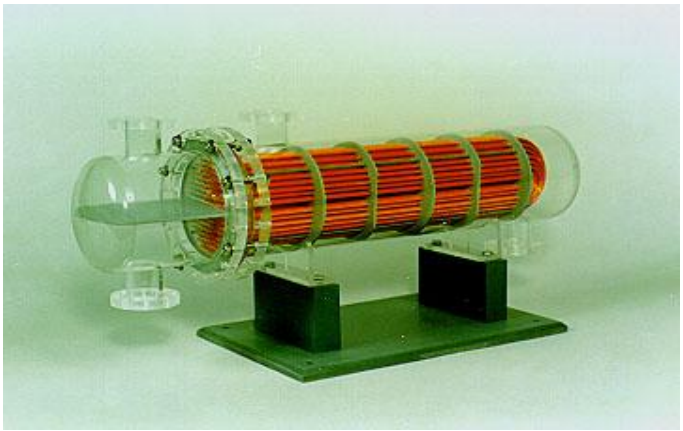
از معایب عمده این مبدلها می‌توان موارد زیر را نام برد:

1- برای بار حرارتی بزرگ، سیستم مبدلهای دولوله‌ای حجم زیادی را اشغال می‌کنند.

2- قیمت آنها برای واحد سطح انتقال حرارت نسبتاً زیاد است.

## 3-3-2- مبدلهای پوسته و لوله (Shell & Tube Heat Exchanger)

هنگامی که سطح انتقال حرارت لازم برای مبدلهای دو لوله‌ای زیاد شود (بیشتر از $50 m^2$ باشد)، بهتر است از مبدلهای پوسته و لوله استفاده شود. مبدلهای پوسته و لوله به طور وسیعی در فرایند های انتقال حرارت برای کاربردهای مایع/مایع و همچنین در کندانسورها و مولدهای بخار استفاده می‌شوند. این مبدلها برای انتقال حرارت مشخصی سطح کمتری به نسبت مبدلهای لوله‌ای اشغال می‌کنند (شکلهای 3-8، 3-9 و3-10).



شکل 3-8 - مبدلهای پوسته و لوله Shell & Tube Heat Exchanger

شکل 3- 9 - مبدلهای پوسته و لوله Shell & Tube Heat Exchanger

شکل 3-10- مبدلهای پوسته و لوله Shell & Tube Heat Exchanger

### 3-3-2-1- مزایای این‌گونه مبدل‌ها عبارتند از

1- در حجم کم ایجاد سطح بزرگی برای انتقال حرارت می‌کنند.

2- طراحی مکانیکی خوبی دارند.

3- روش ساخت تثبیت شده خوبی دارند.

4- قابلیت استفاده برای دامنه وسیعی از مواد را دارند.

5- به راحتی تجهیز می‌شوند.

6- روش طراحی خوب و تثبیت شده‌ای دارند.

### 3-3-2-2- قسمتهای اصلی این مبدلها عبارتند از

-لوله‌ها (Tubes)

- پوسته (Shell)

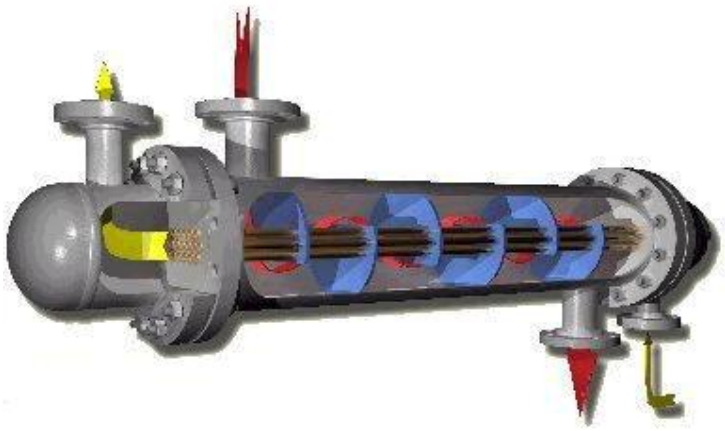
بافلها(Baffles)

-هد جلویی (Front Head)

-هد پشتی(Rear Head)

-صفحات تیوبها (Tube Sheets)

-نازلها (Nozzle)



شکل 3-11- مبدلهای پوسته و لوله Shell & Tube Heat Exchanger با اجزا اصلی

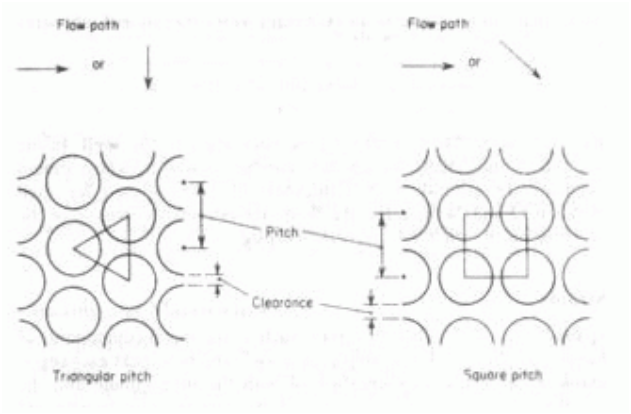
**پوسته:** پوسته‌ها که در واقع در بر گیرنده لوله‌ها هستند از نظر اندازه، مواد سازنده و ضخامت محدوده وسیعی دارند. قیمت پوسته‌ها بیشتر از لوله‌ها می‌باشد بنابراین معمولاً سعی می‌شود از حداقل پوسته استفاده شود.

**لوله‌ها(Tubes):** لوله عنصر اصلی مبدل‌های پوسته و لوله هستند که در واقع سطح انتقال حرارت لازم را برای سیالاتی که در داخل و خارج آن جریان دارند را فراهم می‌سازند. لوله‌ها معمولا از فلزات مختلف به روش اکستروژن و بدون درز ساخته می‌شوند. جنس آنها معمولاً از فولاد کم کربن، فولاد زنگ نزن، مس و ... می‌باشد. لوله‌ها ممکن است به صورت مربعی $90^{o}$ (شکل 12) یا در وضعیت چرخانده کنار هم قرار گیرند.

در این حالت تمیز کردن خارج لوله‌ها راحت‌تر است. طرح مثلثی (شکل 12) روش دیگری است که به علت زیاد بودن آشفتگی سیال، ضریب انتقال حرارت و افت فشار طرف پوسته را افزایش می‌دهد؛ و نیز مقدار بیشتری از لوله را می‌توان در قطر مشخصی از پوسته قرار داد. قطر لوله ها بین 16 mm تا 50mm ( $\frac{5}{8}$ تا 2 اینچ) می باشد. ولی معمولاً از 16 mmتا 25 mm ( $\frac{5}{8}$ تا 1 اینچ) استفاده می‌شود.طول لوله ها نیز از 8/1 m تا 3/7 m ( 6 ft تا 24 ft ) انتخاب می شود.

ضخامت لوله ها نیز با توجه به قطر آنها از 2/3 mm تا 2/1 mm انتخاب می شود.

گرچه هدف، افزایش انتقال حرارت به وسیله افزایش سرعت سیال‌ها در داخل لوله‌ها می‌باشد ولی این سرعت باید در حد مجاز باشد چون هرچقدر سرعت بیشتر شود،افت فشار افزایش می‌یابد وهمچنین نوسانات بیشتر می‌شود و باعث ایجاد شکستگی در اتصالات و زانویی‌ها می‌شود.




شکل 3-12- آرایش مثلثی و مربعی لوله ها

**بافل‌ها(Baffles)**: بافل‌ها معمولاً در قسمت پوسته مبدل استفاده می‌شوند برای اینکه لوله‌ها را در جای خود نگه دارند و جریان سیال داخل پوسته را به صورت چرخشی تبدیل کنند تا سرعت سیال و ضریب انتقال حرارت افزایش یابد و معمولاً به صورت‌های Segmental baffle, disk-and-doughnut baffle,orifice baffle (شکلهای 15،16و17)می‌باشند.

بافل‌ها دو مشخصه اصلی دارند: برش بافل(Baffle Cut)، فاصله بافل ها ($L_b$) Baffle Spacing)

فاصله بافل ها ($L_b$) Baffle Spacing) : فاصله دو بافل متوالی می‌باشد که معمولاً بین 20٪ تا 100٪ قطر پوسته انتخاب می‌شود و مقدار بهینه آن بین 30٪ تا 50٪ قطر پوسته می‌باشد.

هرچقدر $L_b$ کمتر باشد سرعت و افت فشار در پوسته بیشتر می‌شود.

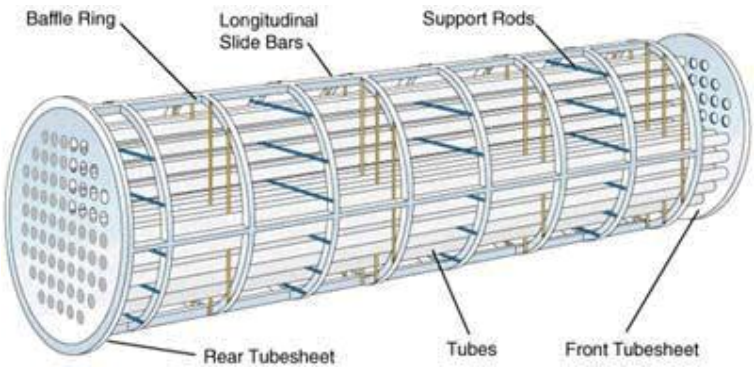
برش بافل Baffle Cut : ارتفاع بریده شده از بافل نسبت به قطر می‌باشد که معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود و معمولاً 25٪ می‌باشد.

شکل 3-13- نمایش لوله ها در یک کلاف لوله Boundle Tube

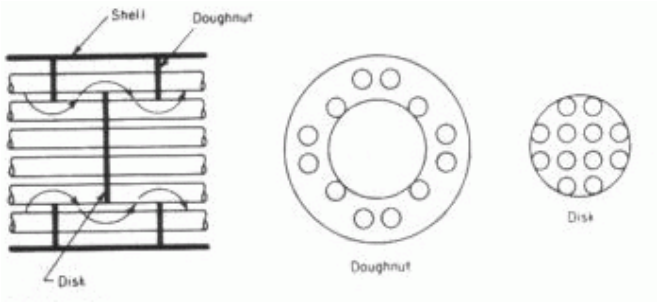
هرچقدر Baffle Cut کمتر یا طول بریده شده کمتر شود سرعت و ضریب انتقال حرارت و افت فشار بیشتر می‌شود.

بافل‌ها را می‌توان به دو دسته بافل‌های طولی Longitudinal Baffles و بافل‌های متقاطع یا مورب Transver Baffles نیز تقسیم‌بندی کرد که معمولاً به صورت زاویه‌دار با لوله‌ها قرار می‌گیرند و باعث ایجاد جریان ناآرام در اطراف پوسته می‌شوند.

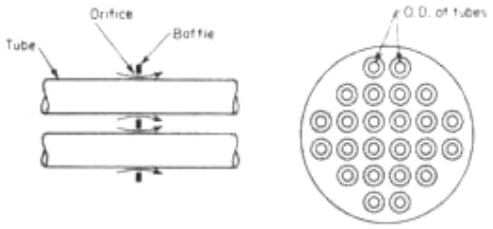
بافلهای طولی برای کنترل مسیر جریان داخل پوسته استفاده می‌شوند.



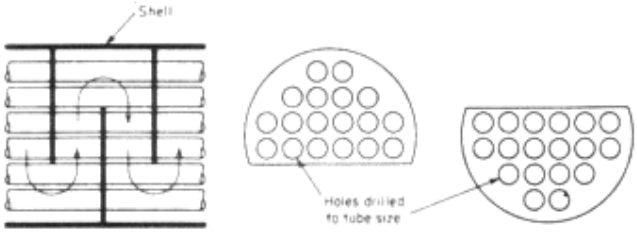

شکل 3-14- نمایی از اجزا یک مبدل پوسته و لوله شامل صفحه تیوب، لوله ها و بافل ها




شکل 3-15- disk-and-doughnut baffle




شکل 3-16 - orifice baffle



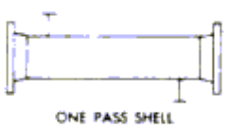

شکل 3-17- Segmental Baffles

شکل 3-18- آرایش مثلثی لوله ها ،صفحه تیوب و بافل ها در یک مبدل پوسته و لوله

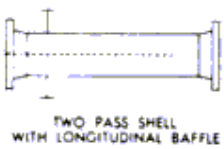
**صفحه تیوب(Tube Sheet) :** یکی از اجزای مهم مبدلها که اصلی‌ترین سد بین تیوبها و پوسته است و طراحی مناسب آنها برای اطمینان از کارایی سیستم لازم است، صفحه تیوبها هستند.نحوه اتصال آنها به تیوبها و پوسته هم می‌تواند به صورت جوش داده شده و هم به وسیله پیچ باشد.

شکل 3- 19- آرایش مثلثی لوله ها ،صفحه تیوب و بافل ها در یک مبدل پوسته و لوله

**تعداد گذرهای پوسته و لوله:**ساده‌ترین مدل جریان برای لوله‌ها به این صورت است که سیال از یک طرف وارد شود و از طرف دیگر خارج گردد. این مدل تک‌گذر لوله است. برای بهتر نمودن انتقال حرارت سرعت بالاتری باید ایجاد نمود . این عمل به وسیله افزایش تعداد گذر لوله‌ها امکان‌پذیر است. از طرف دیگر با افزایش تعداد گذرهای لوله و افزایش سرعت سیال ، افت فشار زیاد می‌شود. در واقع انتقال حرارت باید در سرعتهای بالا ایجاد شود واین افت فشار سیستم را زیاد می‌کند.در نتیجه تعداد گذرها، با توجه به دو فاکتور سرعت و افت فشار مشخص می‌شود. تعداد گذرهای لوله معمولاً از یک تا هشت می‌باشد. در موردگذرهای پوسته نیز معمولا از یک یا دو گذر استفاده می‌شود.حالتهای مختلف گذرهای پوسته در استاندارد بین المللی TEMA با علامتهای E,F,G,H,J,K,X شناخته می‌شوند(شکلهای 3-20 تا 3-26) .

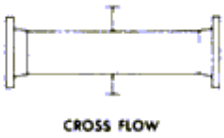



شکل 3-20- پوسته E

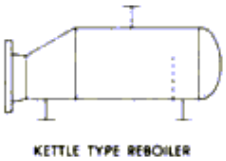



شکل3-21- پوسته F

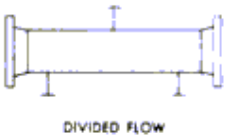
شکل 3-22- پوسته G



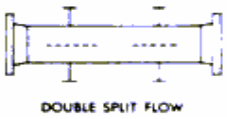

شکل 3-25- پوسته X




شکل 3-24- پوسته K




شکل 3-23- پوسته J




شکل 3-26- پوسته H

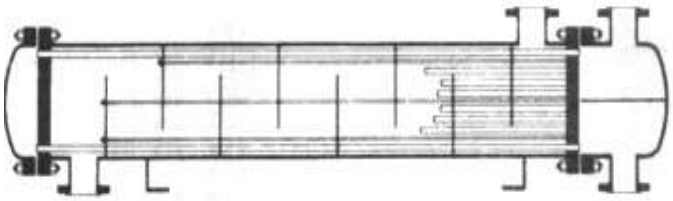
**نازلها**: نازلها برای انتقال سیال به بیرون و یا داخل مبدل استفاده می‌شوند.

### 3-3-2-3- اثرات حرارتی

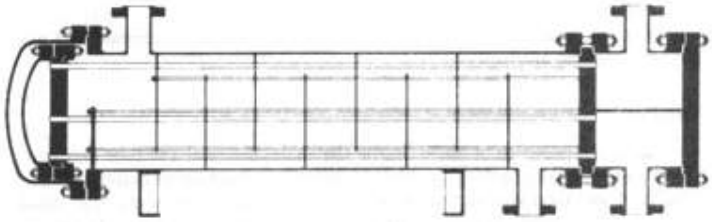
اگر مواد مانند آهن بکار رفته شده در مبدل‌ها حرارت ببینند ممکن است دچار انبساط حرارتی گردند. به عنوان مثال در یک مبدل پوسته و لوله افزایش درجه حرارت باعث افزایش اندازه لوله‌ها و پوسته می‌شود. از آنجایی که این افزایش ها ممکن است با هم فرق کنند، تنظیم‌های مختلفی برای کاهش این اثرات حرارتی وجود دارد. شکل (27) یک صفحه تیوب ثابت و بدون امکان انبساط می‌باشد. در شکل‌های (28) و (29) دو مبدل با کلگی‌های متحرک یا اتصالات متحرک برای کاهش میزان استرس ناشی از انبساط حرارتی می‌باشند. این استرس‌های حرارتی با استفاده از لوله‌های Uشکل نیز قابل جلوگیری می‌باشند.

استفاده از مبدل‌ها با کلگی‌های ثابت برای زمانی که لوله‌ها کوتاه هستند یا اختلاف دما بین لوله و پوسته ماکزیمم $30\ ^{o}C$ می‌باشد استفاده می‌شود.

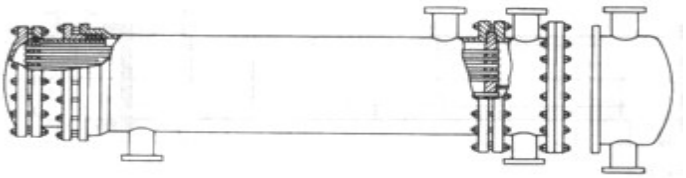
در اکثر موارد از مبدل‌ها با کلگی‌های متحرک Floating-Head استفاده می‌شود.



شکل 3-27- مبدل با صفحه تیوب ثابت با دو گذر در قسمت لوله و یک گذر در پوسته



شکل 3- 28- مبدل با کلگی متحرک floating head داخلی با دو پاس در قسمت لوله و یک پاس درپوسته



شکل 3- 29- مبدل با floating head خارجی با دو پاس در قسمت لوله و یک پاس در پوسته

شکل 3-30- مبدل پوسته و لوله

شکل 3-31- مبدل پوسته و لوله

### 3-3-2-4- انتخاب محل عبور سیال ها

تصمیم گیری برای قرار دادن سیال در داخل پوسته و لوله و اینکه کدامیک از آنها در داخل لوله قرار داده شود و کدامیک داخل پوسته، به چند عامل بستگی دارد:

1- فشارها: سیال با فشار بالادر قسمت لوله قرار می‌گیرد،زیرا ضخامت نسبی لوله (نسبت به قطر)بیشتر است.

2- درجه حرارت: افزایش درجه حرارت باعث کاهش تنش مجاز مواد بکـار رفتـه مـی گـردد و در نتیجه ضخامت لازم برای دیواره ظرف نیز افزایش می‌یابد. این تاثیر عیناً شبیه فشار است. سیال بـا درجـه حرارت زیاد بایستی در لوله جای داده شود.

3- خورندگی سیالها: برای سیالهای با خورندگی زیاد به مـواد و آلیاژهـای گرانقیمـت نیـاز اسـت. اگر فقط یکی از سیالها خورنده باشد آن وقت گـذاردن آن در داخـل لولـه باعـث مـی‌شـود کـه پوسـته گرانقیمت از آلیاژ مرغوب نیاز نباشد. اما اگر سیال خورنده در پوسته قرار بگیرد آنگاه هم برای پوسته و هم برای لوله بایستی از موادی که در مقابل خوردگی مقاوم هستند استفاده شود.

4- تمیزی سیالها: در بعضی از فرایندهای انتقال حرارت شرایط لازم جهت تمیزی سـیالها و آلـوده نشدن آنها سخت‌تر از حالتهای عادی است و ممکن است به آلیاژهای گرنقیمت نیـاز باشـد. در اینگونـه مواقع بهتر است که سیالها در داخل لوله قرار داده شوند.

5- خطر نشت:در بیشتر مبدلهای حرارتی احتمال نشت سیال لوله‌ها از سیال پوسته کمتر است.

6- ویسکوزیته سیالها: برای اینکه انتقال حرارت مـاکزیمم شـود، جریـان هـر دو سـیال مـی‌بایسـتی ناآرام باشد. در صورتی که سیال لزج در داخل لوله باشد احتمـال دارد جریـان آن آرام شـود پـس بهتـر است داخل پوسته قرار داده شود.

### 3-3-2-5- رسوب مبدلها (Fouling)

هنگامی که یک مبدل حرارتی در سرویس قرار می گیرد در شروع کار سطوح انتقال حرارت آن تمیز اسـت ولی با گذشت زمان در بعضی از سرویسها مانند سیستم‌های قدرت فرایندهای شیمیایی ، به تدریج توانایی انتقال حرارت انهاکم می‌شود. این وضعیت به علت جمع شدن موادی روی سطوح انتقال حـرارت(همـان لولـه هـا) کـه موجب افزایش مقاومت حرارتی در برابر انتقال حرارت می گردد به وجود می‌آید. یک فرایند صنعتی را در نظـر بگیرید که شامل چندین دستگاه اصلی می‌باشد. در صورتی که تمام فرایند بخواهد به خاطر اینکـه یکـی از ابـزار انتقال حرارت که توانایی خود را در فرایند انتقال حرارت از دست داده از کار بیفتد این حادثـه از نظـر اقتصـادی ناخوشایند است.

در استاندارد TEMA ضریب رسوب داده شده است تا به طراح کمـک کنـد مبـدل پوسـته و لولـه را طـوری طراحی کند که بتواند برای مدتی به طرز رضایت‌بخشی کار کند. تا اینکه دوباره مبدل از مدار خارج شود و تمیز گردد.

عواملی که باعث ایجاد رسوب می‌شوند اغلب عبارتند از:

1- وجود ذرات معلق در سیال

2- کاهش حلالیت نمک‌ها با افزایش دما (مثل نمک‌های منیزم)

3- خوردگی: یعنی تبدیل یک لایه از فلز (آهن) اکسید آن (اکسید آهن) وکه باعث کاهش ضریب رسانش می‌شود.

4- پدیده‌های بیولوژیکی (زیست محیطی):در آب رودخانه‌ها جلبک‌ها و موجودات زنده وجود دارند که با صافی جدا نمی‌شوند و داخل مبدل شروع به تکثیر می‌کنند.

5- به وجود آمدن کک:در کوره‌های نفت مقداری از نفت می‌شکند و تبدیل به کک می‌گردد و روی دیواره رسوب می‌کند.

شکل 3-32- تشکیل رسوب در مبدل

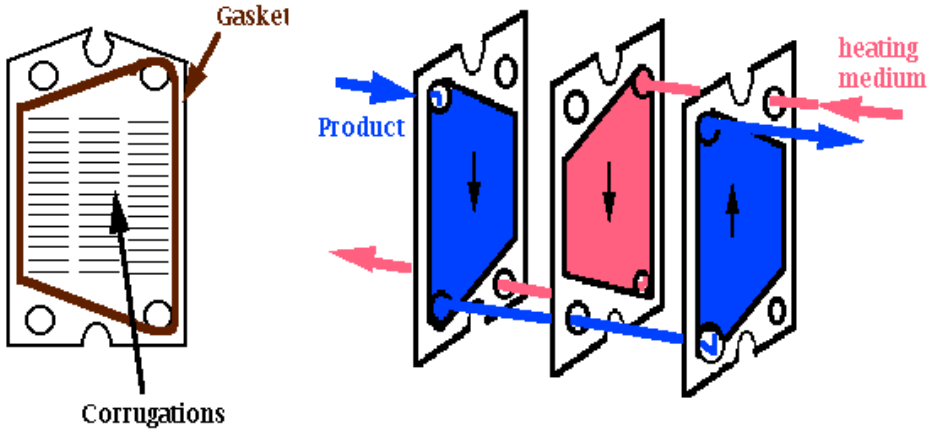
### 3-3-2-6- تمیز کردن و نگه‌داری از مبدل Cleaning & Maintenance

مبدل‌ها باید به طور متناوب تمیز شوند و لوله‌ها تعویض شوند . داخل لوله‌ها به راحتی با استفاده از مواد تمیز کننده مانند بعضی مواد اسیدی و jet آب تمیز می‌شوند. ولی تمیز کردن خارج لوله‌ها احتیاج به باز کردن لوله‌ها و کلاف لوله‌ها(Tube Bundle) از مبدل دارد.

### 3-3-3- مبدلهای صفحه‌ای (Plate heat exchanger)

مبدلهای حرارتی صفحه و قاب از قرار گرفتن یک سری صفحات فلزی در کنار یکدیگر در داخل یک قاب فلزی ساخته می‌شوند. این صفحات در داخل قاب توسط میله‌های بلند بهم فشرده می‌شوند. طول این میله‌ها فاصله بین دو درپوش را طی می‌کنند و توسط مهره به درپوش محکم می‌گردند. واشر (Gasket) در شیارهای اطراف هر صفحه قرار داده می‌شود تا جریان سیال را در مجرای باریکی بین صفحات هدایت نماید و همچنین از نشت آنها به بیرون جلوگیری کند. در گوشه‌های هر صفحه مجرایی جهت ورود و خروج سیال گرم و سرد در نظر گرفته شده است و موقعیکه صفحات روی هم فشرده می‌شوند این محلهای سوراخ شده در یک خط مستقیم قرار می‌گیرند و بدین وسیله هدرهای توزیع سیال در طول مبدل را به وجود می‌آورند.

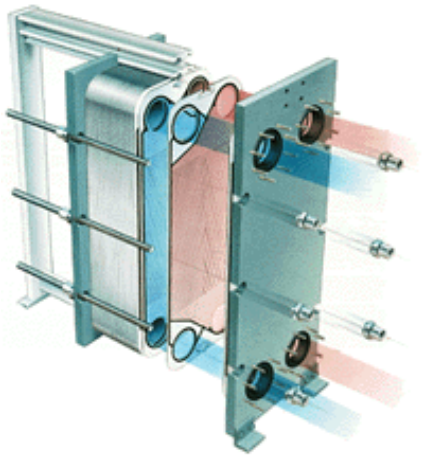
صفحات می‌توانند از هر فلزی با ابعاد معین ساخته شوند آنگاه نقوش مختلف توسط پرس و قالبهای مخصوص روی صفحات چاپ گردد. هنگامی که این صفحات در محل خود در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند شیارهای موجود روی صفحات متوالی تشکیل یک سری کانالهای باریک جریان را می‌دهند. و سیالها از طریق مجرای خیلی باریک و ظریف بین صفحات متوالی عبور می‌نمایند. در مبدلهای مختلف آرایش جریان می‌توانند متفاوت باشند. یکی از این آرایشها به صورت موازی مختلف‌الجهت می‌باشد. در این نوع ارایش جریانهای هر کدام از سیالها فقط یک بار ارتفاع صفحات را طی می‌کنند در حالیکه در آرایشهای چندگذر یک سیال ممکن است 2 بار و یا بیشتر ارتفاع مبدل را طی نماید.




شکل 3-33- جریان در مبدل صفحه‌ای

### 3-3-3-1- امتیازات و کاربردها

یکی از امتیازات مهم و اساسی مبدلهای حرارتی صفحه و قاب این است که سطح انتقال حرارت مبدل به آسانی از هم جدا می‌شوند. بعد از برداشتن مهره‌هاو میله‌های نگه‌دارنده و جداسازی صفحه متحرک انتهایی صفحات با لغزیدن روی صفحه باریکی برای معاینه از هم جدا می‌شوند. این امتیاز که صفحات به آسانی تمیز شوند و یا تعویض گردند باعث شده کاربرد این مبدلها در صنایع غذایی و لبنیات توسعه یابد. اما از دیگر امتیازات مهمی که این مبدلها نسبت به مبدلهای پوسته و لوله دارند این است که در مقایسه با مبدلهای پوسته و لوله بار حرارتی معینی حدوداً بین یک‌سوم تا یک‌چهارم انتقال حرارت لازم دارند. علتش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود. توربولانس زیاد به علت حرکت سیال در مجاری باریک و ناهموار سبب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد. فاصله نزدیک به هم صفحات مانند این است که از لوله‌های با قطر کوچک استفاده شده است که این ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. توربولانس زیاد سبب تقلیل سرعت کثیف شدن می‌شود. کاهش سطح انتقال حرارت باعث کاهش حجم و وزن می‌شود.



شکل 3-34- نمای داخلی مبدل صفحه‌ای

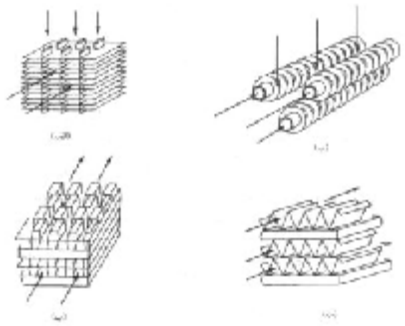
### 3-3-3-2- معایب

با وجود تمام محاسن ذکر شده یک عیب مهم در مورد این مبدلها وجود دارد و آن این است که سطوحی که باید توسط واشر آب‌بندی شود زیاد است. اغلب از مواد لاستیکی برای این کار استفاده می‌شود اما ماکزیمم فشار و درجه حرارت کاربردی نباید از 2.7 Mpas و $400\ K^{\circ}$ تجاوز نماید. از واشرهای فیبری و پمبه نسوز کمپرس شده نیز می‌توان استفاده نمود که برای آن حداکثر درجه حرارت $600\ K^{\circ}$ و 1.8 Mpas می‌باشد. یکی از مشکلاتی که معمولاً در هنگام کار این مبدلها بوجود می‌آورند عدم آب‌بندی کامل و صحیح واشرها است. اولاً به خاطر اینکه عمر مفید گازکت‌ها کم است و ثانیاً نباید دوباره مورد استفاده قرار گیرند که معمولاً به این نکته توجه نمی‌شود.

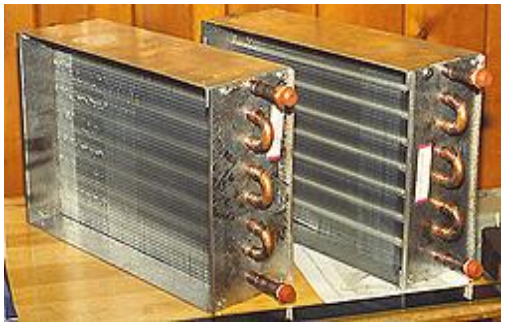
## 3-3-4- مبدلهای پره‌دار (Fin Heat Exchangers)

هنگامی که اختلاف فاحشی بین ضریب انتقال حرارت داخل و خارج لوله (در هرکدام از انواع مبدلهای ذکر شده) وجود داشته باشد از پره استفاده می‌شود(در طرفی که ضریب انتقال حرارت کمتر دارد). به عنوان مثال در مبدلهای گاز/مایع در طرف گاز از پره های بلند استفاده می‌شود و یا در مبدلهای گاز/گاز به علت کم بودن ضریب انتقال حرارت در دو طرف به وسیله فین‌ها سطح انتقال حرارت و در نتیجه میزان آن را افزایش می‌دهند.

پره ها معمولاً دارای ضخامت 0.0335 in هستند. راندمان حرارتی آنها با افزایش مقاومت حرارتی کاهش پیدا می‌کند. اگرچه لوله‌های با پره داخلی وجود دارد ولی در مبدلهای لوله‌ای بیشتر از پره های بلند طولی استفاده می‌شود که در خارج لوله تعبیه شده‌اند. پره ها می‌توانند پیچشی و منقطع نیز باشند تا بدین وسیله سیال داخل حلقه بهتر مخلوط شود. اما در عمل مشاهده می‌شود که افت فشار را به مقدار زیادی افزایش می‌دهند و به این ترتیب اثر افزایش انتقال حرارت خنثی می‌شود.



شکل 3-35- نمونه ای از پره ها



شکل 3-36- نمونه ای ازمبدل پره دار

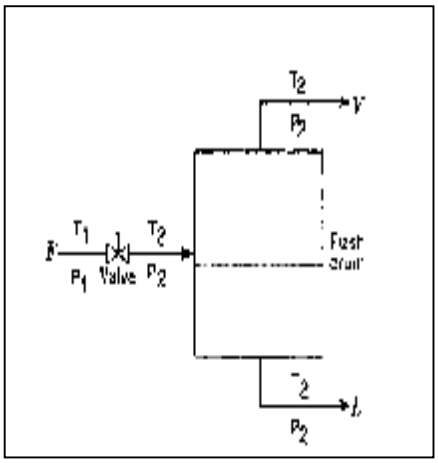
فصل چهارم

# ظرف تبخیر ناگهانی
# Flash Drums

## 4-1- شرح و توصیف

یکی از وسایلی که در اکثر واحدهای پالایشگاهی و پتروشیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند و وظایف مختلف و مهمی بر عهده دارند، ظروف تبخیر ناگهانی هستندکه در اصطلاح ظروف Flash، نامیده می‌شوند.

جریان سیال ورودی به این ظروف، در داخل ظرف به صورت دو فاز مایع و گاز در می‌آید. اساس جداسازی اجزاء مختلف در ظروف Flash، اختلاف دانسیته موجود بین اجزاء می‌باشد. به طوریکه اجزائی که دارای دانسیته بالاتری هستند از جریان مایع پایین ظرف خارج می‌شوند و اجزائی که دارای دانسیته پایین‌تری هستند از جریان گاز بالای ظرف خارج می‌شوند.

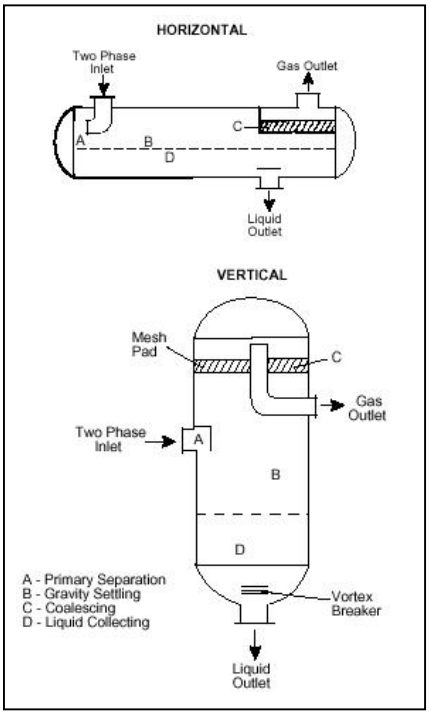



شکل 4-1- شکل شماتیک یک ظرف تبخیر ناگهانی

دوفازی شدن جریان سیال به خاطر پایین بودن نسبی فشار جریان از فشار نقطه جوش جریان می‌باشد. این فشار نسبی پایین به جریان سیال اجازه می‌دهد که به دو فاز مایع و گاز تبدیل شود. در اکثر موارد از ظروف Flash در جایی استفاده می‌شود که جریان سیال دارای این قابلیت باشد. اما اگر فشار جریان سیال از فشار نقطه جوش سیال بالاتر باشد و بخواهیم از ظرف Flash استفاده کنیم از یک شیر فشارشکن قبل از ورود جریان به ظرف Flash استفاده می‌شود تا به این وسیله فشار جریان به مقدار مطلوب برسد.

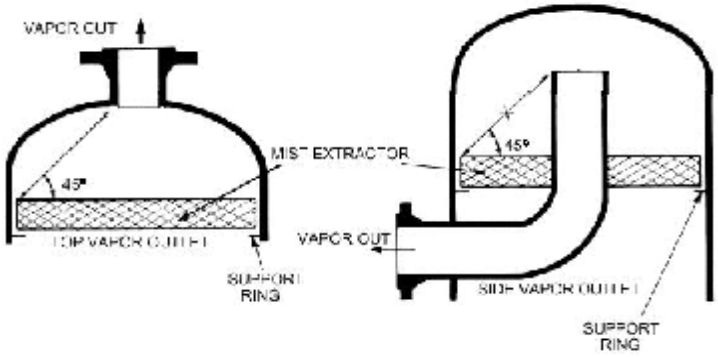
بعضی از افراد به اشتباه تصور می‌کنند که ورود جریان مایع به یک ظرف بزرگ باعث دو فازی شدن جریان می‌شود. البته با توجه به وجود فشار بخار مایعات، تبخیر کسر کوچکی از جریان مواد ورودی درست است. اما اساس کار در ظروف تبخیر ناگهانی در مورد جریان‌های مایع، عبور جریان مواد از شیر فشار شکن، ایجاد افت فشار زیاد در جریان و در نتیجه آن تبخیر کسر قابل توجهی از جریان ورودی به ظرف تبخیر ناگهانی می‌باشد. ظرف تبخیر ناگهانی نیز فضای لازم برای دو فازی شدن این سیال و امکان جداسازی این دو فاز را ایجاد می‌کند. در محل ورود جریان سیال به ظرف تبخیر ناگهانی، از یک بافل(Baffle)که به صورت یک مانع در مقابل ورود سیال به ظرف قرار گرفته است، استفاده می‌شود. وظیفه این بافل، جلوگیری از حرکت میان‌بری(Shortcut)

جریان مواد ورودی به محل خروج گاز یا بخار خروجی از ظرف می‌باشد. در مورد ظروف تبخیر ناگهانی عمودی معمولا از یک بافل(Baffle) مدور استفاده می‌شود که این بافل باعث ایجاد حرکت چرخشی مواد ورودی به ظرف می‌شود. حرکت چرخشی مواد، عامل ایجاد نیروی سانتریفوژی می‌باشد که باعث حرکت سریعتر مواد سنگین‌تر به پایین ظرف تبخیر ناگهانی می‌شود. در شکل 4-2 محل قرار گرفتن این بافل در دو ظرف تبخیر ناگهانی متفاوت نشان داده شده است.




شکل 4-2- شکل شماتیک ظروف تبخیر تاگهانی عمودی و افقی
و بافل مربوطه در هر مورد

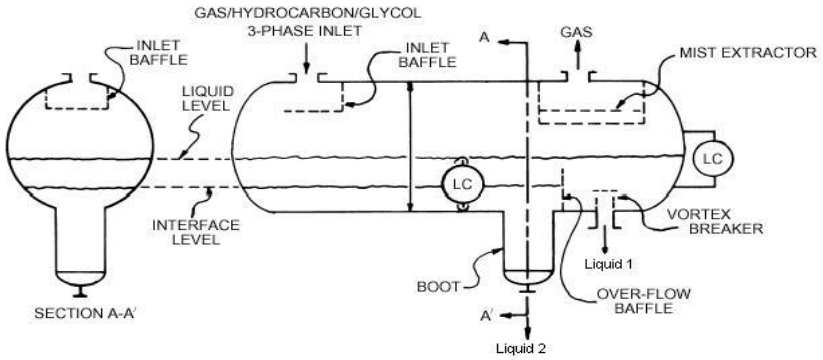
معمولاً در قسمت بالای ظروف تبخیر ناگهانی از توری‌های فلزی استفاده می‌شود. به این توری‌ها در اصطلاح Wire mesh گفته می‌شود. نقش این توری‌های فلزی جذب ذرات ریز مایع موجود در فاز بخار خروجی از ظرف تبخیر ناگهانی می‌باشد. لذا اگر ذرات ریز مایع همراه جریان بخار باشند با وجود این توری‌ها دوباره به قسمت مایع ظرف تبخیر ناگهانی بازگشت داده می‌شوند. لازم به ذکر است که وجود قطرات و ذرات ریز مایع در جریان گاز ورودی به کمپرسور می‌تواند اثرات مخربی بر کمپرسور داشته باشد. در شکل 4-3، نحوه قرار گرفتن Wire mesh دربالای ظرف تبخیر ناگهانی نشان داده شده‌است.




شکل 4-3- نحوه قرار گرفتن Wire mesh دربالای ظرف تبخیر ناگهانی

## 4-2- انواع ظروف تبخیر ناگهانی

به طور کلی ظروف تبخیر ناگهانی از تنوع زیادی در صنعت برخوردار نیستند. اما در اکثر واحدهای پالایشگاهی و در بعضی از واحدهای پتروشیمی، جداکننده‌هایی مشاهده می‌شوند که تاحدی با ظروف تبخیرمشابهند. این ظروف دارای سه جریان خروجی می‌باشند. دو جریان بخار و مایع که در مورد ظرف تبخیر ناگهانی به آنها اشاره شد، در این ظروف نیز وجود دارند. علاوه بر این دو جریان، یک جریان دیگر نیز از بخش زیرین این ظرف خارج می‌شودکه از جریان مایع دیگر سنگین‌تر است. با توجه به اینکه در بعضی موارد در جریان مواد نفتی، مقداری آب وجود دارد و از طرف دیگر در بعضی موارد نیز برای انجام عمل جداسازی از بخار استفاده می‌شود، لذا در بعضی از جریانهای موجود، مقداری آب نیز وجود دارد. برای جداسازی این آب، می‌توان از روشهای مختلفی استفاده کرد. ولی یکی از راههای جداسازی این آب که مقدار آن نیز زیاد نیست، استفاده از یک استوانه عمودی نسبتاً کوچک است که در زیر ظروف Flash قرار می‌گیرد. به این قسمت از ظروف تبخیر ناگهانی Boot گفته می‌شود. همانطوریکه می‌دانید، آب از اکثر مواد نفتی سنگین‌تر است، لذا در ظروف تبخیر ناگهانی، این آب در زیر قسمت مایع هیدروکربنی قرار می‌گیرد و با توجه به وجود Boot در زیر ظروف تبخیر ناگهانی، این آب در این قسمت جمع می‌شود و به این ترتیب مقداری از آب موجود در جریان نفتی از این جریان خارج می‌شود. خارج کردن آب از بوت می‌تواندبه صورت پیوسته و یا ناپیوسته صورت بگیرد. در شکل 4-4، نحوه ورود و خروج جریانها به صورت شماتیک نشان داده شده است.

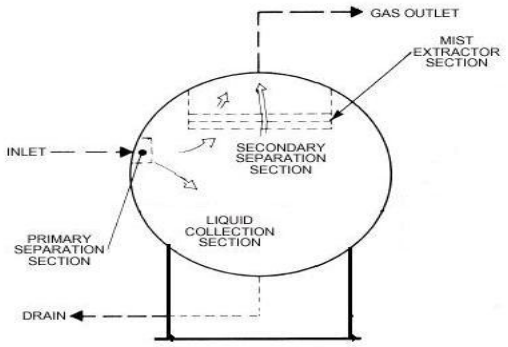



شکل4-4- شکل شماتیک و نحوه ورود و خروج جریانها در جداسازها (Separator)

ظروف جداساز(Separator) را می‌توان از دیدگاهای مختلف مورد تقسیم بندی قرار داد. انواع ظروف جداساز از لحاظ شکل و نحوه قرار گرفتن، به سه صورت زیر تقسیم می‌شوند:

1- ظروف جداساز استوانه‌ای عمودی
2- ظروف جداساز استوانه‌ای افقی
3- ظروف جداساز کروی شکل

در شکل 4-5، نحوه‌ورود و خروج مواد به یک ظرف جداساز کروی مشاهده می‌شود. در شکل 4-6، یک ظرف جداساز استوانه‌ای عمودی در حال ساخت ویک ظرف تبخیر ناگهانی در مقیاس صنعتی نشان داده شده است.




شکل 4-5- نحوه ورود و خروج مواد به یک ظرف جداساز کروی

## 4-3- کاربرد ظروف تبخیر ناگهانی

در قسمتهای قبل، کاربرد این ظروف در جداسازی اجزای سبک و سنگین جریان در اثر دوفازی شدن مواد ورودی به این ظرف توضیح داده شد.

شکل 4-6- دو نمونه صنعتی از ظروف تبخیر ناگهانی

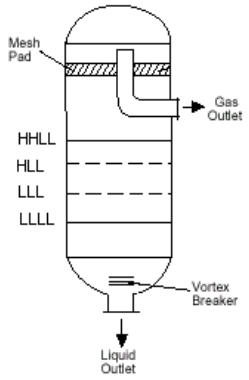
## 4-4- عیوب ظروف تبخیر ناگهانی

ظروف تبخیر ناگهانی از دستگاههایی به شمار می‌روند که کمتر باعث بروز مشکل در فرآیند می‌شوند و معمولا اپراتورها با این ظروف مشکل خاصی ندارند. با این حال در مواردیکه عملیات واحد در حالت Start up یا Shut down می‌باشد و متغیرهای فرایندی در حال تغییر می‌باشند احتمال ایجاد تغییر در دما، فشار جریان ورودی به ظرف Flash امر عادی می‌باشد. در این حالات، هر گونه تغییر در متغیرهای عملیاتی جریان ورودی به این ظرف، به طور مستقیم روی ترکیب مواد خروجی از بالا و پایین Flash drum تاثیر میگذارند. لذا باید با استفاده از کنترلرهای مختلف، متغیرهای عملیاتی موردنظر را در دامنه خاصی کنترل نمود. یکی از مهمترین این کنترلرها، کنترلر سطح مایع در ظرف تبخیر ناگهانی میباشد. در کنار این کنترلرها، کنترلر دما و فشار نیز از اهمیت بالایی برخوردارند به طوریکه اگر دمای سیال ورودی به ظرف Flash افزایش یابد باعث بالا رفتن دمای ظرف Flash خواهد شد و این فاکتور باعث افزایش شدت جریان بخار خروجی از بالای ظرف Flash خواهد شد و بدین ترتیب سطح مایع در داخل ظرف پایین خواهد آمد. تغییرات فشار ورودی نیز می‌تواند باعث اثرات مشابهی گردد. در چنین مواردی است که نقش کنترلرهای سطح مهم‌تر می‌باشد.

معمولاً سطح مایع در داخل ظرف تبخیر ناگهانی در چهار مورد زیر حائز اهمیت است:

- *HHLL (High High Liquid Level)*
- *HLL (High Liquid Level)*
- *LLL (Low Liquid Level)*
- *LLLL (Low Low Liquid Level)*

چهار مورد فوق‌الذکر روی شکل نشان داده شده‌اند. در مورد این سطوح باید گفت که وظیفه کنترلر سطح، کنترل سطح مایع موجود در ظرف Flash در محدوده بین HLL و LLL می‌باشد. اما در بعضی از موارد با تغییر شرایط سیستم کنترلر توانایی کنترل سطح در این ناحیه را ندارد.




شکل 4-7- سطوحی که دامنه کار کنترلر را نشان می‌دهند

در این شرایط سطح مایع از مقدار مورد نظر پایین‌تر یا بالاتر می‌رود. وقوع یک چنین مواردی برای عملیات واحد خطرناک می‌باشد. زیرا اگر سطح مایع از حد خاصی بالاتر رود احتمال وجود ذرات مایع در جریان گاز خروجی از بالای ظرف Flash افزایش یافته و این مورد علاوه بر کاهش کیفیت محصولات باعث تخریب کمپرسور و وسایل دیگری که برای جریان گاز در نظر گرفته شده‌اند نیز می‌گردد. کاهش ارتفاع مایع موجود در ظرف Flash نیز علاوه بر کاهش کیفیت محصول احتمال وجود حباب‌های گاز در جریان مایع را افزایش می‌دهد که این مورد باعث می‌شود پمپ و وسایل دیگری که برای جریان مایع تعبیه شده‌اند آسیب ببینند. لذا در این مواقع که سطح مایع به سطوح HHLL یا LLLL می‌رسد پیغامهای هشداردهنده‌ای توسط دستگاه تولید می‌شود و بدین ترتیب اپراتور واحد اقدام مقتضی را به عمل می‌آورد.

فصل پنجم

# پمپ
# Pump

## 5-1- شرح و توصیف

یکی از مسائل مهم در صنعت حرکت سیالات در داخل لوله‌ها یا وارد و خارج کردن سیالات از مخازن می‌باشد. این کار توسط پمپها انجام می‌شوند. در واقع پمپها انرژی مکانیکی سیالات را به وسیله افزایش فشار، سرعت، ارتفاع سیال و یا هر سه اینها افزایش می‌دهند. در صنعت دو گروه عمده پمپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. پمپ‌های سانتریفوژ[1] و پمپ‌های جابجایی مثبت[2].

## 5-2- تقسیم‌بندی پمپها

بر اساس نحوه عملیات پمپاژ در پمپها، دسته بندیهای زیر ارایه شده است.

### 5-2-1- پمپهای سانتریفوژ

**شرح و توضیح:** اصول اساسی کار کلیه پمپهای سانتریفوژ بر اساس استفاده از نیروی گریز از مرکز پایه‌ریزی شده است. هر جسمی که در یک مسیر دایره‌ای حرکت کند تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز واقع می‌شود. جهت نیروی گریز از مرکز طوری است که همواره تمایل دارد که جسم را از محور یا مرکز دوران دور می‌سازد.

شکل 5-1- نمونه پمپ سانتریفوژ افقی

قطعه دواری که داخل پوسته پمپ وجود دارد با حرکت سریع خود موجب گردش سیال می‌گردد. در نتیجه این عمل، سیال تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز واقع شده و از مجرای خروجی خارج می‌گردد. در نتیجه ایجاد خلا نسبی، فشار اتمسفر باعث دخول سیال به بدنه پمپ می‌گردد. تا زمانی که آب در داخل پمپ وجود داشته باشد مراحل فوق تکرار می‌شود. قطعه دوار یکه در داخل پمپ‌های گریز از مرکز قرار دارد پره نامیده می‌شود.

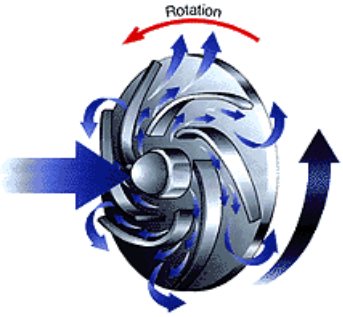
مجرای ورودی یا مکش سیال در مرکز پره قرار داشته و مجرای خروجی در پیرامون بدنه واقع شده است.

قسمت‌های اصلی یک پمپ سانتریفوژ عبارت است از:

---

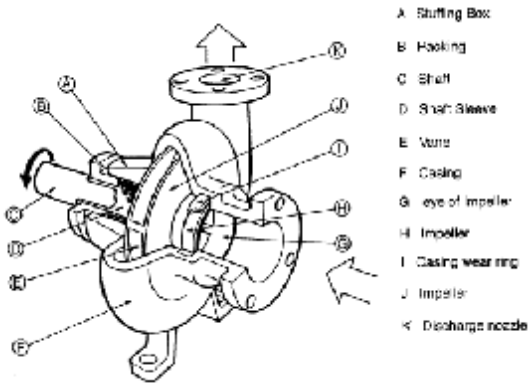
[1] centrifugal
[2] Positive displacement

پروانه‌ها: که بهره یک پمپ سانتریفوژی را تعیین می‌کنند. بسته به نوع و کاری که از پمپ انتظار می‌رود، تعداد پره‌ها بین 1 تا 9 یا بیشتر تغییر می‌کند. به عنوان مثال از پروانه‌های با تک پره نیمه‌باز در بسیاری از پمپهای صنعتی قوی که با مایعات غیر یکنواخت و تصفیه نشده همراه با رسوبات و ذرات معلق ، سروکار دارند، استفاده می‌شود. از پره‌های باز نیز برای پمپاژ سیالاتی که دارای ماده خارجی اضافی بیشتری هستند به کار می‌رود.




شکل 5-2- نمونه پره نیمه باز در یک پمپ سانتریفوژ

قسمت دیگر پمپ پوسته و یا بدنه آن است که معمولاً به صورت دوپارچه می‌سازند. پارچه‌های مزبور تحت یک صفحه افقی یا به صورت قطری با یکدیگر جفت می‌شوند، معمولاً دریچه‌های ورود و خروج آب را در پارچه زیری تعبیه می‌کنند. پمپ‌های گریز از مرکز را به صورت یک‌راهه یا دوراهه می‌سازند. البته نوع دوراه به مراتب بهتر از نوع یک‌راهه است زیرا وقتی فشار موجود در یکی از مجراهای ورودی یا خروجی تغییر کند نیروهای محوری به صورت خودکار یکدیگر را متعادل می‌سازند.




شکل 5-3- نمای داخلی یک پمپ سانتریفوژ افقی

### 5-2-1-1- تقسیم‌بندی و انواع پمپ سانتریفوژ

طرحهای اساسی پمپهای سانتریفوژ به اصول مختلف عملکرد آنها بستگی دارد. به طور عمومی پمپهای گریز از مرکز را نسبت به موارد زیر طراحی می‌کنند:

1- وضعیت مجرای ورودی مثل یک‌راهه یا دوراهه.

2- وضعیت مراحل از قبیل یک مرحله و یا چند مرحله‌ای.

3- وضعیت خروجی از نظر میزان سیال خارج شده مثل پمپ با خروجی زیاد، متوسط و یا کم.

4- وضعیت پروانه مانند نوع، تعداد پره‌ها و وضعیت بدنه پمپ.

-پمپهای یک‌مرحله‌ای: این پمپ‌ها بیشتر برای مواردی استفاده می‌شوند که ارتفاع خروجی، کم یا متوسطی مورد نظر باشد. می‌توان با استفاده از یک پمپ یک مرحله‌ای به ارتفاع خروجی حدود ft100 دست پیدا کرد در حالیکه عملاً وقتی ارتفاع بیش از 250 تا ft300 مورد نظر باشد بهره‌گیری از پمپ‌های چندمرحله‌ای عاقلانه‌تر است.

-پمپهای چندمرحله‌ای: این پمپها قادرند آب را تا ارتفاع نسبتاً زیاد پمپاژ نموده، فشار قابل توجهی را نیز در اختیار بگذارند. بسته به اندازه و ارتفاع پمپاژ، آنها را به صورت دو مرحله یا چند مرحله طراحی می‌کنند. با وجودیکه همه پروانه‌ها به یک محور واحد متصل بوده و در داخل یک بدنه واقع شده‌اند هر مرحله را می‌توان عمل یک پمپ مجزا فرض کرد. برای مثال در داخل یک بدنه می‌توان از 8 مرحله متفاوت استفاده نمود. در اولین مرحله سیال منبع مورد نظر مستقیماً از طریق مجرای ورودی تحویل گرفته شده و فشار آن به اندازه فشار ناشی از یک پمپ تک‌مرحله‌ای افزایش می‌یابد و به مرحله بعدی ارجاع می‌شود. در هر مرحله، فشار کمی زیاد می‌شود تا جاییکه فشار و حجم آب خروجی به میزانی که مورد نظر است برسد و مراحل خاتمه یابد.

از یک دیدگاه خاص پمپهای سانتریفوژ برحسب محرک نیز تقسیم‌بندی می‌شوند. پمپهای سانتریفوژی که مستقیماً به یک موتور الکتریکی متصل مربوط می‌شوند و با استفاده از یک تسمه حرکت منتقل می‌شود. در این موارد که پمپ مستقیماً توسط یک موتور به گردش در می‌آید، موتور و پمپ هر دو بر روی یک زیرکاری بزرگ تعبیه شده و با یک کوپلینگ مناسب به هم مربوط می‌شوند. موتورهای الکتریکی دارای سرعت بالا و راندمان مناسب هستند تنها ایرادی که دارند این است که نمی‌توان سرعت موتور را با بار[3] ورودی تنظیم نمود. پمپهای توربینی با وجود اینکه دارای راندمان پایین هستند ولی به علت اینکه دور موتور با باروردی قابل تنظیم است کاربرد فراوان دارند و معمولاً به عنوان پشتیبان پمپهای الکتروموتوری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### 5-2-1-2- مزایای پمپ‌های سانتریفوژ

مزایای پمپهای سانتریفوژ بدین شرح می‌باشد:

1- سادگی ساختمان

2- قیمت کم

3- تنوع جنس پروانه و محفظه (انواع فلزات و غیر فلزات مثل پلاستیک‌ها و لاستیک‌ها)

4- هزینه نگه‌داری کم

[3] Load

5- چون می‌توانند در دورهای بالا کار کنند امکان اتصال مستقیم به موتور الکتریکی وجود دارد.

6- جریان تحویلی از پمپ پایدار و بالا است

7- می‌تواند جریان‌های دوغابی را پمپ کند

8- فضای کمی را اشغال می‌کند

### 5-2-1-3- معایب پمپ‌های سانتریفوژ

معایب این پمپها نیز عبارتند از:

1- به جز در سرعت‌های بالا (مثلاً بیش از rpm10000) امکان ایجاد فشارهای بالا در پمپ‌های یک‌مرحله‌ای وجود ندارد

2- پمپ‌های چند مرحله‌ای برای فشارهای بالا گران‌قیمت هستند، خصوصاً برای مصالح مقاوم در مقابل حرارت

3- در دبی‌های بالا راندمان سریعاً افت می‌کند

4- این پمپ‌ها Self-priming نیستند (احتیاج به آب‌بندی دارند)

یکی از مهمترین مشکلاتی که بیشتر برای پمپهای سانتریفوژ پیش می‌آید مسئله *کاویتاسیون* می‌باشد. قبل از بررسی این مطلب باید مختصری در مورد NPSH (Net Positive Suction Head) که یکی از پارامترهای مهم پمپ‌ها است توضیح دهیم.

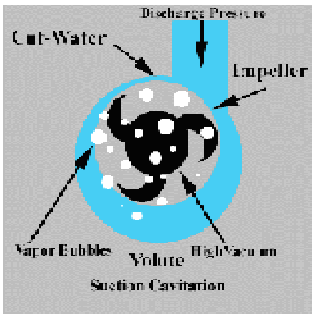
در هنگام مکش و در قسمتهای مختلف پمپ هرگز نباید فشار مایع کمتر از فشار بخار مایع شود. $NPSH_R$ در واقع حداقل فشاری است که پس از غلبه بر افت‌های اصطکاکی و اغتشاشی درون پمپ باز هم باید از فشار بخار مایع بیشتر یا مساوی آن باشد. زیرا اگر این اتفاق رخ دهد باعث بوجود آمدن حبابهای درون مایع داخل پمپ شده حبابهای بخار به علت سرعت زیاد پره‌ها و فشار زیادی که خودشان دارند ضربات بسیار محکمی به پره‌های پمپ وارد کرده و باعث تخریب پره‌ها می‌شوند. در واقع پدیده کاویتاسیون وجود چنین حبابهایی در جریان ورودی مایع پمپ است که برای اینکه این اتفاق نیفتد باید فشار مایع ورودی حداقل به مقداری باشد که $NPSH_R$ مثبت را نتیجه بدهد. NPSH یکی از پارامترهای طراحی پمپها است که معمولاً توسط کارخانه سازنده پمپ مشخص می‌شود.

$$NPSH=h_{ss} - h_{fs} - p > 0$$

$h_{ss}$ = هد مایع در مکش

$h_{fs}$ = هد اصطکاکی

p = فشار بخار مایع در دمای عملکرد پمپ بر حسب هد مایع




شکل 5-4- کاویتاسیون درپمپهای سانتریفوژبه علت کاهش فشار مایع ورودی

### 5-2-1-4- شرایط عملکرد غیر عادی پمپ

وقتی پمپهای گریز از مرکز در شرایط عادی باشند، نرم و بدون لرزش کار می‌کنند. در این حالت یاتاقانها گرمای ثابتی دارند که به وضعیت قرار گیری دستگاهها بستگی دارد. این دما ممکن است تا حدود $^{o}F100$ پایین بیاید. البته باید به خاطر داشت که دمای کلی سیستم به ظرفیت آن بستگی دارد و به ازاء حداقل جریان، دما به حداکثر ممکن می‌رسد. بعضی از اشکالاتی که ممکن است در پمپهای گریز از مرکز اتفاق بیفتد همراه با علل ممکنه به صورت خلاصه در زیر آورده شده است.

*دبی پمپ کمی پس از روشن شدن* پمپ کم می‌شود؟ در صورت بروز چنین مشکلی علت را باید در عوامل زیر جستجو نمود:

*1*- هوا وارد لوله می‌شود.

*2*-عمق زیاد است (بیش از 5 متر).

*3*-لوله آب‌بندی اولیه مسدود است و یا داخل سیال هوا یا گازهای مزاحم زیاد است(هوا یا بخار در بخش مکش تجمع کرده است).

پمپ *موتور داغ می‌کند*؟ در این صورت باید عوامل زیر را بررسی کرد:

*1*-*سرعت زیاد است.*

2- ارتفاع دینامیکی کل کمتر از قدرت پمپ بوده و سیال زیادی پمپاژ می‌شود.

3- پمپ برای جابجا کردن سیالی با وزن مخصوص و ویسکوزیته سیالی که فعلاً دارد آن را پمپاژ می‌کند ساخته نشده است

پمپ *لرزش زیادی دارد*؟ علل به شرح زیر است:

1-به طور کلی قطعات در تماس باهم، تنظیم نیستند.

2-فونداسیون به قدر کافی سخت نیست.

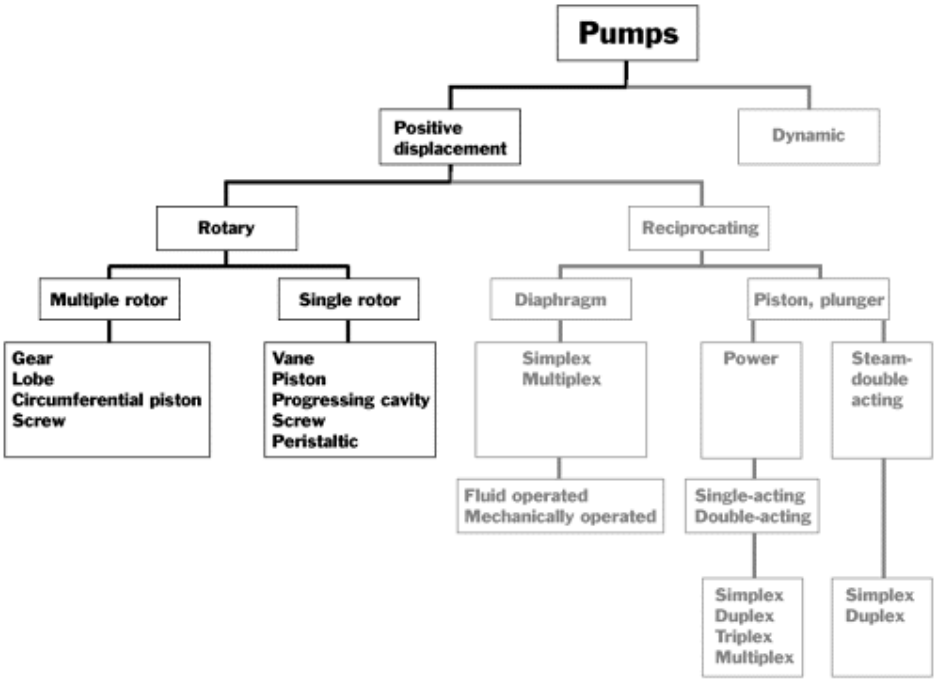
3-یک ماده خارجی تعادل پروانه را به هم زده است.

4- یک اشکال مکانیکی از قبیل خم شدن محور، ساییده شدن یاتاقانها و یا مالیده شدن یک قطعه متحرک به یک قطعه ثابت وجود دارد.

## 5-2-2- پمپهای جابجایی مثبت

پمپهای گریز از مرکز که در صفحات قبل بررسی شد در واقع پمپهای جابجایی منفی هستند. در واقع این پمپها سرعت سیال را به طور زیادی بالا می‌برند در حالیکه پمپهای جابجایی مثبت به طور ثابت و یکنواخت سیال را از داخل محفظه خود به بیرون می‌رانند. پمپهای جابجایی مثبت برای هد بالاتر و ظرفیت‌های پایین تر بکار می‌روند. اصول کار به این صورت است که مقداری از سیال درون محفظه‌ای که مرتباً پر از سیال می‌شود گیر می کند و سپس در فشار بالاتری، از قسمت خروجی پمپ خارج می‌شود.

### 5-2-2-1- تقسیم‌بندی انواع پمپهای جابجایی مثبت




پمپهای جابجایی مثبت دارای دو نوع عمده هستند. یک نوع ،محفظه اصلی پمپ ثابت است و تقریباً شبیه سیلندر است و یک قطعه متحرک مانند پیستون درون آن حرکت می‌کند. به این پمپها، پمپهای رفت و برگشتی[4] می‌گویند. اما نوع دیگر پمپها، پمپهای دورانی[5] می‌باشند که حرکت محفظه شامل سیال، از قسمت ورودی سیال تا قسمت خروجی آن صورت می‌گیرد.

[4] Reciprocating Pump
[5] Rotary Pump

پمپهای جابجایی مثبت نسبت به وضعیت پروانه‌ای که داخل آن است تقسیم‌بندی‌های خاص خود را دارند: پمپهای دنده‌ای[6] که شامل دو چرخ‌دنده ساده هستند و یکی از آنها به وسیله عامل محرک مثل موتور به گردش در آمده و چرخ‌دنده دیگر را بر می‌گرداند یک نوع از این پمپها هستند. در پمپهای دنده‌ای میزان سیال را به سادگی و تنها با تغییر سرعت گردش محور می‌توان تغییر داد. نوع دیگر پمپهای دورانی، پمپهای پره‌ای[7] می‌باشند. اصول کار این پمپها بر اساس افزایش حجم فضای خالی برای ایجاد یک خلاء جزئی پایه‌گذاری شده است . بدیهی است که خلاء مزبور باعث پر شدن محفظه مکش پمپ از سیال می‌شود. لحظه بعد کاهش حجم فضاهای خالی، سیال را با فشار از طرف دیگر بیرون می‌راند. در پمپ‌های مارپیچی (شکل 7) ساختمان داخلی، شبیه چرخ گوشت است و برای مایعات با ویسکوزیته بالا، مثل پلیمرها به کار می‌رود و غالباً با سر و صدا و دارای راندمان بالایی هستند.

3 2 1

شکل 5-5- ترتیب ورود وخروج سیال در پمپ جابجایی مثبت

شکل 5-6- نمونه پمپ مارپیچی (screw)

پمپ‌های سنجشی معمولاً برای پمپ کردن مقدار دقیق سیال (مثل افزودن بازدارنده‌های شیمیایی) به کار می‌روند. ظرفیت کم و فشارهای بالا از خصوصیات این پمپ‌ها می‌باشد.

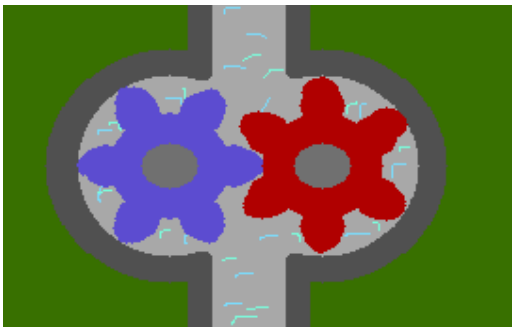
پمپهای پیستونی نیز به صورت جابجایی مثبت یا متغیر ساخته می‌شوند. در پمپهای پیستونی با جابجایی متغیر، جابجایی پمپ به طور خودکار تغییر یافته و موجب می‌شود که جریان مورد نیاز سیستم به طور

[6] Gear Pump
[7] Van Pump

اتوماتیک ثابت باقی بماند. وقتی میزان جابجایی تغییر کند فشار سیستم به نحوی متناسب با آن تغییر کرده به صورتی که جریان تقریباً ثابت باقی بماند.

شکل 5-7- پمپ پره ای

یکی دیگر از پمپ‌های مورد استفاده در صنعت، پمپ دورانی می‌باشد. همانطوریکه در شکل زیر مشاهده می‌شود در این نوع از پمپ‌ها، سیال وارد محفظه‌ای می‌شود که در آن چند پره (معمولاً دو پره) در حال چرخیدن هستند. نحوه چرخش پره‌ها به صورتی است که باعث بردن سیال به کناره‌های محفظه شده و از آنجا سیال به قسمت خروجی پمپ با فشار ایجاد شده توسط پره‌ها منتقل می‌شود. این پمپ‌ها دارای ساختمان ساده‌ای بوده و برای سیالات با ویسکوزیته بالا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل 5-8- پمپ دورانی

یکی از خصوصیات این پمپ‌ها قابلیت کنترل فشار خروجی از پمپ با تنظیم سرعت چرخش پره می‌باشد. یکی از مسایل مهم این نوع پمپ‌ها، قابلیت خوردگی سیال می‌باشد. لذا در مورد جریان‌هایی که می‌توانند خاصیت خورندگی روی پره‌ها ایجاد کنند، با کشیدن پوشش بر روی پره‌ها از خوردگی جلوگیری می‌شود.

## 5-3- نحوه کار پمپها در سیستم

منحنی یک پمپ ارتباط بین هد و ظرفیت یک پمپ را شرح می‌دهد و این ارتباط بدین صورت است که هرچه ارتفاع بالاتری مورد نظر باشد ظرفیت پمپ کمتر خواهد شد و در نتیجه این دو رابطه عکس با یکدیگر دارند. منحنی سیستم نیز ارتباط بین اختلاف هد کل در سراسر سیستم و جریان کلی در سیستم را نشان می‌دهد. برای انتخاب یک پمپ شکل و شیب نمودار پمپ باید نسبت به موقعیتش( با توجه به نمودار سیستم) مورد توجه قرار گیرد. گاهی اوقات که ظرفیت پمپ از ظرفیت سیستم بیشتر است به وسیله شیرهایی به نام شیر فشار شکن( Throttle Valve) ظرفیت پمپ را تا ظرفیت مورد نیاز در سیستم کاهش می‌دهد. به این ترتیب که شیر فشار شکن با صرف انرژی باعث افزایش انرژی اصطکاکی در قسمت خروجی پمپ شده و باعث کاهش ظرفیت می‌شود.کنترل ظرفیت پمپ می‌تواند با برگرداندن قسمتی از مایع به بخش ورودی پمپ نیز صورت بگیرد که غالباً این روش برای پمپهای جابجایی مثبت بکار می‌رود زیرا برای این‌گونه پمپها شیر فشار شکن به کار نمی‌رود.

راه دیگر برای تنظیم ظرفیت پمپ تطبیق سرعت چرخش پمپ با ظرفیت مورد نیاز است که غالباً کار آسانی است زیرا پمپهای الکتروموتوری با سرعت ثابتی راه‌اندازی می‌شوند ولی از این روش در پمپهای توربینی می‌توان استفاده کرد.

فصل ششم

# مخلوط کننده
# Mixer

## 6-1- شرح وتوصیف

مخلوط کردن سیالات از فرایندهای مهم در صنایع شیمیایی می‌باشد. سیستمهای اختلاط می‌تواند شامل مخلوط کردن سیال با هر کدام از فازهای دیگر یعنی مایع، جامد و گاز باشد.

از آنجا که صنعت اختلاط هنوز به شکل علمی دقیق در نیامده است طراحی یک همزن به طوریکه نوع، قطر و سرعت عملیاتی و شکل پره را در بر بگیرد نه سودمند است و نه عملی. به جای آن منطقی است یک مهندس ضروریات فرایندی و مکانیکی را درک کرده و با توجه به شرایط و پره‌های استاندارد موجود، بهترین انتخاب را انجام دهد.

عملیات میکس(اختلاط) معمولاً به منظور:

-اختلاط یک حجم از سیال

-واکنش شیمیایی

-انتقال حرارت

-انتقال جرم

-اختلاط چند فاز با هم(سوسپانسیون و تعلیق)

در صنعت به کارمی‌رود. هر یک از موارد فوق مکانیزم خاص خود را دارا می‌باشد. دو نوع کلی مکانیزم اختلاط عبارتند از :

1- مکانیزم اختلاط میکرو

2- مکانیزم اختلاط ماکرو

در مورد مکانیزم میکرو اختلاط در مقیاس مولکولی مطرح می‌باشد. مکانیزم اختلاط به‌منظور انتقال جرم و حرارت و همچنین واکنش شیمیایی در سطحی که این پدیده‌ها صورت می‌گیرند اختلاط به روش میکرو(مولکولی)می‌باشد. هنگامی که نیاز به تولید یک توده از مخلوط همگن است از مکانیزم اختلاط ماکرو استفاده می‌گردد. هر یک از مکانیزم‌های فوق نیاز به نوع ویژه‌ای از همزن دارد. در بسیاری از فرایندها هر دو مکانیزم لازم می‌باشند.

### 6-1-1- پره

عمل اختلاط همیشه با ایجاد اغتشاش در مایع همراه است. این کار همزدن نام دارد و توسط وسیله‌ای به نام پره انجام می‌شود. پره‌ها با وارد کردن نیروی مماسی (Shear)باعث ایجاد گردانه در سیال می‌شوند که در نهایت عمل اختلاط را طبق منظوری که داریم انجام خواهند داد.

مناسبترین پره باید با توجه به شرایط زیر انتخاب شود.

1-مکانیزم اختلاط مورد نیاز(اینکه مکانیزم اختلاط میکرو یا ماکرو یا هر دو است)

2-خواص فیزیکی(مهمترین عامل ویسکوزیته می‌باشد)

3-ظرفیت مخزن (با تغییر ظرفیت نوع همزن عوض می‌شود)

## 6-2- انواع اختلاط

اختلاط سیالات دو نوع کلی دارد:

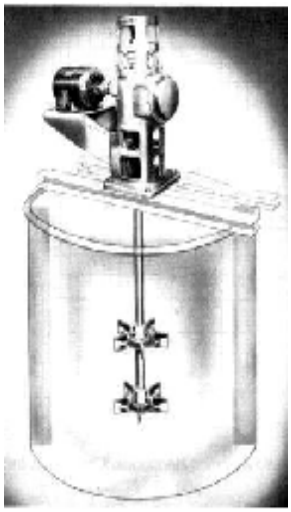
1-مخازن همزن‌دار

2-اختلاط در طول جریان(اختلاط ثابت)

حال به شرح دو نوع اختلاط می‌پردازیم:

### 6-2-1- مخازن همزن‌دار (Stirred Tanks)

اغلب جهت اختلاط از این نوع میکسرها استفاده می‌شود. مخازن همزن‌دار(شکل 1) معمولاً استوانه‌ای شکل هستند که بالای آن با هوا می‌تواند ارتباط داشته باشد یا بسته باشد.

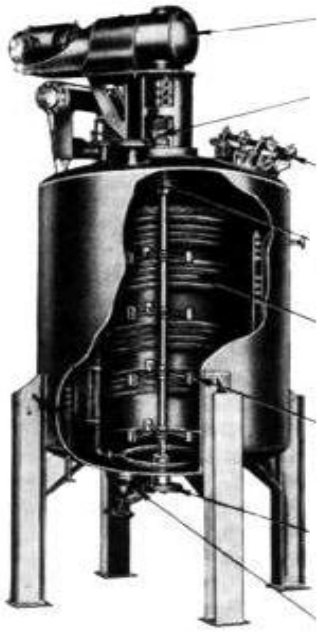


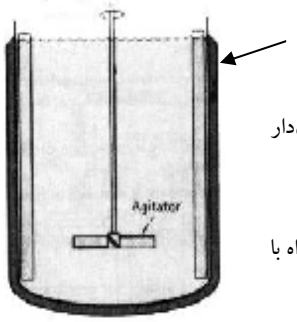
شکل 6-1- نمایی از یک مخزن همزن‌دار

در حالت کلی کف استوانه را به شکل محدب می‌سازند زیرا اگر کف گوشه داشته باشد باعث غیر ایده‌آل شدن جریان سیال و نواحی ساکن در ظرف می‌شود. ارتفاع مایع در مخزن را معمولاً معادل قطر مخزن در نظر می‌گیرند. انرژی لازم جهت به حرکت درآوردن پره توسط یک الکتروموتور تأمین می‌گردد.

اگر انتقال حرارت داشته باشیم از ژاکت یا کویل حرارتی در مخزن استفاده می‌شود. در شکل 2 یک نمونه از مخازن همزن‌دار نشان داده شده‌است. اگر بخواهیم سیال فرآیند را گرم کنیم معمولاً از بخار در ژاکت یا کویل حرارتی استفاده می‌شود و اگر بخواهیم سیال فرآیند را سرد کنیم معمولاً از آب کولینگ استفاده می‌شود.

پره‌ها در مخازن همزن‌دار قادرند دو نوع کلی جریان یعنی شعایی و محوری یا ترکیبی از این دو را بوجود آورند. در جریان شعاعی همانطور که از شکل پیداست سیال پس از برخورد به پره در جهت شعاع حرکت می‌کند. اما در جریان محوری حرکت در جهت محور همزن خواهد بود. در شکل 3 چگونگی اینگونه حرکت‌ها نشان داده شده است.



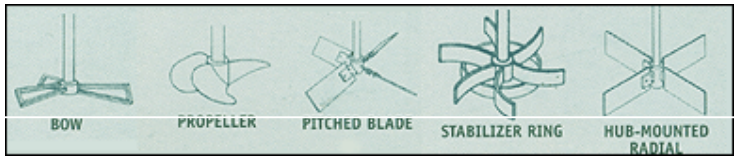




شکل 6-2- الف. راست : یک مخزن همزن‌دار همراه با ژاکت حرارتی

ب. چپ: نمایی از یک مخزن همزن‌دار همراه با کویل حرارتی

الف ب

شکل 6-3- الف. جریان شعاعی(با استفاده از پرهٔ توربینی قائم) ب. جریان محوری(با استفاده از پرهٔ توربینی شیبدار)




شکل 6-4- از راست توربینی با تیغهٔ قائم، توربینی منحنی ، توربینی شیبدار ، ملخی ، ملخی BOW

### 6-2-1-1- انواع پره ها

پره‌هایی که در همزن‌ها بکار می‌روند سه نوع کلی دارند که 95٪ کل پره‌ها را تشکیل می‌دهند:

**الف. نوع ملخی (Propeller)**

1-جریان محوری ایجاد می کنند.

2-در رنج سرعت وسیعی کاربرد دارند.

3-در سرعتهای پایین به ندرت خراب می‌شوند.

4-برای مایعات با ویسکوزیته بالا اقتصادی نیستند.

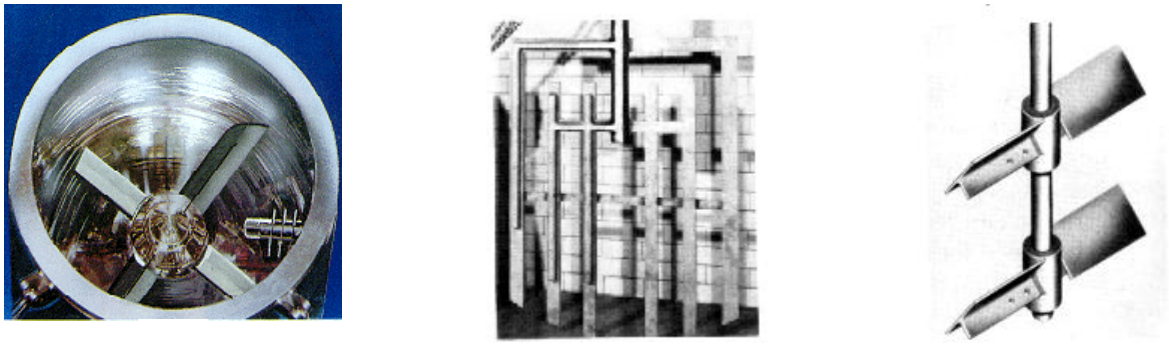
5-قیمت آنها مناسب و توان مصرفی آنها اقتصادی است.

الف ب ج د

شکل 6-5- پرهای ملخی الف.پرهٔ ملخی همراه با محور والکتروموتور ب.پرهٔ ملخی هنگام همزدن ج.پرهٔ ملخی نوع خاص cut-out د.پرهٔ ملخی اره‌ای برای ایجاد shear زیاد در سیالات ویسکوز

**ب. نوع پارویی (Paddle)**

این نوع پره از یک محور و یک پره به شکل پارو تشکیل شده است. معمولا پره‌ها به صورت تیغه‌های 2تایی یا 4تایی هستند. این نوع پره‌ها معمولاً به سه صورت زیرمی‌باشند .



الف ب ج

شکل 6-6- الف. پره پارویی دوتیغهٔ دوتایی جهت جریان محوری ب.پره پارویی دروازه‌ای(نوع خاص) جهت سیالات ویسکوز ج. پره پارویی با لبهٔ تیزو جریان محوری

1-پارویی صفحه‌ای

2-پارویی دوتایی

3-لنگری

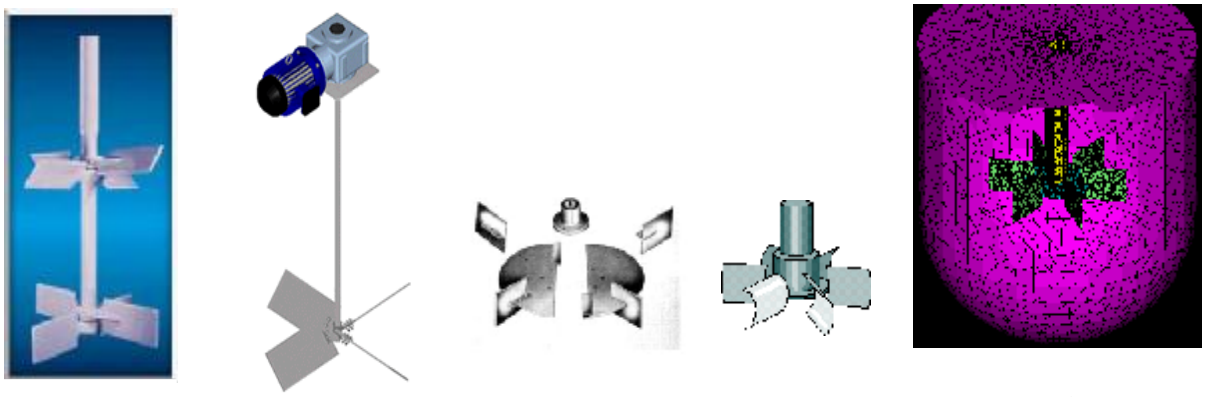
سرعت این نوع همزنها کم تا متوسط می‌باشد. اگر تیغه همزن پارویی کاملاً عمود باشد جریان مماسی یا شعایی (شکل 6 ب) ایجاد می کند ولی اگر زاویه‌دار باشد جریان محوری ایجاد می کند شعایی (شکل 6 الف). در ظرفهای عمیق چند پارو روی یک محور نصب می‌شود.

یکی از مهمترین کاربردهای این نوع از همزنها، استفاده جهت انتقال حرارت می‌باشد. دور این همزنها حدود 20 تا 150 دور در دقیقه می‌باشد و نسبت قطر پره به قطر مخزن 0/5 تا 0/8 می‌باشد. عرض تیغه پاروها حدود یک‌ششم تا یک‌هشتم طول آن می‌باشد. در ویسکوزیته‌های بالا مناسب است مخصوصاً نوع لنگری.

**ج. نوع توربینی (Turbine)**

این نوع پره بسیار متنوع می‌باشد. اگر تیغه‌های توربین قائم باشند تنها جریان شعایی خواهیم داشت و اگر شیب هم داشته باشند آنگاه جریان محوری و شعایی بر حسب میزان شیب خواهیم داشت یعنی هرچه پره افقی‌تر باشد جریان محوری‌تر خواهد شد.

سرعت این همزن زیاد، تیغه‌ها می‌توانند شیبدار یا مستقیم باشند(مانند همزن پارویی). فرق این همزن با همزن پارویی در اندازه و سرعت آن می‌باشد. اندازه پره توربینی کمتر از پارویی می‌باشد، یعنی 0/3 تا 0/5 قطر ظرف و همچنین سرعت این همزن می‌تواند خیلی بیشتر از همزن پارویی باشد. در شکل 7 چند نوع از پره‌های توربینی نشان داده شده است.



الف ب ج د ه

شکل 6-7- انواع پره‌های توربینی: الف. پرهٔ توربینی با تیغه‌های قائم جهت ایجاد جریان شعاعی ب . پرهٔ توربینی با تیغه‌های منحنی جهت ایجاد جریان شعاعی و مناسب در همزدن سیالات لجنی و دوغابی ج. توربینی صفحه‌ای د. توربینی شیبدار جهت ایجاد جریان محوری (به همراه محور و الکتروموتور) ه. دو پرهٔ توربینی که بالایی ایجاد جریان محوری می کند و پرهٔ پایینی ایجاد جریان شعاعی می کند

### 6-2-1-2- برخی مفاهیم مهم در ارتباط با مخازن همزن‌دار

1-جریان(Flow) :کمیت جریان به صورت میزان سیالی که به طور محوری یا شعایی از سطح یا محیط دوران به سمت خارج حرکت می‌کند تعریف می‌شود.

2-عدد جریان(Flow number): بهترین کمیت بدون بعد که با استفاده از آن می‌توان میزان جریان واقعی که توسط پره ایجاد می‌شود را حساب کرد. این عدد به صورت دیاگرامی که بر حسب عدد Re می‌تواند باشد از سوی سازنده ارائه می‌شود.

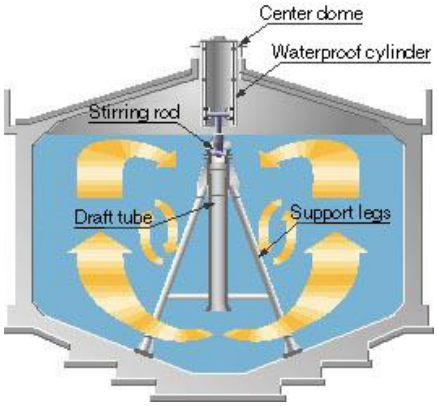
3-توان(Power):معیاری است که کارایی همزن را مشخص می‌کند. توان مصرف شده که توسط یک الکتروموتور تامین می‌شود از طریق اصطکاک حاصل از ویسکوزیته جذب و باعث چرخش می‌شود و به صورت گرما هدر می‌رود.

4-محور (shaft): اندازه مناسب محور پارامتر بسیار مهمی جهت جلوگیری از ارتعاش، خراب شدن قسمت‌های مکانیکی و ظرف همزن می‌باشد. معمولاً سرعت محور باید حدود 0/4 سرعت بحرانی باشد.

5-طراحی: معمولاً جهت طراحی تنها کافیست پره مناسب انتخاب شود و توان مورد نیاز تعیین گردد.

6-Draft Tube: لوله‌ای است که دور محور (Shaft) همزن قرار داده می‌شود. این امر باعث ایجاد یک الگوی جریان از بالا به پایین ویژه می‌شود که در کل مایع برقرار می‌شود. از این وسیله تنها هنگامیکه می‌خواهیم مطمئن باشیم که الگوی جریان مورد نظردر سیستم برقرار می‌شود استفاده می‌کنیم زیرا اصطکاک زیادی ایجاد می‌کند.

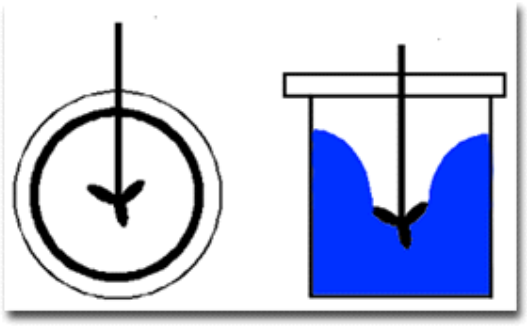
از آنجاکه اصطکاک باعث اتلاف انرژی می‌گردد تا هنگامیکه مجبور نشویم معمولاً از Draft Tube استفاده نمی‌کنیم. البته وجود این وسیله باعث بهبود عملیات اختلاط می‌گردد و بسته به نظر طراح در موارد لزوم استفاده می‌گردد.




شکل 6-8- نمایی از Draft Tube در یک مخزن همزن‌دار و تأثیر آن بر الگوی جریان

### 6-2-1-3- تولید گرداب(Vortex) و نحوه پیشگیری از آن

در سرعتهای پایین همزن، سطح مایع تقریباً صاف بوده و مایع در اطراف محور همزن گردش می‌کند. با افزایش سرعت همزن برای ایجاد تلاطم توان لازم برای به حرکت درآوردن همزن افزایش یافته و در اطراف محور همزن گرداب تشکیل می‌شود. در سرعتهای بالاتر در نهایت گرداب به پره همزن می‌رسد. در این حالت



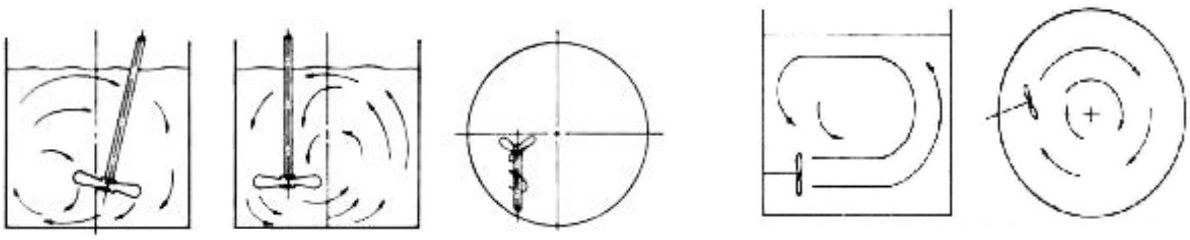
شکل 6-8- نمایی ازایجاد گرداب در یک مخزن همزن‌دار

هوا به درون مایع کشیده می‌شود. قسمتی از پره درون هوا می‌گردد و توان لازم کاهش می‌یابد. کشیده شدن هوا به درون مایع عموماً نامطلوب است و بعلاوه وجود گرداب سبب بروز مشکلاتی در تغییر مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی به مقیاس صنعتی می‌گردد لذا سعی در پیش‌گیری از ایجاد گرداب می‌شود. موارد نادری وجود دارد که ایجاد گرداب بهتر است وجو داشته باشد. یکی از این موارد استثنایی جامدی است که به سختی مرطوب می‌شود. مثلاً حل کردن اسیدبوریک در آب که بهتر است در گرداب ریخته شود.

از ایجاد گرداب به طرق زیر می‌توان جلوگیری کرد:

الف-باقی ماندن در منطقه جریان آرام. این روش به علت اینکه در فرایندهای واقعی به ندرت پیش می‌آید دارای محدودیت می‌باشد. $Re<10$

ب-قراردادن همزن به صورت نامتقارن نسبت به محور همزن و یا اینکه همزن نسبت به محور مخزن تحت زاویه قرار داشته باشد. یکی از روشهای دیگر نصب پره از جهت کناری و به صورت افقی می‌باشد. از این روشها وقتی مقیاس کوچک باشد استفاده می‌شود.



ب الف

شکل 6-9- جلوگیری از ایجادگرداب در مخازن همزن‌دار الف. با وارد کردن پره از کنار ب . با وارد کردن پره به صورت نامتقارن و زاویه‌دار

ج-نصب تیغه‌ها(Baffle): این روش متداولترین روش می‌باشد و در حالت استاندارد از چهار تیغه صاف عمودی تشکیل شده که به صورت شعایی و تحت زاویه 90 درجه در دیواره مخزن نصب می‌شود. این تیغه‌ها در

تمام عمق مایع قرار می‌گیرند. پهنای این تیغه‌ها راحدود 0/1 قطر مخزن در نظر می‌گیرند. اگر با محلولهای سوسپانسیون سر و کار داریم جهت جلوگیری از تجمع ذرات جامد در پشت بَفِل به اندازه نصف عرض تیغه آن را از دیواره مخزن فاصله می‌دهند. در حالت جریان آشفته Re>10000 می‌باشد.

عدد رینولدر در مخازن به اینصورت تعریف می‌شوند: $\mu/\rho.\upsilon.N_{Re}=D^2$

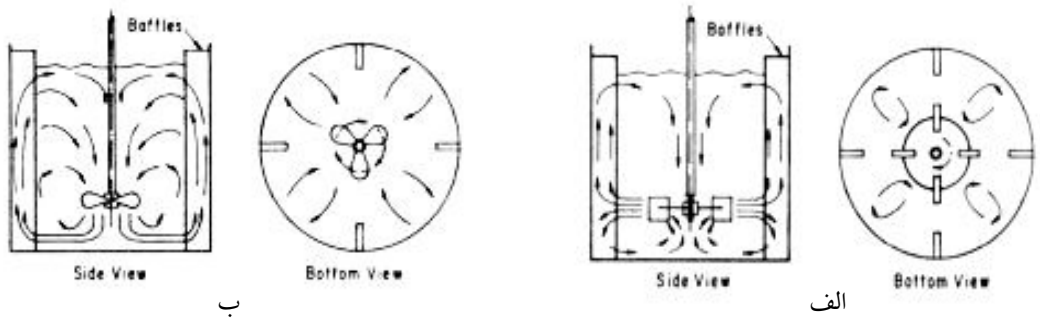
D : قطر پره

$\upsilon$ : سرعت

$\rho$ : چگالی

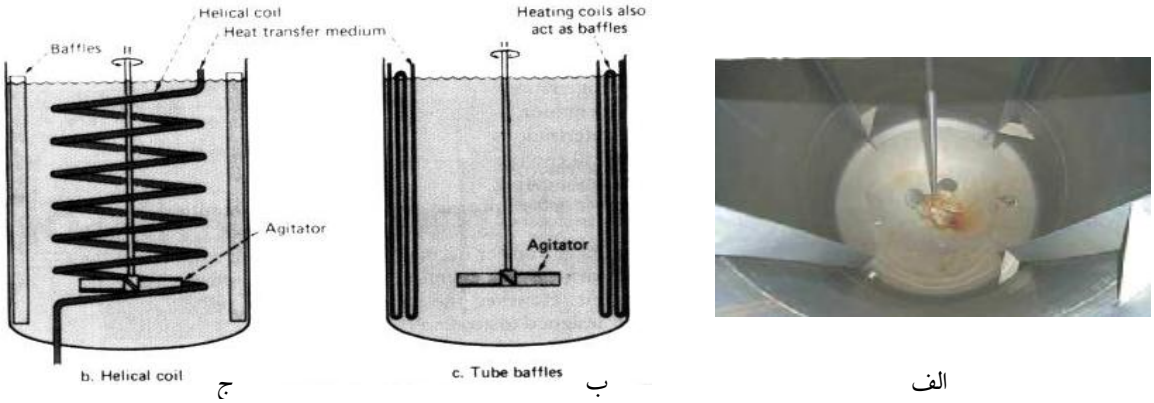
$\mu$ : ویسکوزیته

اگر با جریان در حال گذار سرو کار داشته باشیم(Re<10000>10) معمولاً طول بفل را نصف این مقدار در نظر می‌گیرند.




ب الف

شکل 6-10- جلوگیری از ایجاد گرداب در مخازن همزن‌دار الف. پرهٔ توربینی(جریان شعاعی) ب. پرهٔ ملخی(جریان محوری)




ج ب الف

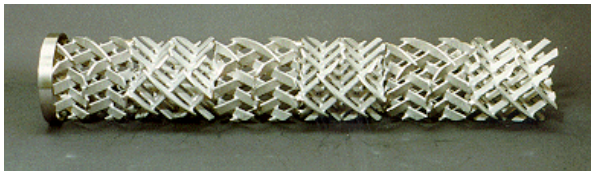
شکل 6-11- الف. نمایی از بفل در یک مخزن همزن‌دار ب. کویل حرارتی مثل بفل عمل می‌کند ج. چگونگی قرارگرفتن کویل حرارتی در مخزنی که بفل نیز وجود دارد

## 6-2-2- اختلاط در طول جریان یا همزن ایستا

این وسیله اختلاط هیچگونه قسمت متحرکی ندارد و ساختار آن نسبتاً ساده می‌باشد و همچنین در مقایسه با مخازن همزن‌دار که احتیاج به یک نیروی محرکه دارند دارای قیمت ارزانتری هستند.

استفاده از همزنهای ساکن اخیراً در صنایع گسترش یافته است و ثابت شده است که برای بسیاری از صنایع سودمند و موثر می‌باشد. مثلاً در اختلاط پلی‌مرهای مذاب بسیار خوب عمل می‌کند. این وسیله بیشتر در اختلاط مایع/مایع بکار می‌رود اما طراحی‌های گوناگون جهت اختلاط سایر فازها حتی جامد نیز وجود دارد. بعنوان مثال در ورودی رآکتور اگر چند گاز همزمان وارد شوند ابتدا از یک همزن ساکن عبور داده میشوند تا خوب با هم مخلوط شوند. امروزه در صنایع پلیمری بجای استفاده از اکسترودر نوع Screw جهت رسیدن به یکنواختی غلظت و دما جهت رسیدن به یک محصول هموژن می‌توان از انواع این نوع مخلوط‌کننده‌ها استفاده کرد.

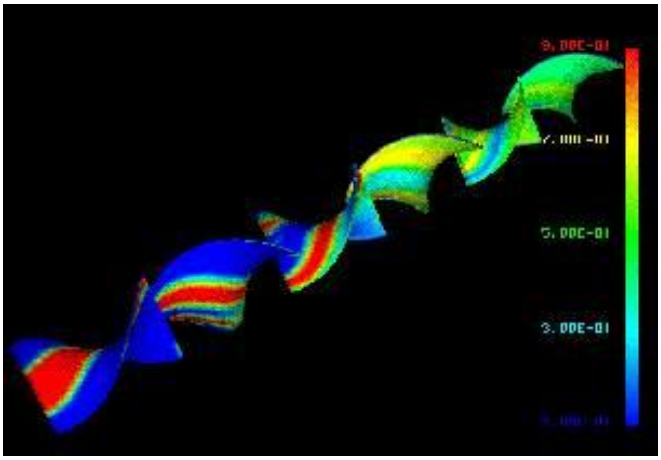
الف



ب

شکل 6-12- الف. یک static mixer ساده که عمل اختلاط را با هدایت مایع به بالا و پایین و چپ و راست انجام می‌دهد.
ب.یک static mixer پیچیده که عمل اختلاط را با تقسیم جریان به المان‌های کوچک و در هم‌آمیختن دوباره صورت می‌دهد.

به علت طراحی‌های متنوع و ویژه این نوع همزنها ، اطلاعات مربوط به نحوه انتخاب و استفاده از این نوع همزنها باید از شرکت‌های سازنده گرفته شود. اساس کار این نوع همزنها در شکستن جریان سیال و سپس بازآرایی و اختلاط سیال به صورتهای گوناگون و در نهایت ترکیب دوباره سیال و تکرار این مجموعه مراحل می‌باشد(شکل 13). در این همزنها از انرژی فشاری خود جریان برای اختلاط استفاده می‌شود که این خود باعث افت فشار می‌گردد. تمامی تیغه‌های اختلاط در لوله‌های مدور قرار می‌گیرند و سیال از داخل این لوله‌ها عبور داده می‌شود. انواع متنوعی از static mixer درشکل 14 نشان داده شده است.



شکل 6-13- نحوه اختلاط سیال در یک static mixer. رنگ قرمز نشانگر نمونهٔتزریق شده است. همانطور که از شکل پیداست پس از گذشتن سیال قرمز از 6 المان اختلاط، کاملاًدر سیال آبی مخلوط شده است.

شکل 6-14- مخلوط کننده‌های ایستا. به پره‌های متنوع و لوله‌ای که در آن قرار می گیرند دقت کنید.

فصل هفتم

# اکسترودر
# Extruder

## 7-1- شرح و توصیف

یکی از مهمترین ویژگی پلیمرها و به ویژه پلاستیک‌ها سهولت شکل‌پذیری آنهاست. در بعضی حالات، قطعات نیمه‌کاملی نظیر ورقه‌ها یا میله‌های تولید شده، متعاقباً با استفاده از روشهای متداول ساخت، مانند جوشکاری یا ماشین‌کاری به قطعه نهایی تبدیل می‌شود. اما در بسیاری مواقع، قطعه نهایی، علیرغم برخورداری از شکلی کاملاً پیچیده، طی یک مرحله تولید می‌شود.

عملیات حرارت دادن، شکل دادن و خنک کردن ممکن است( مانند تولید لوله به روش اکستروژن[8] ) به دنبال یکدیگر و بدون وقفه(Continuous) انجام شود و یا ممکن است طی مراحلی ناپیوسته، زمانگیر و تکرار شونده ( مثل عملیات تولید تلفن خانگی به روش قالبگیری تزریقی) صورت پذیرد که در اکثر موارد، فرایند به طور خودکار انجام شده برای تولید انبوه بسیار مناسب است. طیف وسیعی از روشهای شکل‌دهی برای پلاستیک‌ها و پلیمرهای شکل‌پذیر کاربرد دارد. در بسیاری از حالات انتخاب روش به چگونگی شکل نهایی قطعه و گرما نرم یا گرما سخت بودن ماردون بستگی دارد. بنابراین در عملیات طراحی، آگاهی طراح از روش‌های متنوع شکل‌دهی، حائز اهمیت است زیرا اشکال ناجور و نامناسب قطعه و یا مسائل جزئی کار طراحی، ممکن است محدودیت‌هایی در انتخاب روش قالبگیری برای طراح ایجاد کند.

## 7-2- دسته‌بندی اکسترودرهای متداول

این دسته بندی شامل گونه‌های زیر می‌شود:

1- اکسترودر تک‌ماردونه

2- اکسترودر دو ماردونه

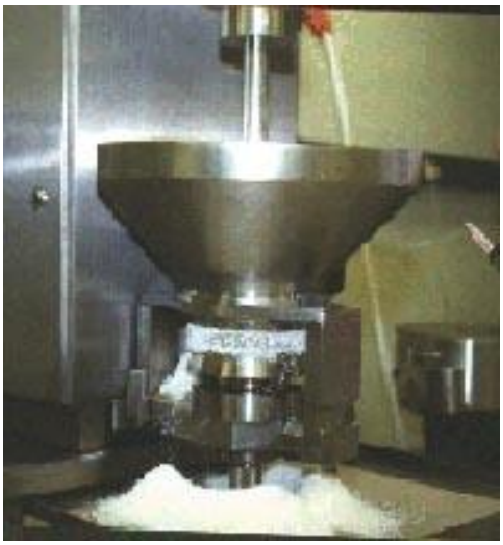
### 7-2-1- مشخصه‌های عمومی اکسترودر تک‌ماردونه

یکی از متداولترین روشهای شکل‌دهی پلاستیک‌ها، اکستروژن است که از یک ماردون در داخل محفظه‌ای تشکیل شده است. پلاستیک‌ها معمولاً به صورت دانه‌ای‌شکل یا خاکه‌نرم از قیف به ماردونه تغذیه می‌شود. آنگاه در حال حمل به وسیله ماردون در طول محفظه، در اثر هدایت حرارت از طرف گرم‌کننده‌های محفظه (Barrel Heaters) و برش ناشی از حرکت بر روی لبه‌های ماردون گرم می‌شود. عمق معبر (Channel-Depth) در طول ماردون کاهش یافته موجب فشرده شدن مواد می‌شود. در انتهای محفظه اکسترودر، مذاب با عبور از حدیده ای به شکل مورد نظربرای محصول نهایی در می آید.همانطورکه بعداً خواهیم دید،به دلیل امکان استفاده از حدیده‌های مختلف، اکسترودر یعنی مجموعه محفظه و ماردون را می‌توان به عنوان بدنه و واحد اصلی تولید قطعاتی با اشکال مختلف به کاربرد اکسترودر ماردونه سه قسمت مجزا دارد:

[8] Extrusion

الف) ناحیه تغذیه (Feed Zone):

کار این ناحیه، دادن گرمای اولیه به پلاستیک و انتقال آن به نواحی بعدی است. طراحی این ناحیع حائز اهمیت است. زیرا عمق ثابت ماردون طوری انتخاب شود که مواد لازم و کافی را به ناحیه اندازه گیری (Metering Zone) تغذیه کند؛ به طوری که نه دچار گرسنگی شود و نه در اثر زیاد بودن مواد، لبریز و پس زده شود. طراحی مناسب (Optimum) و متعادل، به طبیعت و شکل مواد تغذیه‌شونده Feedstock))، شکل هندسی (Geometry) ماردون و خواص اصطکاکی پلاستیک نسبت به ماردون و محفظه بستکی دارد. رفتار اصطکاکی مواد تغذیه شده، تاثیر قابل توجهی بر آهنگ ذوب شدن مواددارد.شکل شماتیک این ناحیه را می توان در زیر دید:



شکل 7-1ـ ناحیه تغذیه

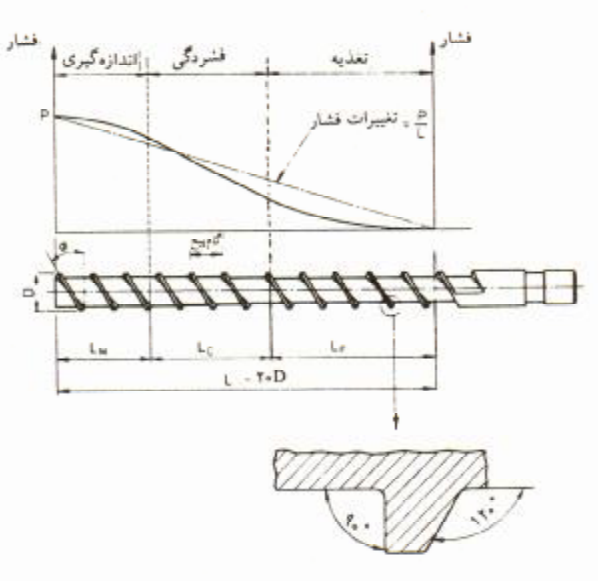
ب) ناحیه تراکم و فشردگی (Compression Zone):

در این ناحیه، عمق ماردونه به تدریج کاهش می‌یابد که موجب متراکم شدن و فشردگی پلاستیک می‌شود. این فشردگی دو نقش عمده ایفا می‌کند؛ یکی آنکه هوای محبوش در داخل مواد را به ناحیه تغذیه می‌راند و دیگر آنکه انتقال حرارت را با کاهش دادن ضخامت مواد بهبود می‌بخشد.

ج) ناحیه اندازه‌گیری و سنجش:

در این ناحیه، عمق ماردونه یکسان و ثابت، اما بسیار کمتر از عمق ناحیه تغذیه است. در این ناحیه، مذاب به صورت همگون و یکنواخت در می‌آید به طوری که با آهنگ ثابتی، در درجه حرارت و فشار یکسان و ثابت، به حدیده تغذیه می‌شود. این ناحیه به سهولت و سادگی تحلیل و ارزیابی می‌شود؛ زیرا مشتمل بر جریان مذاب گرانروان در داخل مجرایی با عمق و ابعاد ثابت است.

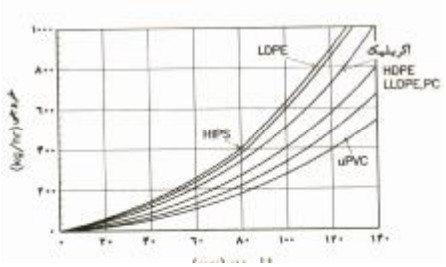
تغییرات و چگونگی پیدایش فشار (Build up) در طول ماردونه در شکل زیر نشان داده شده است.




شکل 7-2ـ چگونگی تغییرات فشار در طول اکسترودر

طول نواحی سه‌گانه ماردون خاص، بستگی به ماده‌ای دارد که تحت اکستروژن قرار می‌گیرد. برای نمونه نایلون خیلی سریع ذوب می‌شود، به طوری که تراکم و فشردگی مذاب در طول یک گام از ماردون نیز قابل تامین است. اما پلی‌وینیل کلراید، به حرارت بسیار حساس است و لذا طول ناحیه فشردگی برای آن برابر با طول ماردون است.

از آنجا که پلاستیک‌ها دارای گرانروی‌های متفاوت هستند، رفتار آنها در خلال اکستروژن نیز متفاوت است. شکل زیرآهنگ وزنی خروجی را برای پلاستیک‌های گوناگون در اکسترودرهایی با قطرهای مختلف، نشان می‌دهد.

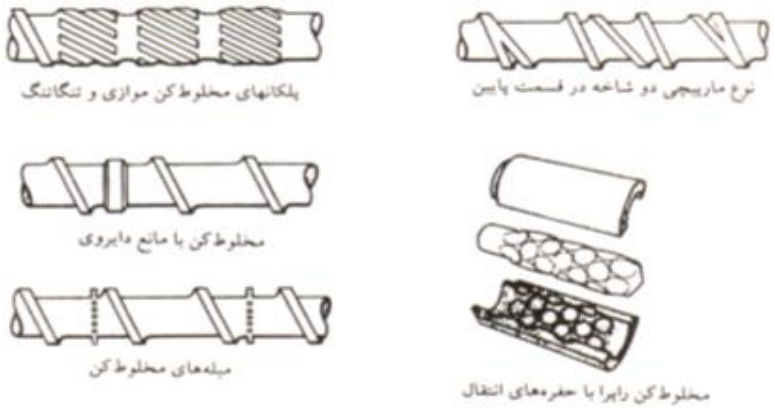



شکل 7-3- آهنگ وزنی خروجی در خلال اکستروژن

این نمودار به عنوان ایده‌ای از رتبه‌بندی مواد به کار می‌رود. آهنگ وزنی خروجی واقعی ٪25 ± با آنچه نشان داده شده اختلاف نشان می‌دهد که بستگی به دما، سرعت ماردون و غیره دارد.

در اکسترودرهای تجاری، نواحی اضافی برای بهبود کیفیت محصول به ماردون افزوده می‌شود. به عنوان نمونه، ناحیه اختلاطی (Mixing Zone) مشتمل بر پلکان‌هایی(Flights) با گام کمتر یا معکوس، به منظور کسب

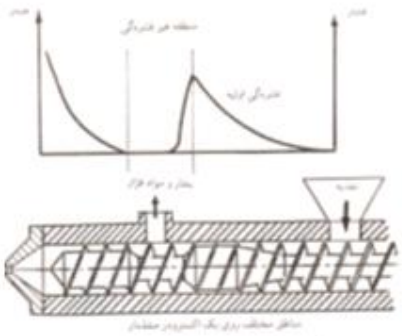
اطمینان از یکنواختی مذاب و کافی بودن آن در منطقه اندازه‌گیری، استفاده می‌شود. شکل زیر برخی از طراحی‌های مختلف را برای ناحیه اختلاط روی ماردون اکسترودر نشان می‌دهد.




شکل 7-4- طراحی نواحی مختلف اختلاط در اکسترودر

برخی از اکسترودرها ناحیه هواگیری (منفذ خروج هوا) وجود دارد. وجود این ناحیه به این دلیل است که برخی پلاستیک‌ها جاذب رطوبت (Hygroscopic) هستند یعنی از محیط اطراف خود رطوبت جذب می‌کنند و اگر به همین صورت مرطوب در اکسترودر فاقد ناحیه هواگیری استفاده شوند، کیفیت محصول نهایی خوب نیست؛ زیرا در داخل مذاب، بخار آب محبوس می‌شود. برای رفع این مشکل راه‌حل آن است که مواد تغذیه‌شونده به اکسترودر را قبلاً خشک کنیم. این روش گران و پر هزینه است و امکان آلودگی نیز در مواد ایجاد می‌کند.

روش دوم، استفاده از محفظه‌های منفذدار (Vented Barrels) است. همانطور که در شکل زیر مشاهده می‌شود، در اولین قسمت ماردون، مواد که به صورت دانه‌بندی است، پس از ورود ذوب شده، سپس به طریق معمول فشرده و همگن می‌شود.



شکل 7-5- چگونگی استفاده از محفظه های منفذ دار

آنگاه با ورود به ناحیه غیر فشردگی (Decompression-Zone)، فشار مذاب به محیط کاهش می‌یابد؛ این عمل، امکان خروج و گریز بخار و سایر مواد فرار از داخل مذاب را از طریق منفذ تعبیه شده در بدنه اکسترودر

فراهم می‌کند. آنگاه مذاب در طول محفظه به ناحیه دوم فشردگی هدایت می‌شود تا از محبوس شدن هوا در مذاب ممانعت به عمل آید.

دلیل دفع بخار این است که در دمایی برابر با $C250^{o}$، بخار آب موجود در پلاستیک مذاب دارای فشاری برابر $4\ MN/m^2$ است که موجب خروج آسان آن از مذاب و گریز از منفذ خروج می‌شود. توجه کنید که چون فشار محیط تقریباً $0.1\ MN/m^2$ است، استفاده از مکش خلاء (Vacuum) در منفذ خروجی، اثر ناچیزی در خروج بخار و مواد فرار دارد.

یکی دیگر از اجزای مهم اکسترودر، صافی(Gauze Filter) پس از ماردون و پیش از حدیده است. این صافی به صورت کاملاً موثری هرگونه مواد ناهمگون و ناخالصی‌ها را از مذاب جدا می‌کند. عدم وجود آن حتی ممکن است موجب انسداد حدیده گردد. این صفحات صاف و غربال‌کننده معمولاً مذاب را تا مقیاس 120-$\mu m150$ صاف و تصفیه می‌کنند. اما شواهد موجود نشان می‌دهد که ذراتی کوچکتر از مقیاس فوق، موجب شروع ایجاد ترک‌های مویین در تولیدات پلاستیکی نظیر لوله‌های تحت فشار پلی‌اتیلنی می‌شود. برای چنین مواردی صافی‌های بسیار ظریفی در مقیاس $\mu m45$ به کار می‌رود که به گونه‌ای موثر و جالب توجه، کیفیت و عمر مفید محصول را بهبود می‌بخشد.

از آنجا که این صافی‌های ظریف آسیب‌پذیر است، توسط صفحه سرعت شکنی (Breaker plate) هدایت می‌شود. این صفحه تعداد زیادی سوراخهای مماس بر یکدیگر و بسیار تنگاتنگ دارد که بدون اینکه به ذرات جامد سوخته (Dead-Spots) احتمالی همراه با مذاب اجازه ورود دهد، مذاب را عبور می‌دهد. این صفحه سرعت شکن همچنین جریان مذابی را که پس از خروج به صورت حلزونی در آمده است خطی می‌کند. چون منافذ این صافی‌های ظریف به تدریج بسته می‌شود، پی در پی باز شده، تعویض می‌شود. در بسیاری از اکسترودرهای پیشرفته با صافی‌های ظریف، کار تعویض آنها بدون نیاز به توقف اکسترودر صورت می‌گیرد. همچنین باید خاطر نشان کنیم که اگرچه این وظیفه اصلی صفحه سرعت‌شکن و صاف نیست؛ اما به ایجاد فشار معکوسی که موجب بهبود اختلاط مذاب می‌شود کمک می‌کن. چون فشار در حدیده حائز اهمیت است، شیری (valve) پس از صفحه سرعت‌شکن در اکسترودر وجود دارد که امکان تنظیم لازم را فراهم می‌آورد.

### 7-2-1-1- چگونگی جریان (Mechanism of flow)

پلاستیگ با حرکت در طول ماردون به صورت زیر ذوب می‌شود. نخست لایه نازکی(Thin Film) از ماده مذاب در جداره محفظه تشکیل می‌شود. با چرخش ماردون این لایه از جداره محفظه کنده شده به قسمت جلوی پیکان ماردون انتقال می‌یابد و وقتی که به سطح خود ماردون (Core of screw) می‌رسد، دوباره به طرف بالا جاروب می‌شود. بدین ترتیب حرکت چرخشی در جلوی پیکان ماردون (پیشانی ماردون ) به وجود می‌آید. در آغاز، پلکان ماردون حاوی دانه‌های جامد است که در اثر حرکت چرخشی به داخل حوضچه مذاب جاروب می‌شود. با استمرار چرخش ماردون، مواد بیشتری به داخل حوضچه مذاب ریخته می‌شود. تا اینکه در نهایت فقط

مواد مذاب است که پلکانهای ماردون اکسترودر وجود دارد. در اثنای گردش ماردون در داخل محفظه، حرکت مواد در راستای طول ماردون بستگی به چسبندگی مواد به ماردون یا محفظه دارد. به طور نظری در مرز افراط و تفریط (Extremes) وجود دارد. در یکی فقط مواد به درون ماردون چسبیده است، در نتیجه ماردون و مواد مانند استوانه توپر و جامدی در داخل محفظه می‌چرخد. در این حالت نامناسب هیچ خروجی وجود ندارد. در حالت دوم، مدار روی ماردون می‌لغزد و مقاومت زیادی در برابر گردش ماردون در داخل محفظه به وجود می‌آورد. در این حالت حرکتی در جهت محور دستگاه برای مذاب فراهم می‌شود که بهترین حالت ممکن است. در عمل، رفتار واقعی، حالتی بین دو واحد است زیرا مواد هم به ماردون و هم به بدنه اکسترودر می‌چسبد. خروجی مناسب ناشی از به وجود آمدن جریان کشنده و جلو برنده‌ای (Drag flow) در اثر چرخش ماردون و سکون محفظه است که به حرکت سیال گرانروان بین دو صفحه موازی شباهت دارد که در آن صفحه‌ای ثابت و صفحه دیگر دارای حرکت است. علاوه بر این، جریان دیگری هم ناشی از اختلاف فشار بین دو انتهای ماردون است وجود دارد و به این دلیل که حداکثر فشار در انتهای اکسترودر به وجود می‌آید، جریان فشاری(Pressure flow) خروجی را کاهش می‌دهد. همچنین به دلیل فاصله(Clearance) که بین پلکانهای ماردون و بدنه اکسترودر وجود دارد اجازه نشتی به مواد در جهت عکس امتداد ماردون داده، به طور موثری خروجی گاز را کاهش می‌دهد. فرار و گریز مواد به سمت عقب ماردون در حالتی که ماردون فرسوده(Worn) باشد بیشتر است.

گرما یا سرمای خارج اکسترودر نیز نقش مهمی در نحوه ذوب شدن مواد ایفا می‌کند. در اکسترودرهایی که دارای خروجی زیادی هستند، مواد، طول محفظه اکسترودر را سریع می‌کند. در نتیجه گرمای ذوب شدن کامل در اثر عمل برش تولید می‌شود و به استفاده از حرارت‌دهنده‌های خارجی محفظه اکسترودر نیازی نیست. بنابراین در این حالت اگر گرمای زیادی در مذاب به وجود آمده باشد سرد نگه داشتن محفظه حائز اهمیت است. در برخی مواقع خنک کردن ماردون اکسترودر نیز لازم است که البته اثری بر درجه حرارت مذاب ندارد. اما اثر مالشی(اصطکاکی) بین پلاستیک و ماردون را کاهش می‌دهد. در همه اکسترودرها خنک کردن محفظه اکسترودر در ناحیه تغذیه ضروری است و لازم است تا بتوان اطمینان کاملی از تغذیه بدون درد سر مواد به اکسترودر به دست آورد.

طبیعت و حالت گرمایی مذاب در اکسترودر با دو حالت ترمودینامیکی مقایسه می‌شود. اولی حالت بی در رو(Adiabatic) است؛ به این مفهوم که سیستم کاملاً مجزا از محیط خارج است و هیچ جذب و دفع حرارتی در آن رخ نمی‌دهد. اگر این حالت مطلوب در اکسترودر حاکم نباشد، فقط مقداری کار لازم است روی مذاب انجام شود تا گرمای معین تولید کند که به ازاء آن هیچ ضرورتی به گرم یا سرد کردن دستگاه نباشد. حالت مطلوب دوم، به همدما(Isothermal) موسوم است که در این حالت، درجه حرارت در تمام نقاط مذاب یکسان است و در نتیجه محفظه به گرم کردن و سرد کردن مستمر و دائمی برای جبران هرگونه اتلاف یا اخذ حرارت از مذاب برای ثابت ماندن دما نیاز دارد. در عمل، عملیات حرارتی در اکسترودرها بین دو حالت مرزی فوق قرار دارد. اکسترودرها ممکن است بدون هیچ حرارت‌دهنده یا سرد کننده خارجی کار کنند. لیکن در واقع در این

صورت بی در رو نیست؛ زیرا اتلاف حرارت به وقوع می‌پیوندد. از طرف دیگر با حالت همدما در تمام طول اکسترودر مواجه نیستیم زیرا دانه‌های جامد نسبتاً سردی به اکسترودر تغذیه می‌شود. اما برخی از نواحی اکسترودر ممکن است خیلی نزدیک به حالت همدما باشد. معمولاً ناحیه اندازه‌گیری در بحث و تحلیل همدما در نظر گرفته می‌شود.

در حالت کلی:

جریان خروجی از اکسترودر را برآیند سه مولف می‌دانیم

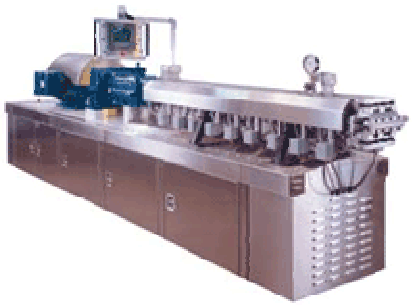
1- جریان جلو برنده و کشنده

2- جریان فشاری

3- جریان نشتی(Leakage flow)

## 7-2-2- مشخصه‌های عمومی اکسترودر دوماردونه

در سالهای اخیر استفاده از اکسترودرهای دوماردونه که در داخل محفظه داغ اکسترودر حرکت چرخشی دارد، افزایش یافته است. این دستگاه‌ها در مقایسه با اکسترودرهای تک‌ماردونه تفاوتهایی در آهنگ خروجی، بازده اختلاط، حرارت تولید شده و نظایر آن نشان می‌دهد. خروجی اکسترودر دوماردونه معمولاً سه برابر اکسترودر تک‌ماردونه‌ای با همان قطر و سرعت است.در زیرطرحی ازاکسترودردوماردون آمده است:

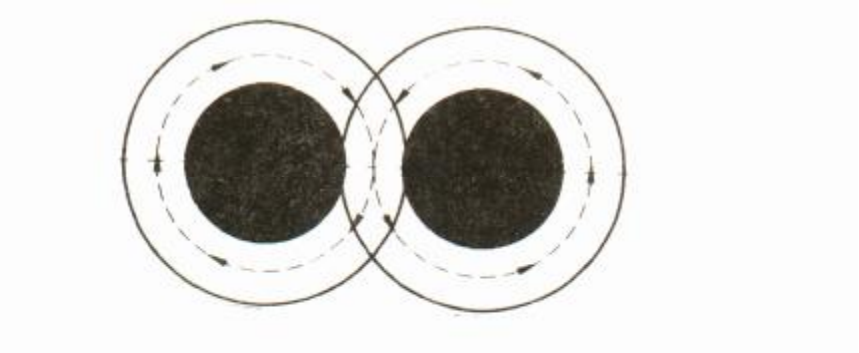


شکل 7-6- نمونه ای از اکسترودر دوماردون

اگرچه اصطلاح "ماردون دوقلو" اصطلاحی بین المللی برای اکسترودرهای دو ماردونه است؛ اما دو ماردون لزوماً یکسان نیستند. در واقع انواع گوناگونی از این دستگاه موجود است. برخی از آنها را که دارای ماردن‌هایی با گردش در جهت مخالف یا موافق یکدیگر است نشان می‌دهدو به علاوه ماردونها ممکن است به صورت جفت شده(Conjugated) یا جفت نشده(Non-Conjugated) باشند. در حالت جفت نشده، بین پلکان‌های ماردون فضای خالی وجود دارد که امکان حضور مواد را نیز فراهم می کند.

در اکسترودر دو ماردونه‌ای با جهت چرخش مخالف یکدیگر، مواد دچار برش و فشردگی می‌شوند(نظیر آنچه در غلتکرانی رخ می‌دهد) یعنی مواد بین غلتک‌هایی با جهت چرخش متفاوت، فشرده می‌شود. در

اکسترودر حاوی دو ماردون با جهت چرخش یکسان، مواد از یک ماردون به دیگری در مسیری به شکل 8 منتقل می‌شود،(نظیر شکل 7-8).



شکل 7-8- انتقال مواد در ماردون

این گونه آرایش برای مواد حساس به حرارت کاملاً مناسب است؛ زیرا مواد در اکسترودر به سرعت منتقل می‌شود بدون اینکه کمترین احتمال ماندگار شدن موضعی(Entrapment) مواد وجود داشته باشد. حرکت مواد در اطراف ماردون‌های جفت نشده کمتر (کندتر) است ولی نیروی جلوبرنده(Propulsive) بزرگتر است. در جدول زیر اکسترودرهای تک‌ماردونه و دوماردونه با گردش هم‌جهت و غیره هم‌جهت مقایسه شده است:

| نوع | تک‌ماردونه | ماردون با گردش همجهت | | | **دوماردونه با گردش خلاف جهت** |
|---|---|---|---|---|---|
| | | با سرعت کم | با سرعت زیاد | | |
| اصل | اصطکاک بین استوانه و مواد، همچنین بین ماردون و ماده | اصولاً به اثر اصطکاک و وابسته است نظیر آنچه در اکسترودر تک‌ماردونه اتفاق می‌افتد. | | | **انتقال نیروی مکانیکی بر اساس پمپ دنده‌ای** |
| بازده انتقال | کم | متوسط | متوسط | | **زیاد** |
| بازده اختلاط | کم | متوسط/ زیاد | متوسط/ زیاد | | **زیاد** |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| اثر برشی | زیاد | متوسط | زیاد | **کم** |
| اثـــر خـــود پاک کنندگی | ناچیز | متوسـط/ زیاد | زیاد | **کم** |
| بازده انرژی | کم | متوسـط/ زیـــــــاد متوسط/زیاد | زیاد | **زیاد** |
| تولید گرما | زیاد | متوسط | زیاد | **کم** |
| توزیـع درجـه حرارت | گسترد ه | متوسـط باریک | زیاد | **باریک** |
| حـــــداکثر سرعت گردش | -300 100 | 25-35 | -300 250 | **35-45** |
| **حـــــداکثر انـــدازه مفیـــد L/D ماردون** | **-32 30** | **7-18** | **30-40** | **10-21** |

جدول 1- ویژگی‌های مهم اکسترودرهای مختلف

## 7-3- روش‌های شکل‌دهی با استفاده از اکسترودر

اکستروژن روشی بسیار انعطاف‌پذیری است و با استفاده از حدیده مناسب می‌توان طیف وسیعی از تولیدات را تهیه کرد. برخی از این روش‌های بسیار متداول را در اینجا ذکر می‌کنیم:

الف) تولید دانه‌گونه(Granule production)

ب) تولید پروفیل(Profile production)

ج) تولید ورقه‌های بسیار نازک به طریقه دمشی(Film blowing)

د) قالبگیری دمشی (Blow Molting)

فصل هشتم

# شیر
# Valve

## 8-1- شرح وتوصیف

شیر از صدها سال پیش در مصر، یونان و روم استفاده می‌شده اما تحول عظیم در ساخت شیرها پس از انقلاب صنعتی روی داد. هنگامی که اولین موتور بخار در سال 1705 اختراع شد، تکنولوژی ساخت شیرهای جدید هم پا به عرصه گذاشت. امروزه پیشرفتهای صنعتی بدون حضور شرکتهای سازنده شیر امکان‌پذیر نیست. شرکتهایی که با ساخت شیرهای مختلف، دستگاههای صنعتی را در مهار دامنه وسیعی از فشارها یاری می کنند.

شکل 8-1- نمونه‌ای از شیرهای عظیمی که در صنعت استفاده می‌شود.

## 8-2- تقسیم‌بندی انواع شیرها

با گسترش فزاینده تنوع شیرها، تقسیم بندی‌های متفاوتی برای شیرها بوجود آمده است، که بر حسب نیاز از هر کدام استفاده می‌شود.

### 8-2-1- تقسیم بندی شیرها از نظر کاربرد و عملکرد

این نوع تقسیم بندی صرفا بر اساس وظیفه شیر صورت می گیرد.

### 8-2-1-1- شیرهای قطع و وصل (on-off)

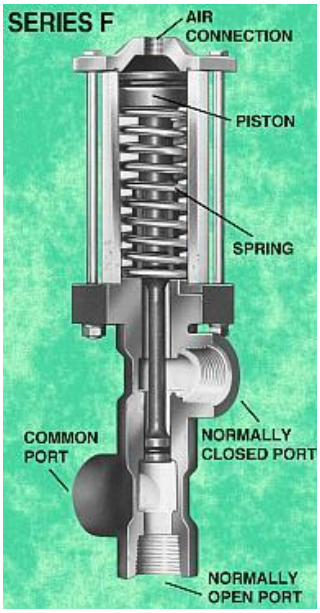
این نوع شیرها برای باز و بسته کردن یکباره مسیر جریان بکار می‌رود. جریان را به آسانی در این شیرها نمی‌توان کنترل کرد، زیرا فقط در دو وضعیت باز وبسته می‌توانند عمل کنند.

### 8-2-1-2- شیرهای کنترل جریان (Flow control)

این نوع از شیرها برای اصلاح به واسطه تغییر در شدت جریان سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. تنوع این شیرها بسیار زیاد بوده که بعداً در مورد آنها به طور مفصل توضیح خواهیم داد.

### 8-2-1-3- شیرهای انحرافی (Divert flow)

این نوع از شیرها برای ایجاد انحراف در مسیر جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند که معروفترین آنها شیرهای سه‌راهی است، اما شیرهای 4راهی و 5 راهی هم برای کاربردهای خاص ساخته شده‌اند.




شکل 8-2- نمونه‌ای از شیرهای انحرافی

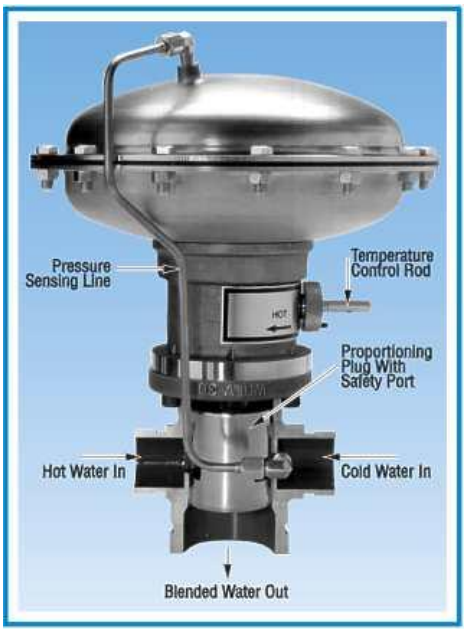
### 8-2-1-4- شیرهای قطع و وصل دو مرحله‌ای (Tow stage shutoff)

این نوع از شیرها دارای سه وضعیت باز، نیمه‌باز و بسته هستند و برای کنترل جریان آزادی عمل بیشتری نسبت به شیرها قطع و وصلی در اختیار ما قرار می‌دهند.

شکل 8-3- نمونه‌ای از شیرهای دومرحله‌ای

### 8-2-1-5- شیرهای مخلوط‌کننده (Blending)

در بسیاری از مواقع نیاز به آمیختن سیالات با نسبتهای مختلف داریم، به این منظور شیرهایی ساخته شده که توانایی کنترل دو و یا چند سیال مجزا و سپس ترکیب آنها را داشته باشند(شکل 8-4). برای تقریب ذهن در این مورد می‌توان به شیرهای دوش حمام که کنترل دبی آب سرد و گرم را در اختیار ما قرار می‌دهند اشاره کرد.




شکل 8-4- نوعی از شیرهای Blending

شیرهایی که در صنایع استفاده می‌شود را از نظر ساختار می‌توان به دو گروه کلی تقسیم کرد:
شیرهای خطی(Linear) و شیرهای چرخشی(Rotary).

علاوه بر این شیرها، طراحی‌هایی هم برای شیرهای خاص شده که این نوع شیرها کاربرد عمومی ندارند، بلکه فقط در مکانهای ویژه از آنها استفاده می‌شود.

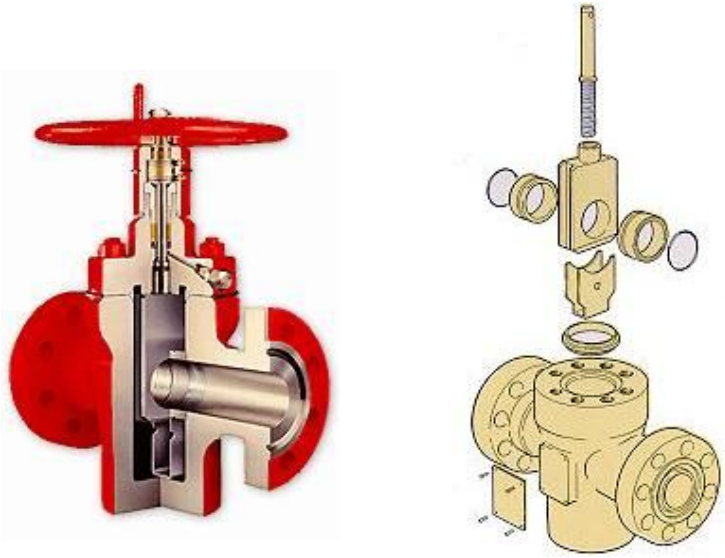
حال به تقسیم‌بندی ساختاری انواع شیرها باز می‌گردیم و انواع آنها را توضیح می‌دهیم.

## 8-2-2- شیرهای خطی (Linear)

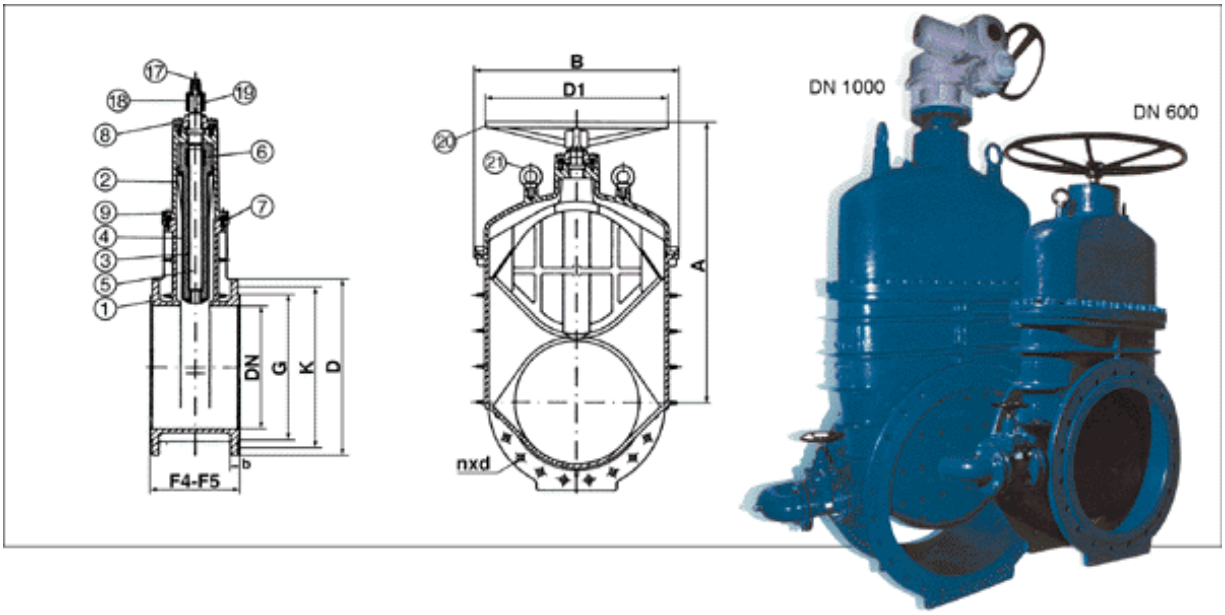
نام‌گذاری این شیرها به این دلیل است که عامل کنترل جریان در داخل شیر به صورت خطی بالا یا پایین حرکت می‌کند، بر خلاف شیرهای چرخشی که عامل کنترل به واسطه چرخش خود، جریان را کنترل می‌کند. این نوع شیرها به چند دسته کلی تقسیم می‌شوند که در زیر به آنها اشاره خواهیم کرد.

### 8-2-2-1- شیرهای کشویی (Gate valve)

این شیرها به دلیل طراحی و ساخت آسان آن و عدم نیاز به تکنولوژی پیشرفته برای ساخت، یکی از پرکاربردترین شیرها هستند. این شیرها در حالت باز، آشفتگی کمی را در مسیر ایجاد کرده و همچنین افت فشار ایجادی آنها قابل توجه نیست. این شیرها در مکانهایی استفاده می‌شود که از شیر به ندرت استفاده شده و در صورت نیاز بتوان جریان را کاملاً مسدود کرد. از این نوع شیرها نمی‌توان در مسیرهایی که نیاز به کنترل دقیق است استفاده کرد زیرا ساختار شیر اجازه کنترل دقیق را به ما نمی‌دهد. مزیت عمده این شیرها این است که در حالت کاملاً باز افت فشار کمی ایجاد کرده و در حالت کاملاً بسته به خوبی می‌تواند از عبور جریان جلوگیری کند. از معایب این شیرها می‌توان از استعداد آنها برای ایجاد لرزش در مسیر جریان را نام برد؛ همچنین در وضعیت‌های اظطراری نمی‌توان عمل باز و بسته کردن را به سرعت انجام داد. برای شیرهای بزرگ در صورت عدم وجود سیستمهای هیدرولیکی نیروی زیادی برای تنظیم جریان لازم است.

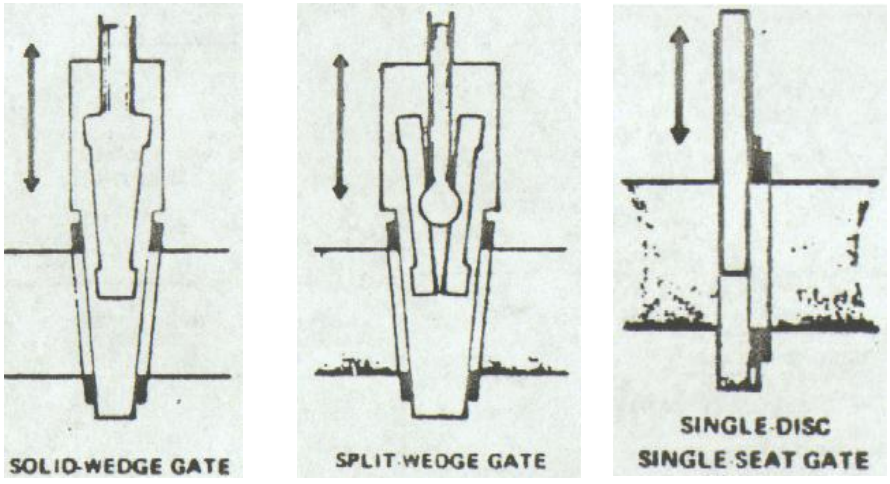


شکل 8-5- ساختار داخلی شیرهای Gate




شکل 8-6- تصویری از شیرهای Gate

انواع مختلفی از شیرهای کشویی وجود دارد که در زیر سه نوع آنها آورده شده است. شکل الف، شیر دریچه‌ای دیسکی را نشان می‌دهد که عامل کنترل جریان در این نوع شیر دیسک متحرکی در داخل شیر است و با بالا و پایین رفتن دیسک مقدار جریان افزایش و کاهش می‌یابد. شکل ب و ج هر دو نشان‌دهنده دو شیر Wedge Gate هستند اما مزیت شیر Split wedge gate نسبت به شیر دیگر این است که در این شیر کنترل جریان




ج ب الف

شکل 8-7- الف و ب و ج- انواعی از شیرهای Gate

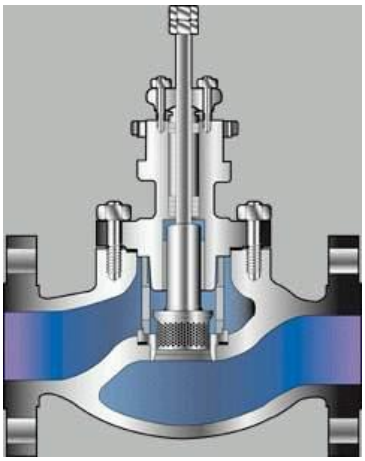
بهتر صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر در این شیر به دلیل انعطاف مکانیکی دریچه، تنظیم شدت جریان در

مقادیر پایین راحت‌تر صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است در شدت‌جریان‌های بالا این دو شیر تفاوت زیادی ندارند. از طرف دیگر هزینه ساخت شیرهای Split wedge gate از Solid wedge gate بیشتر است و به این ترتیب از لحاظ اقتصادی شیر Solid wedge gate مقرون به صرفه‌تر است.

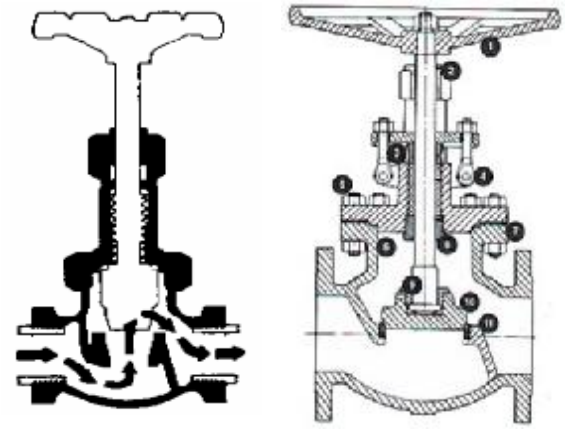
### 8-2-2-2- شیرهای گلوب (Globe valve)

همانگونه که در شکل پایین دیده می‌شود این نوع شیر دارای زائده‌ای است که با چرخش دسته، به طرف بالا و پایین حرکت کرده و مسیر عبور جریان را باز و بسته می‌کند.

این شیرها در محل‌هایی استفاده می‌شوند که نیاز به باز و بسته کردن جریان به طور دائم وجود دارد. این شیرها افت فشار زیادی را در مسیر جریان ایجاد می‌کنند، به همین دلیل توصیه شده که در جاهایی که افت فشار مطلوب نیست از این شیرها استفاده نشود. تنها چند دور با نیروی نسبتاً کم لازم است که شیر را از حالت کاملاً باز به حالت کاملاً بسته تبدیل کند. اما در شیرهای بزرگ برای چرخاندن احتیاج به نیروی بیشتری متناسب با ظرفیت شیر وجود دارد.

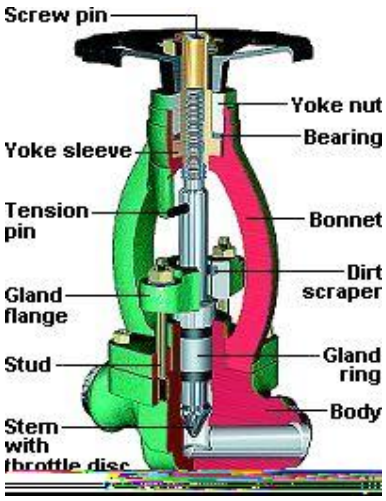


شکل 8-8-نمایی از داخل یک شیرGlobe



شکل 8-9- نمایی از شیرهای Globe

شکل 8-10- برشی از شیر Globe




شکل 8-11- تصویری از قسمت‌های داخلی شیر Globe

### 8-2-2-3- شیرهای زاویه‌ای (Angle valve)

شیرهای زاویه‌ای زیرمجموعه شیرهای Globe به شمار می‌روند و به همان صورت کار می‌کنند. تنها تفاوت آنها این است که در شیرهای زاویه‌ای مسیر خروجی سیال با ورودی، زاویه‌ای می‌سازد که متناسب با نیاز ممکن است 90 درجه، کوچکتر و یا بزرگتر باشد. هدف اصلی از بکار بردن شیرهای زاویه‌ای، حذف زانویی و خم‌ها

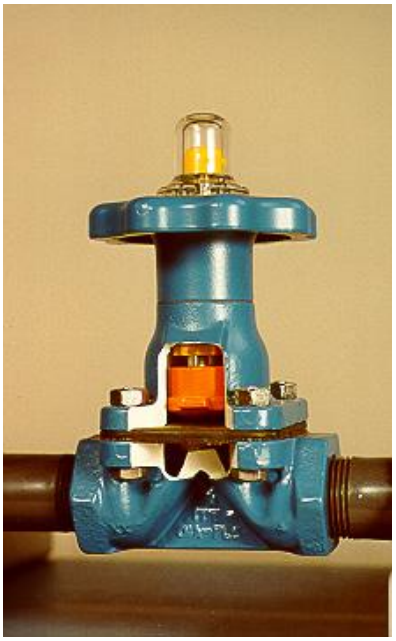
از مسیر جریان است.

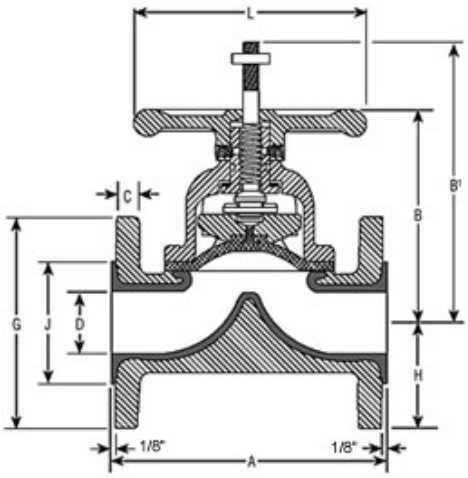
شکل 8-12- نمونه‌ای از شیرهای زاویه‌ای

### 8-2-2-4- شیرهای دیافراگمی (Diaphragm valve)

همانگونه که در شکل‌های پایین دیده می‌شود این شیر دارای قسمت دیافراگم‌مانند و متحرکی است که با حرکت به طرف بالا و پایین می‌توان مسیر جریان را باز وبسته کند.

این نوع از شیرها در مکان‌هایی استفاده می‌شود که هدف، کنترل یک سیال خورنده باشد. دلیل این امر آن است که می‌توان دیافراگم شیر را طوری طراحی کرد که سیال با هیچ‌یک از قطعات مکانیکی شیر تماس پیدا نکند. از کاربردهای دیگر این شیرها برای سیالاتی است که دارای ذرات ریز معلق زیادی است.



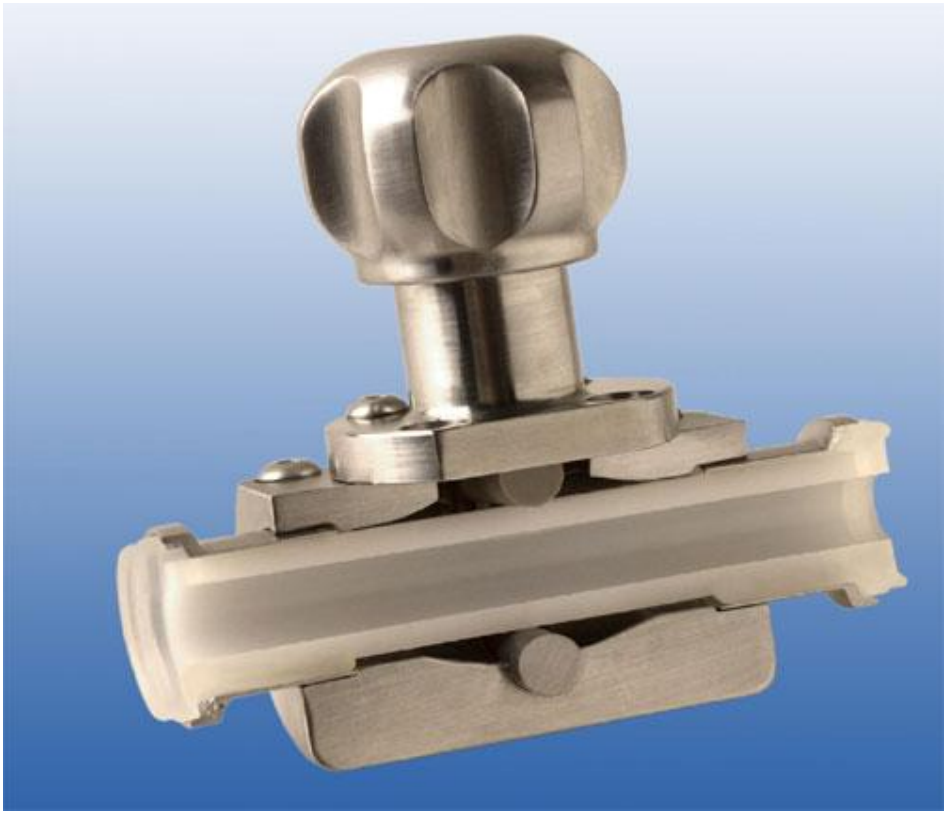



شکل 8-13- -ساختار داخلی شیرهای دیافراگمی

### 8-2-2-5- شیرهای پینچ (Pinch valve)

این نوع از شیرها دارای قسمت انعطاف‌پذیری شبیه به یک لوله پلاستیکی است که با فشردن این لوله، مسیر جریان کنترل می‌شود. شیرهای پینچ از نظر طراحی و ساخت آسانترین نوع شیرها و همچنین از نظر قیمت، جزء ارزانترین آنها محسوب می‌گردند. کاربرد وسیع آنها در آزمایشگاه‌ها برای کنترل جریان سیال و در صنعت برای کنترل جریانهایی با ذرات معلق زیاد است. استفاده دیگر این شیرها در مکانهایی است که خورندگی و یا آلودگی سیال می‌تواند مشکل‌ساز باشد. از مزایای این شیرها کم بودن افت فشار آن است که به واسطه طراحی ساده آن مزیت مهمی محسوب می‌شود. از جمله صنایعی که از این نوع شیرها استفاده می‌کنند می‌توان به صنایعی اشاره کرد که با پسابهای غلیظ ارتباط دارند، مانند صنایع تصفیه فاضلاب، کاغذسازی، معدن و ...

شکل 8-14- نمونه‌هایی از شیرهای پینچ

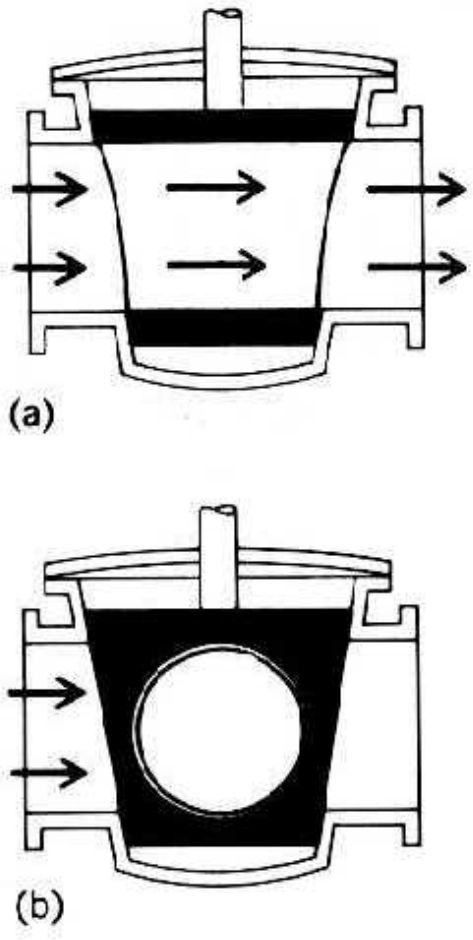


شکل 8-15- نمونه‌هایی از شیرهای پینچ

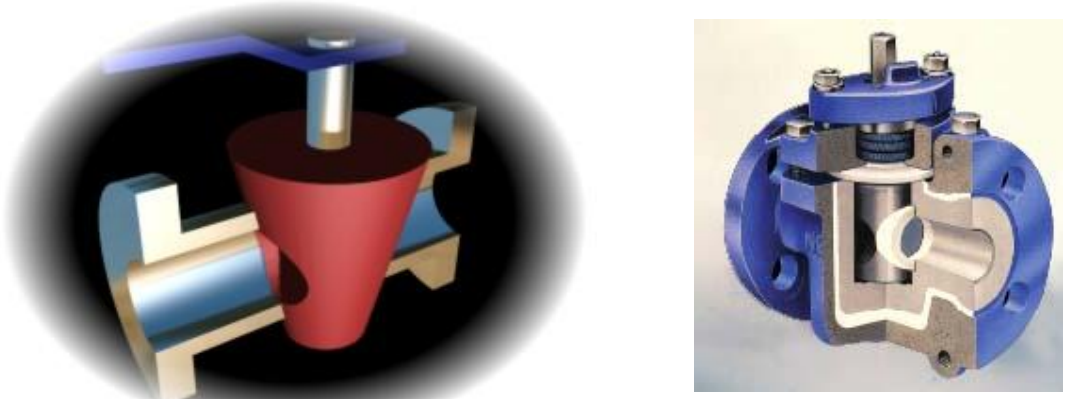
## 8-2-3- شیرهای چرخشی (Rotary valve)

### 8-2-3-1- شیرهای استوانه‌ای (Plug valve)

شیرهای استوانه‌ای احتمالاً قدیمی‌ترین نوع شیرهای ساخت بشر می‌باشند. شیری که قرنها پیش توسط انسانها ساخته شده بود متشکل از یک استوانه چرخنده می‌باشد که در جهت عمود بر محور سوراخ شده و با چرخاندن ربع دور از حالت کاملاً باز به حالت کاملاً بسته تغییر وضعیت می‌دهد. شیرهای استوانه‌ای امروزی با کمی تغییر در ظاهر دقیقاً به همان صورت کار می‌کنند فقط به جای استوانه چوبی از یک استوانه فلزی استفاده می‌شود. این نوع از شیرها افت فشار کمی را در مسیر جریان ایجاد می‌کنند و عیب عمده آنها این است که قادر به تنظیم دقیق جریان نیستند و تنها برای باز و بسته کردن مسیر جریان از آنها استفاده می‌شود. مهمترین مزیت این شیرها را در سرعت عمل آنها برای باز و بسته کردن جریان می‌توان خلاصه کرد. امروزه انواع بسیار متنوعی از این نوع شیرها طراحی شده و در صنایع مختلف استفاده می‌شود.




شکل 8-16- نحوه عمل شیرهای استوانه‌ای

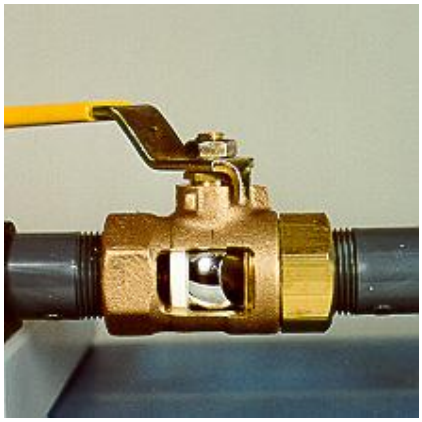


شکل 8-17- ساختار داخلی شیرهای استوانه‌ای

### 8-2-3-2- شیرهای گلوله‌ای (Ball valve)

اساس کار این نوع شیرها مطابق شیرهای Plug است و تنها تفاوت آنها این است که درPlug از یک استوانه سوراخدار برای تنظیم جریان استفاده می‌شود ولی در Ball از یک گلوله سوراخ‌دار. در اینجا نیز با چرخش 90 درجه می‌توان شیر را از حالت کاملاً باز به حالت کاملاً بسته تبدیل کرد. از مزایای عمده این نوع شیر علاوه بر سریع بودن، این است که اولاً نیاز به روغن‌کاری ندارد و ثانیاً به خوبی می‌تواند از نشت سیال جلوگیری کند. نکته آخر باعث شده که از این نوع شیرها در مواردی همچون گازرسانی که نیاز به ضریب اطمینان بالا برای جلوگیری از نشتی است استفاده فراوان شود.

شکل 8-18- ساختار داخلی شیر گلوله‌ای



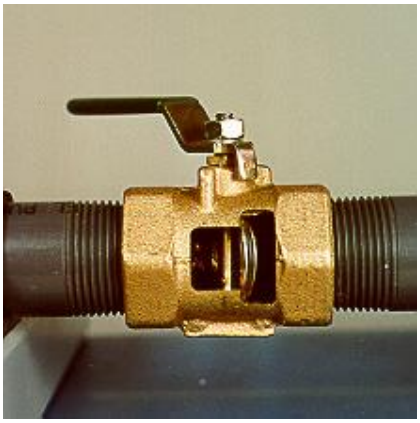
شکل 8-19- تصاویری از گلوله‌ها و نحوه عمل آنها

### 8-2-3-3- شیرهای پروانه‌ای (Butterfly valve)

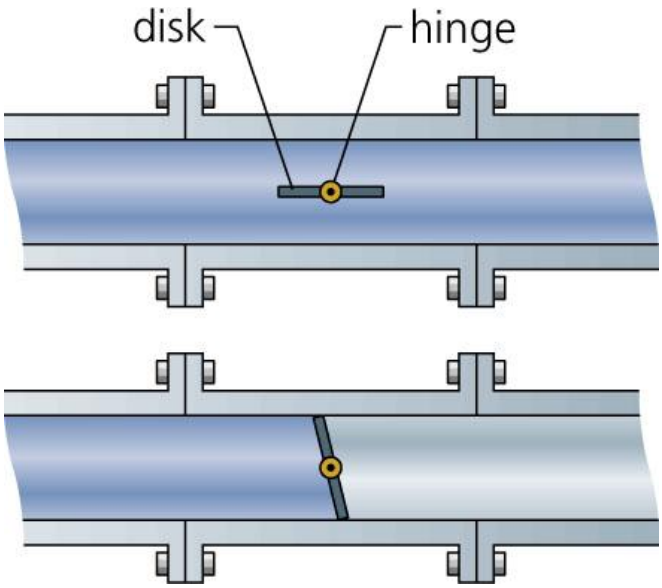
انواع متنوعی از این شیرها در صنایع مختلف استفاده می‌شود، از شیرهای معمولی گرفته تا شیرهایی که قادر به تحمل فشارهای بسیار بالا می‌باشند.

به طور کلی شیرهای پروانه‌ای دارای اندازه‌های بزرگتر از in(50 mm2) هستند. عدم ساخت شیرهای کوچکتر به این دلیل است که پره داخل شیر قسمت زیادی از فضای شیر را اشغال می‌کند و برای شیرهای کوچکتر ظرفیت شیر بسیار پایین می‌آید.

در حالت کاملاً باز شیرهای پروانه‌ای آشفتگی کمی را در سیال به وجود می‌آورند و به همین دلیل افت فشار شیر در این حالت قابل چشم‌پوشی است. شیرهای پروانه‌ای در مقایسه با دیگر شیرهای هم‌قیمت دارای ظرفیت بالاتری هستند. این افزایش ظرفیت در اندازه‌های بالاتر از in12 به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد.



شکل 8-20- نمونه‌هایی از شیرهای پروانه‌ای



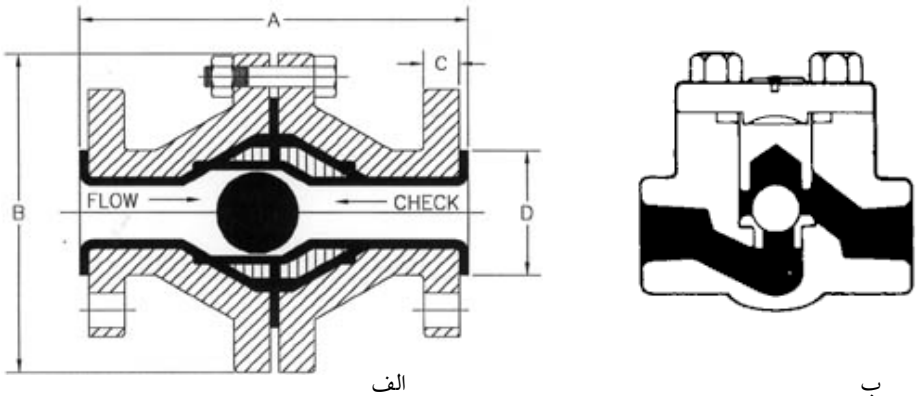
شکل 8-21- تصاویری از قسمت‌های داخلی شیر پروانه‌ای

## 8-2-4- سایر شیرها

علاوه بر شیرهایی که در بالا گفته شد انواع دیگری از شیرها وجود دارد که به علت کاربرد فراوان به آنها اشاره‌ای گذرا می‌کنیم.

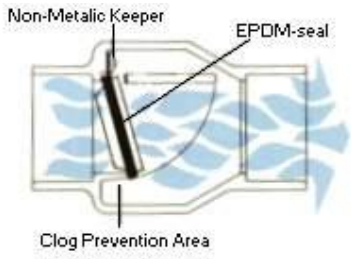
### 8-2-4-1- شیرهای یک‌طرفه (Check valve)

این شیرها در مسیرهایی به کار می‌رود که جریان لازم است فقط از یک جهت حرکت کند. انواع متنوعی از این شیرها ساخته شده که در تصاویر ارائه شده تعدادی از آنها آورده شده است.

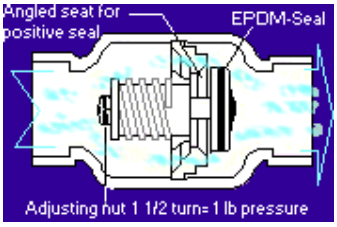



الف ب

شکل 8-22-الف و ب-شیرهای یک‌طرفه گلوله‌ای(Ball check) نوع افقی و عمودی

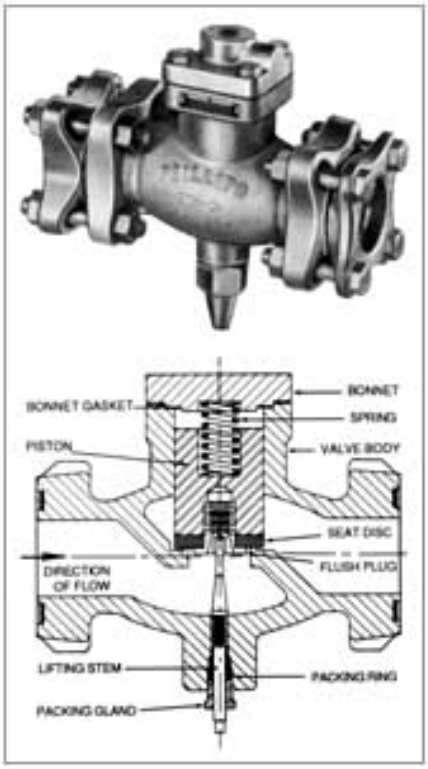



شکل 8-23-شیر یک‌طرفه نوع Swing

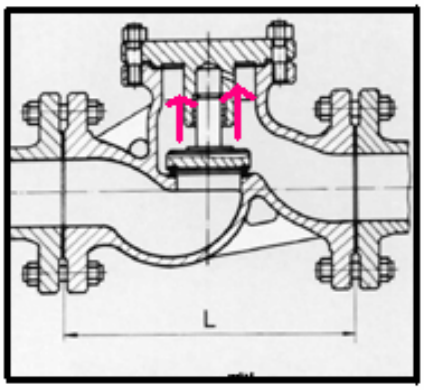



شکل 8-24-شیر یک‌طرفه پیستونی

شکل 8–24– تصویری از Stop Check



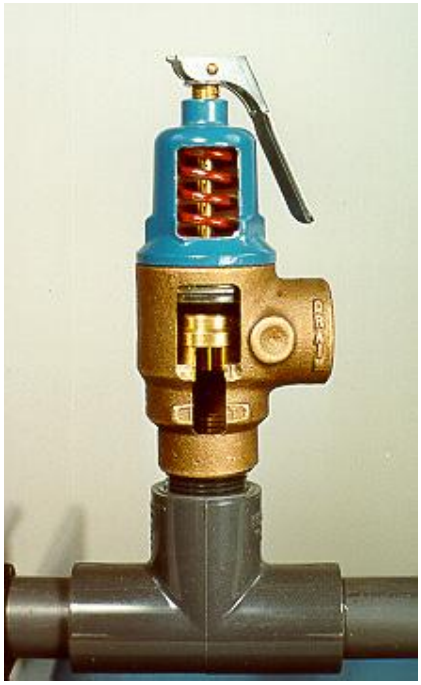

شکل 8–25– تصویر دیگری از Piston Check




شکل 8-26- تصویری از Lift Check

### 8-2-4-2- شیرهای اطمینان (Safety valve)

این شیرها معمولاً برای جلوگیری از وقوع انفجار بر روی دستگاه‌های تحت فشار کار گذاشته می‌شود. یکی از این نوع شیرها بر روی آبگرمکن‌های منازل استفاده می‌شود.



شکل 8-27- نمونه‌ای از شیرهای اطمینان

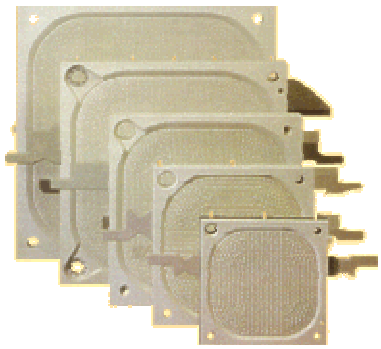
فصل نهم

# فیلترها
# Filters

## 9-1- شرح وتوصیف

یکی از وسایلی که دارای کاربرد وسیعی در جداسازی ذرات جامد از سیال می‌باشد، فیلترها می‌باشند. در این وسایل، ذرات جامد موجود در یک سیال با عبور دادن سیال از یک محیط صاف کننده یا غشاء از سیال جدا می‌شوند و در نهایت ذرات جامد روی غشاء باقی می‌مانند. این عملیات را فیلتراسیون می‌نامند.

با این حال در صنایع فرایندی گازی، فیلتراسیون معمولاً به فرایندهایی اطلاق می‌شود که ذرات جامد و قطرات مایع از جریان گاز جدا شوند. راندمان جداسازی فیلترها از جداسازی سانتریفوژی بیشتر است اما مشکلی که در مورد فیلترها وجود دارد این است که غشاء متخلخل فیلترها باید پس از مدتی کار کردن تعویض شود. اندازه فیلترها نسبت به سایر جداسازها تا حدی متفاوت است و سازنده فیلتر باید توجه کافی به توزیع سایز ذرات ورودی به فیلتر و میزان جداسازی مطلوب نیز داشته باشد. یکی از معمول‌ترین موادی که برای ساخت غشاء فیلتر مورد استفاده قرار می‌گیرد فایبرگلاس (Fiber glass) می‌باشد. این ماده می‌تواند ذرات مایع ریزتر از یک میکرون را نیز ازجریان گاز جدا کند بنابراین دارای راندمان بالایی می‌باشد. در شکل 9-1، چند صفحه مربعی شکل که به عنوان غشاء فیلتر مورد استفاده قرار می‌گیرند نشان داده شده است که در ادامه بحث مورد بررسی بیشتری قرار می‌گیرد.



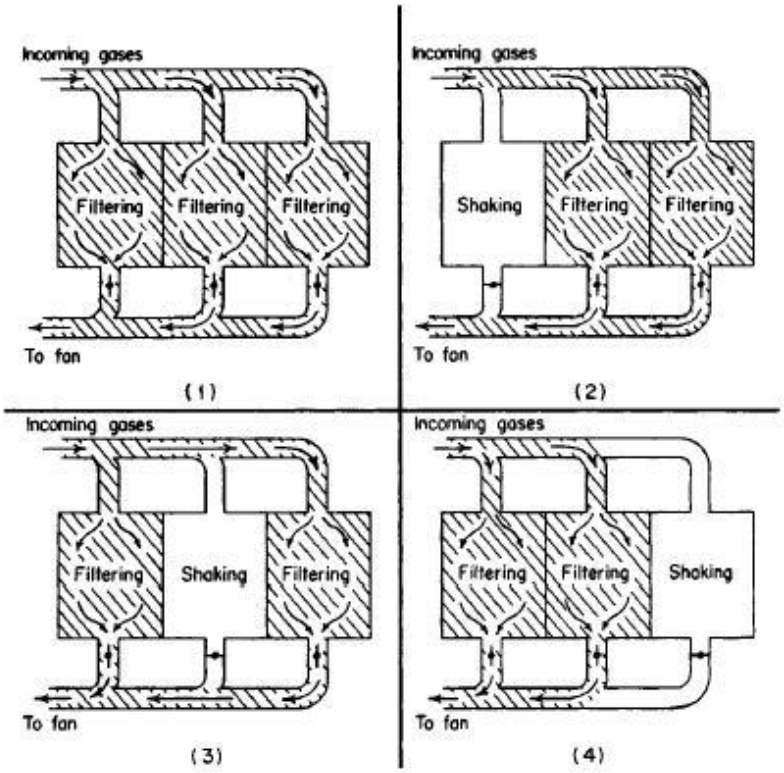
شکل 9-1- صفحات غشایی مربعی شکل در ابعاد مختلف

راندمان یک فیلتر عمدتاً بستگی به نوع طراحی آن دارد. یکی از این پارامترهای طراحی، افت فشار ایجاد شده در اثر فیلتر می‌باشد. افت فشاری در حدود 7-14 Kpas در مورد یک فیلتر تمیز که در صنایع گازی مورد استفاده قرار می‌گیرد مقدار مناسبی است. اگر ذرات جامد زیادی در جریان گاز وجود داشته باشند، معمولاً زمانیکه افت فشار ایجاد شده در فیلتر به بیش از 70Kpas برسد، غشاء فیلتر تعویض می‌شود. معمولاً از طرف شرکت‌های سازنده فیلتر یک سری اعداد و ارقام برای توصیف شرایط کار فیلتر ارائه می‌شود. به عنوان مثال جداسازی 100٪ قطرات مایع که دارای قطری بزرگتر از 8 میکرون هستند و جداسازی 99/5 درصد از ذراتی که قطر آنها دردامنه 0/5 تا 8 میکرون قرار دارد از طرف سازنده فیلتر ارائه می‌شود. اما رسیدن به این نتایج در محیط واقعی تا حدودی مشکل می‌باشد.

به طور کلی سیالی که از فیلتر عبور می‌کند ممکن است گـاز یـا مـایع باشـدکه پـس از عبـور از فیلتـر ذرات جامد آن جدا می‌شود. اما ماده با ارزش حاصل از فیلتراسیون ممکن است سیال عبور کرده از فیلتر یا جامـد جـدا شده از جریان و یا هر دو مورد باشند.گاهی نیز هیچ‌یک از این دو باارزش نمی‌باشد. به عنوان نمونـه مـی‌تـوان بـه زمانی که ضایعات جامد را بایستی قبل از دور ریختن از ضایعات مایع جدا کرد اشاره کرد.

معمولا قبل از عملیات فیلتراسیون، روی خوراک به طریقی کار می‌کنند که سرعت فیلتراسیون افزایش یابد. به عنوان مثال آن را حرارت می‌دهند و یا تبلور مجدد می‌کنند.

یکی دیگر از مواردی که در مورد فیلترهای ناپیوسته مهم است، استفاده از فیلترهای موازی برای تغییـر مسـیر جریان از یک فیلتر به فیلتر دیگر برای تمیز کردن فیلتر اول است. در شکل 9-2، نحوه جریان یافتن سیال در سه فیلتر موازی که در هر زمان یکی از آنها در حالت احتیاج به تمیزکاری دارد نشان داده شده است.




شکل 9-2- نحوه جریان سیال در مورد فیلترهای ناپیوسته

## 9-2- انواع فیلترها

برای جدا کردن ذرات جامد از سیال می‌توان از ته‌نشین کننده‌های ثقلی، سیکلون‌ها، فیلترهـا و گیرنـده‌هـای الکترواستاتیکی (ESP) استفاده کرد. دستگاه‌های فوق به غیر از فیلترها با هدایت ذرات جامد به سمت یک دیوار جامد باعث جدا شدن ذرات جامد از فاز سیال می‌شوند. اما فیلترها با تقسیم جریان به قسمت‌های کوچکتر باعث

جلوگیری از عبور ذرات جامد از این قسمت‌های کوچکتر شده و به این ترتیب باعث جداسازی دو فاز جامد وسیال می گردند.

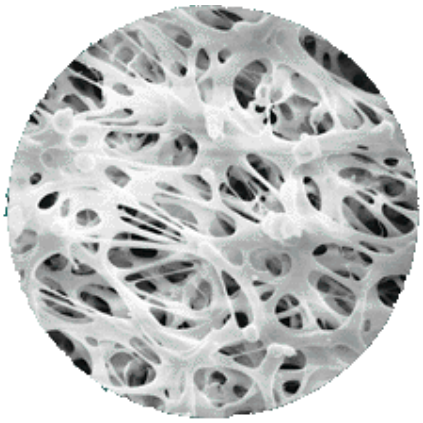
فیلترها را به طور کلی می‌توان به دو نوع کلی تقسیم کرد:

فیلترهای سطحی(Surface filter)

فیلترهای عمقی (Depth filter)

فیلترهای سطحی باید به گونه‌ای ساخته شوند که قطر سوراخ‌های صافی فیلتر مشخص کننده قطر مواد جامدی است که از سیال جدا می‌شود. اما ساختن این فیلترها در حالاتی که ذرات ریز حدود 1 میکرون و کوچکتردر سیال وجود دارد کار مشکلی می‌باشد.

از فیلترهای عمقی به طور وسیعی برای کنترل آلودگی هوا استفاده می‌شود. در این فیلترها، قالب مواد جامد روی سطح فیلتر کمتر مشاهده می‌شود. بلکه جمع‌آوری ذرات در داخل غشاء فیلتر صورت می گیرد. در شکل 9-3 نیز قسمتی ا زیک غشاء پلیمری یک فیلتر عمقی که از جنس PVC ساخته شده است، با بزرگنمایی خوبی نشان داده شده است.



شکل 9-3- بزرگنمایی قسمتی ا زیک غشاء پلیمری از جنس PVC

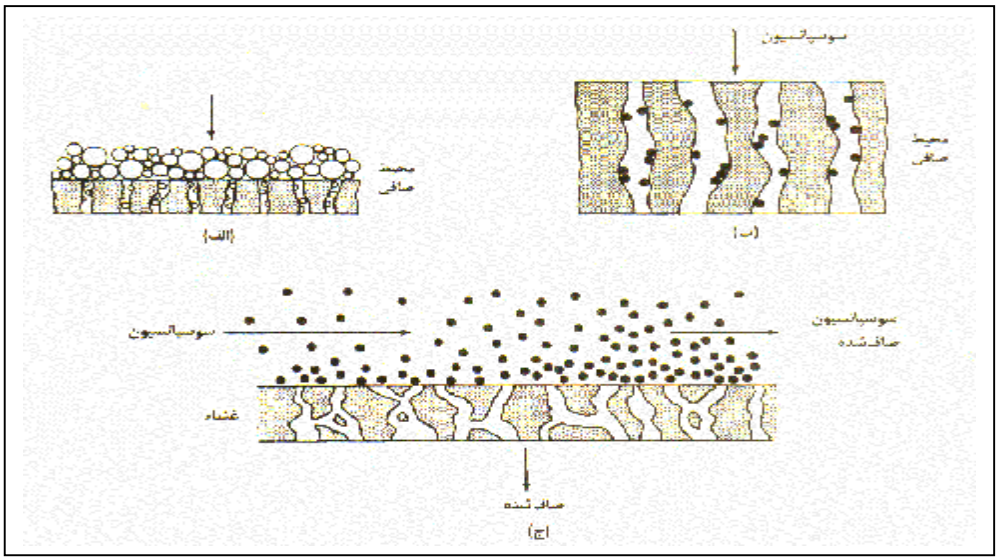
به طور کلی فیلترها به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند:

1- فیلتر کیکی یا قالبی (Cake filter)

2- فیلتر شفاف کننده

3- فیلتر با جریان متقاطع

همانطور که در شکل 9-4 نیز مشاهده می‌شود فیلتر کیکی، مقادیر نسبتاً زیادی از مواد جامد را به صورت قالبی از بلور یا گل جدا می‌سازد. در این فیلترها برای شستن قالب و خارج کردن مقداری از مواد جامد قبل از تخلیه نهایی پیش‌بینی‌هایی صورت می گیرد. در فیلترهای شفاف‌کننده، معمولا مقدار جامد جدا شده کم است و محصول یک گاز تمیز یا یک مایع شفاف و زلال می‌باشد.




شکل 9-4- انواع غشاء فیلترها:الف)صافی قالبی، ب)صافی شفاف کننده، ج)صافی با جریان متقاطع

در فیلترهای با جریان متقاطع، محلول سوسپانسیون خوراک تحت فشار با سرعت تقریباً زیاد از عرض محیط صافی جریان می‌یابد. محیط صافی نیز یک غشاء سرامیکی، فلزی یا پلیمری با منافذ کوچک است که بیشتر ذرات معلق را دفع می‌کنند.

اکثر فیلترهای صنعتی، به صورت فیلترهای فشاری، فیلترهای خلا و فیلترهای سانتریفوژی می‌باشند. این فیلترها با توجه به اینکه تخلیه جامدات جدا شده از سیال به صورت پیوسته یا منقطع باشد به صورت پیوسته و یا ناپیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مورد فیلترهای ناپیوسته، باید هر چند وقت یکبار جریان سیال را قطع کرد تا بتوان جامدات جمع شده را خارج ساخت. اما در فیلترهای پیوسته، تخلیه جامدات و سیال زمانیکه دستگاه مشغول کار است قطع نمی‌شود.

دلیل حرکت سیال در فیلتر وجود افت فشار در محیط فیلتر می‌باشد. بر این اساس فیلترها را به صورت زیر تقسیم‌بندی کرده‌اند:

### 9-2-1- فیلترهای اتمسفریک

این فیلترها با فشار جو در محل ورود خوراک و شرایط خلا در محل خروج سیال عمل می‌کنند. یکی از مثالهای موجود در این مورد، فیلترهای ثقلی می‌باشد. کاربرد این فیلترها به جداسازی بلورهای فیلمی درشت از محلول، تصفیه آب آشامیدنی و تصفیه فاضلاب محدود می‌شود.

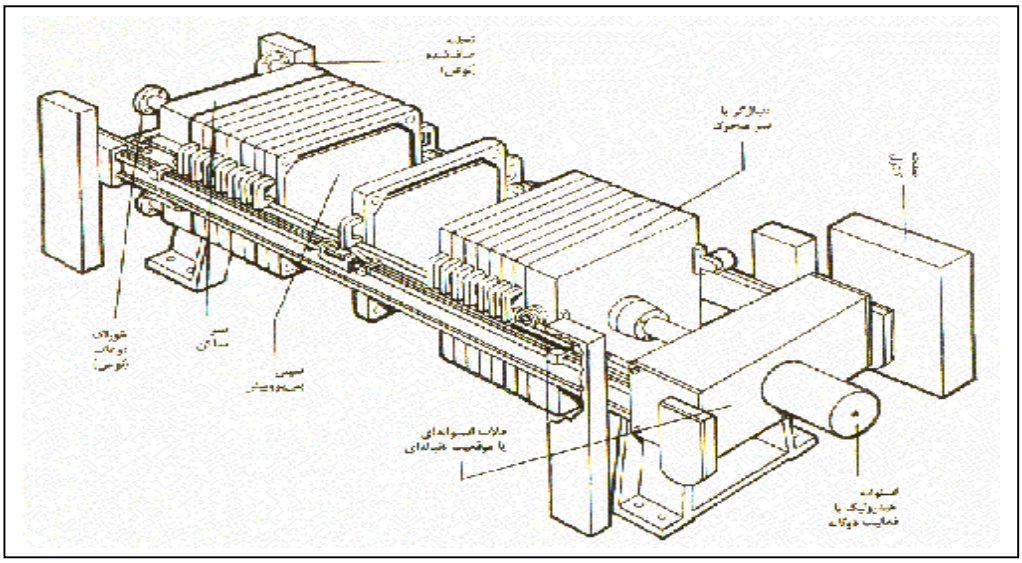
9-2-2- فیلنوع دیگری از فیلترها که می‌توانند به صورت پیوسته و ناپیوسته مورد استفاده قرار بگیرند فیلترهای فشاری هستند. اما به دلیل دشوار بودن تخلیه جامدات در فیلترهای فشاری ، اکثر این فیلترها به صورت ناپیوسته کار می‌کنند. لازم به ذکر است که معمولا فیلترهای فشاری ناپیوسته از نوع فیلترهای قالبی هستند.

فیلترهای فشاری اختلاف فشار زیادی در طول غشاء فیلترایجاد می‌کنند. لازم به ذکر است که این فیلترها در مورد مایعات ویسکوز و یا جامدات پودری، عمل فیلتراسیون را سریع‌تر انجام می‌دهند. معمول‌ترین انواع فیلترهای فشاری، شامل فیلتر پرس و فیلتر پوسته و لایه می‌باشند.

### 9-2-2-1- فیلتر پرس

فیلتر پرس از مجموعه‌ای از سینی‌ها در یک سری محفظه تشکیل شده است که مواد جامد در آنها جمع می‌شوند. سینی‌ها نیز به وسیله یک محیط صافی همچون پارچه پوشانده شده‌اند. دوغاب تحت فشار وارد هر محفظه می‌شود. محلول از پارچه عبور می‌کند و از یک لوله تخلیه می‌گردد و یک قالب مرطوب از مواد جامد در پشت سر خود بر جای می‌گذارد. سینی‌های فیلتر پرس به شکل مربع و یا دایره‌ای عمودی یا افقی می‌باشند. غشایی، سطح هر سینی را می‌پوشاند و این دو توسط یک پیچ یا پیستون هیدرولیک، محکم به هم فشرده می‌شوند. دوغاب ورودی از یک مجرا عبور می‌کند که به صورت طولی از یک گوشه مجموعه فوق وارد می‌شود. جامدات نیز روی وجوه پوشیده از پارچه سینی‌ها جمع می‌شوند. محلول از پارچه عبور می‌کند و وارد شیارها یا لوله‌های موجدار روی سطح سینی می‌شود و سپس از پرس خارج می‌گردد. دوغاب از یک پمپ یا مخزن تحت فشار 3 تا 10 اتمسفر وارد می‌شود و عمل تصفیه آنقدر ادامه می‌یابد تا اینکه دیگر محلول از محل تخلیه بیرون نیاید یا فشار تصفیه ناگهان افزایش می‌یابد. این حالات وقتی اتفاق می‌افتد که قاب‌ها پر از جامد باشند و دوغاب دیگر نتواند وارد شود. در این صورت گفته می‌شود که پرس جام کرده است (بسته شده است). در چنین مواقعی، شوینده را وارد فیلتر می‌کنند تا ناخالصی‌های انحلال‌پذیر از جامدات جدا گردد و پس از آن می‌توان قالب برجای مانده را با دمیدن بخار آب یا هوا از محیط صافی جدا کرد و در یک نقاله یا انبار ریخت. در بسیاری از دستگاه‌های فیلتر پرس مثل آنچه که در شکل 9-5 مشاهده می‌شود، این عملیات به صورت خودکار انجام می‌شود. در این شکل ابعاد سینی‌های مربع شکل 2 تا 150 میلی‌متر می‌باشد. ضخامت سینی‌ها 6 تا 50 میلی‌متر و ضخامت قاب‌ها 6 تا 200 میلی‌متر می‌باشد.

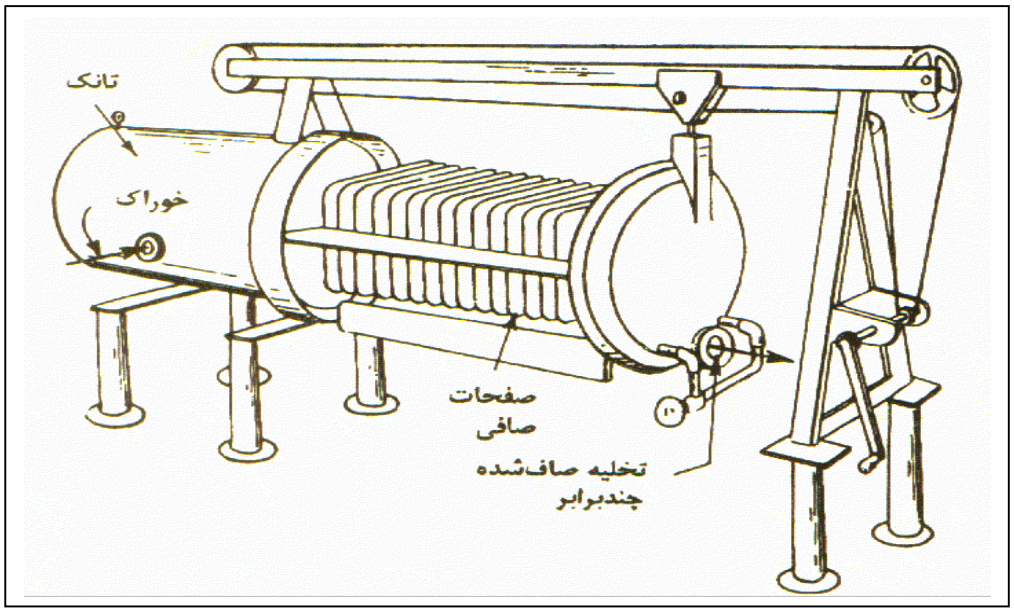
شستشوی کامل یک فیلتر پرس ممکن است چند ساعت طول بکشد. چون مایع شوینده آسان‌ترین مسیر را دنبال می‌کند. اگر تراکم قالب در برخی از قسمتها کمتر از بقیه جاها باشد، همچنان که معمولاً اتفاق می‌افتد، بیشتر مایع‌شوینده بی‌اثر خواهد بود. اگر بخواهیم شستشو خیلی خوب صورت بگیرد شاید بهتر باشد قالب به طور ناقص شسته شده را با حجم زیادی از مایع شوینده دوباره به دوغاب تبدیل کرده و مجدداً آن را صاف کنیم.



شکل 9-5- فیلتر پرس با دستگاه مخصوص بهره‌برداری خودکار

### 9-2-2-2- فیلتر پوسته و لایه

برای تصفیه در فشارهای بالاتر از فشار فیلتر پرس، برای صرفه‌جویی در کار، می‌توان از فیلتر پوسته و لایه استفاده کرد. همانطوریکه در شکل مشاهده می‌شود در این فیلتر مجموعه‌ای از لایه‌های عمودی روی یک قفسه با قابلیت بیرون آوردن قرار داده شده است. در شکل 9-6، فیلتر برای شستشو باز شده است. در حین عملیات لایه‌ها درون مخزن بسته هستند. خوراک نیز از کنار مخزن وارد می‌شود. محصول تصفیه شده نیز از لایه‌ها به درون لوله تخلیه می‌رود. لازم به ذکر است که این طرح برای تصفیه‌خانه‌هایی به کار می‌رود که کمک‌صافی دارند.

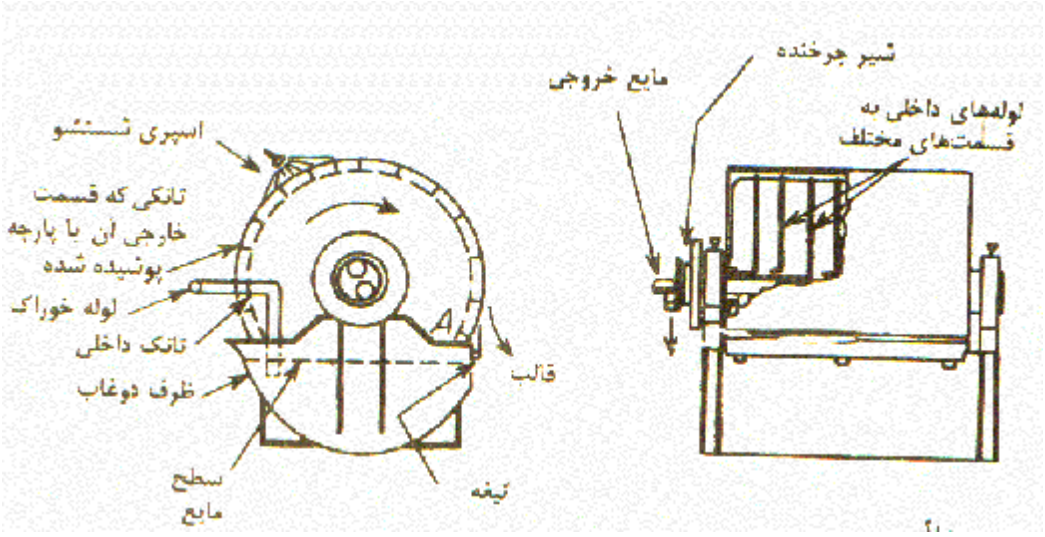



شکل 9-6- فیلتر لایه‌ای تحت فشار با مخزن افقی

## 9-2-3- فیلترهای خلاء

فیلترهای خلا می‌توانند به صورت پیوسته یا ناپیوسته مورد استفاده قرار بگیرند. اما فیلترخلاء ناپیوسته در مقیاس وسیع فرایندی رایج نیست. چون به کار زیادی برای کندن قالب نیاز دارد. لذا فیلترهای خلا معمولاً به صورت پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند که از مهمترین نوع این فیلترها می‌توان به فیلتر خلا دوار اشاره کرد که در اکثر واحدهای روغن‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در فیلترهای خلا پیوسته، محلول از یک جدار غشائی متحرک مکیده می‌شود تا قالبی از جامد برجای بماند. در مورد فیلترهای استوانه‌ای دوار، قالب ایجاد شده بر روی صافی فیلتر با یک تیغه تراشیده می‌شود و به این ترتیب مواد جامد در جریان مایع جداسازی می‌شوند. این مورد در شکل 9-7 نشان داده شده است.



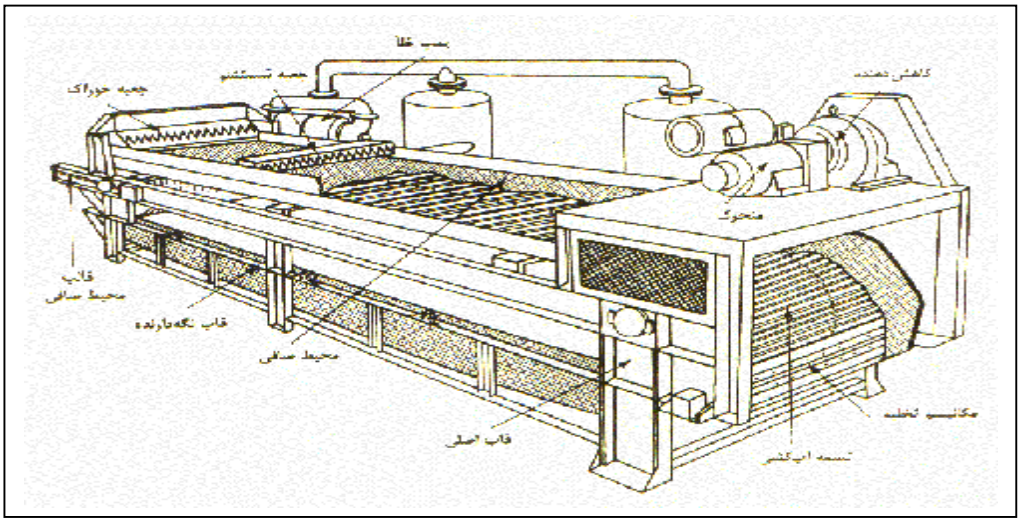

شکل 9-7- فیلتر خلاء دوار پیوسته

در فیلتر استوانه‌ای دوار،حرکت چرخشی غشاء فیلتر باعث می‌شود که پس از جدا شدن مواد جامد از روی صافی فیلتر، این قسمت از فیلتر مجدداً وارد قسمت خوراک دوغاب شده و با توجه به وجود خلا و چرخش استوانه، مواد جامد بر روی استوانه باقی می‌مانند و به این ترتیب عملیات جداسازی جامد از مایع صورت می‌گیرد. قالب‌هایی که روی فیلترهای خلا در واحدهای صنعتی تشکیل می‌شود ضخامتی بین 3 تا 40 میلی‌متر دارند. استوانه‌های استاندارد نیز دارای قطر 0/3 متر تا 3 متر می‌باشند.

فیلترهای خلا دوار را گاهی اوقات تحت فشارهای مثبت در حدود 15 اتمسفر و در مواردی که سایر فیلترهای خلا قابل استفاده یا مقرون به صرفه نمی‌باشند مورد استفاده قرار می‌دهند. این مورد معمولاً وقتی پیش می‌آید که جامدات خیلی کند تصفیه می‌شوند و یا فشار بخار مایع بسیار زیاد است. یکی دیگر از موارد کاربرد این فیلترها در مورد محلول‌های با ویسکوزیته بالاتر از 1 poise می‌باشد.

مثال دیگری از فیلترهای خلاء، فیلتر تسمه‌ای افقی می‌باشد. اگر خوراک حاوی ذرات درشت با قابلیت ته‌نشینی سریع باشد، فیلتر با استوانه دوار ضعیف عمل می‌کند و یا اصلاً عمل نمی‌کند. در این مورد، ذرات

درشت نمی‌توانند در ظرف دوغاب به صورت معلق باقی بمانند و به این ترتیب قالبی که تشکیل می‌شود اغلب به سطح استوانه‌ای غشاء نمی‌چسبد. برای رفع این مشکل می‌توان از یک فیلتر افقی که خوراک از بالای آن وارد می‌شود استفاده کرد. فیلتر با تسمه افقی در شکل 9-8 نشان داده شده است. این نوع فیلتر دارای کاربرد ویژه‌ای در مورد مواد زائد مفید می‌باشد.




شکل 9-8- صافی با تسمه افقی

## 9-2-4- فیلترهای سانتریفوژی

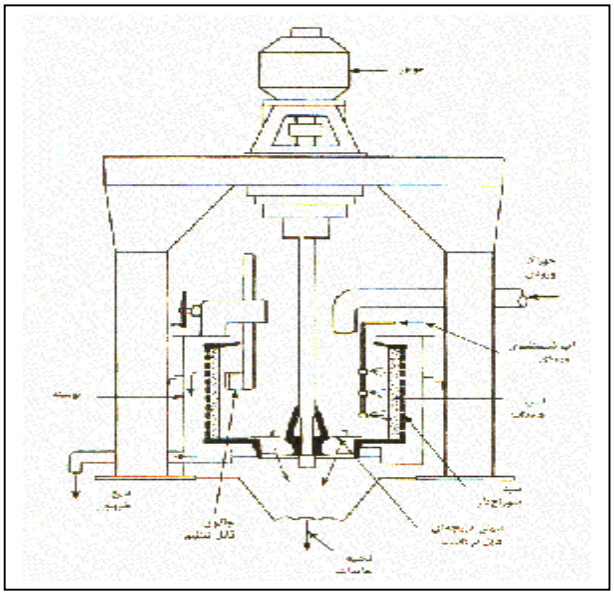
این فیلترها به دو نوع کلی پیوسته و ناپیوسته تقسیم می‌شوند. به طور کلی معمولاً این فیلترها در مورد جامداتی که یک قالب متخلخل تشکیل می‌دهند مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این کار دوغاب را وارد یک سبد چرخان می‌کنند که دارای یک دیواره شیاردار یا مشبک است و یا محیط فیلتر با پارچه یا توری فلزی پوشانده شده است. فشار حاصل از عمل گریز از مرکز محلول را به درون محیط فیلتر می‌راند و جامدات را بر جای می‌گذارد. در این صورت اگر جریان خوراکی که وارد سبد می‌شود را قطع کنیم و قالب جامدات را برای مدت کوتاهی خشک کنیم بیشتر مایعات باقیمانده در قالب، از ذرات خارج می‌شود و جامدات نهایی خیلی خشک‌تر از جامدات درون یک فیلتر رس یا فیلتر خلا می‌شوند. در این حالت اگر قرار باشد جامد تصفیه شده بعداً با وسائل حرارتی خشک شود، فیلتر سانتریفوژی باعث صرفه‌جویی قابل ملاحظه می‌شود.

انواع عمده فیلترهای سانتریفوژی عبارتند از:

- فیلترهای سانتریفوژی ناپیوسته
- فیلترهای سانتریفوژی پیوسته

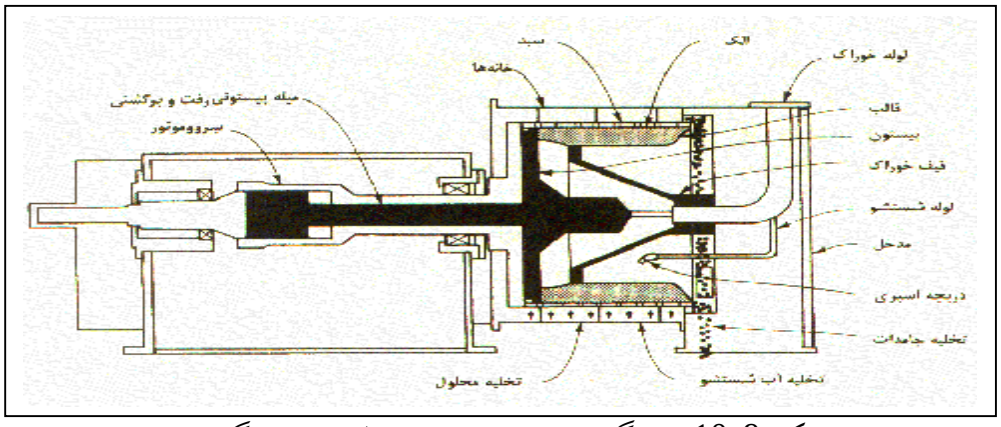
نوع رایج فیلترهای سانتریفوژی ناپیوسته در صنعت، فیلتر سانتریفوژ معلق از بالا می‌باشد که این مورد در شکل 9-9 نشان داده شده است. قطر سبدهای مشبک بین 750 تا 1200 میلی‌متر می‌باشد و عمق آنها از 18 تا

30 اینچ و سرعت آنها از 600 تا 1800 دور بر دقیقه می‌باشد. سبد نیز از انتهای یک میله قائم با نوسان آزاد که در قسمت بالا برگردانده می‌شود، آویزان است.



شکل 9-9- فیلتر سانتریفوژ معلق از بالا

یکی از انواع رایج فیلترهای پیوسته، دستگاه سانتریفوژ پیوسته با نقاله رفت و برگشتی می‌باشد. در این فیلترها، خوراک از طریق یک قیف چرخان وارد یک سبد چرخان دارای دیواره شیاردار می‌شود.




شکل 9-10- دستگاه سانتریفوژ پیوسته با نقاله رفت و برگشتی

منظور از بکار بردن قیف، شتاب دادن آرام و یکنواخت به خوراک دوغاب است. خوراک از یک لوله ساکن در محور دوران سبد وارد انتهای کوچک قیف می‌شود. این خوراک به طرف انتهای بزرگ قیف می‌رود و در این بین، سرعت آن افزایش می‌یابد و وقتی از قیف به دیواره سبد پاشیده می‌شود، در همان جهت دیواره و تقریباً با همان سرعت حرکت می‌کند و محلول از دیواره سبد که ممکن است با یک پارچه پوشانده شود جریان می‌یابد. یک لایه از بلور با ضخامت 25 تا 75 میلی‌متر نیز تشکیل می‌شود. این لایه توسط یک عامل فشار دهنده

رفت و برگشتی از روی سطح تصفیه‌کننده عبور می‌کند. وقتی بلورها به لبه سبد می‌رسند به طرف بیرون پرت می‌شوند و پس از عبور از یک محفظه بزرگ وارد یک لوله جمع‌کننده می‌شوند. لازم به ذکر است که فیلترهای سانتریفوژی پیوسته معمولاً برای جداسازی بلورهای درشت بکار می‌روند.

## 9-3- عیوب و موارد عدم مطلوب بودن فیلترها

غشاء مورد استفاده در فیلتر باید شرایط زیر را داشته باشد:

باید توانایی نگهداری جامداتی که از جریان مایع جدا می‌شوند را داشته باشد.

باید از نظر شیمیایی مقاوم باشد و از نظر فیزیکی به قدر کافی در برابر شرایط فرآوری مقاومت کند.

نباید به سادگی مسدود شود.

باید امکان تخلیه تمیز و کامل قالب تشکیل شده را دارا باشد.

نباید خیلی گران باشد

در تصفیه صنعتی، یک محیط رایج صافی، پارچه است که به صورت شکسته یا اریب بافته شده است. برای حالات مختلف الگوهای بافت بسیار متفاوت موجود است. برای مایعات خورنده باید از محیط‌های صافی دیگری همچون پارچه پشمی، پارچه فلزی از جنس مونل یا فولاد ضد زنگ، پارچه شیشه‌ای یا کاغذ استفاده کرد. پارچه‌های مصنوعی همچون نایلون، پلی‌پروپیلن و پلی‌استرهای مختلف از نظر شیمیایی نیز بسیار مقاومند. در یک پارچه با مش‌های با اندازه معین، الیاف مصنوعی یا فلزی صاف کمتر از الیاف طبیعی ریز در جدا کردن ذرات بسیار ریز کارایی دارند. معمولاً این عیب الیاف مصنوعی و فلزی فقط در شروع تصفیه بروز می‌کند.لذا محصول تصفیه‌شده ابتدا ممکن است کدر باشد و بعد زلال شود. معمولا محصول تصفیه کدر برای تصفیه مجدد به مخزن دوغاب بازگردانده می‌شود.

جامدات باریک یا بسیار ریز که یک قالب متراکم و ناتراوا تولید می‌کنند هر محیط صافی ریز را به سرعت مسدود می‌کنند. تصفیه عملی چنین موادی مستلزم آن است که تخلخل قالب یا کیک افزایش یابد تا محلول بتواند با سرعتی معقول عبور کند. این کار با افزودن یک کمک‌صافی همچون سیلیکای دیاتومه‌ای، پولیت، سلولز خالص، چوب یا هر جامد متخلخل و بی‌اثر دیگر به دوغاب قبل از تصفیه انجام می‌شود. کمک صافی را بعداً می‌توان با حل کردن جامدات یا سوزانیدن کمک‌صافی، از جامدات جدا کرد. اگر جامدات گرفته شده از سیال ارزشی نداشته باشند آنها را همراه با کمک صافی دور می‌ریزند.

در فیلتراسیون، حرکت جریان در محیط متخلخل صورت می‌گیرد. در ضمن مقاومت این تخلخل در برابر جریان باگذشت زمان افزایش می‌یابد. کمیت‌های عمده مورد نظر در عملیات فیلتراسیون شدت فیلتراسیون و افت فشار در فیلتر می‌باشد. در عملیات فیلتراسیون با گذشت زمان یا شدت جریان کاهش می‌یابد و یا افت فشار زیاد می‌شود و یا هر دو مورد صورت می‌گیرد.

فصل دهم

# تبخیر کننده فیلمی
# Film Evaporator

## 10-1- شرح وتوصیف

هدف از تبخیر بالا بردن غلظت یک محلول دارای یک حلال فرار و یک حل‌شونده غیر فرار است. در تبخیر، بخشی از حلال به بخار تبدیل می‌شود تا محلول غلیظی حاصل شود.

تبخیر با خشک کردن متفاوت است چون در تبخیر ماده باقی‌مانده مایع است که اغلب گرانروی بالایی دارد نه جامد. تبخیر با تقطیر نیز متفاوت است، چون در تبخیر سیستم‌ها اغلب یک‌جزئی هستند و اگر بخار تشکیل شده شامل دو جزء باشد، امکان جداسازی از راه تبخیر وجود ندارد. تبخیر با تبلور نیز متفاوت است چون در تبخیر غلظت محلول افزایش می‌یابد و تشکیل ساختمان کریستالی چندان اهمیتی ندارد. در حالتی خاص مثل تشکیل نمک محلول از آب، مرز بین تبلور و تبخیر چندان مشخص نیست.

به طور کلی در تبخیر یکی از دو جزء بخار یا محلول غلیظ تبخیر شده اهمیت زیادی دارند و طراحی بر اساس گرفتن این جزء صورت می‌گیرد. معمولاً محلول غلیظ با ارزش می‌باشد و بخار بعد از مایع شدن دور ریخته می‌شود. البته در مواردی مثل بازیابی حلال از پلیمرهای نامرغوب عکس این مطلب صادق است.

شکل 10-1- تبخیر کنندهٔ فیلمی

## 10-2- خصوصیات مایع

بیشتر مسائل عملی تبخیر به خصوصیات محلول غلیظ بر می‌گردد. خواص محلول بسیار متنوع است و نیاز به تجربه کافی در طراحی تبخیر کننده دارد به طوری که از انتقال گرمای ساده به یک تکنیک تبدیل شده است. بعضی از مهمترین خواص مایعات در حال تبخیر عبارتند از :

1- **غلظت:** در خلال فرایند تبخیر،غلظت محلول موجود در تبخیرکننده افزایش می‌یابد. این افزایش غلظت می‌تواند تا اشباع شدن محلول و نیز ایجاد بلور ادامه یابد. با افزایش غلظت محلول، ویسکوزیته و دانسیته به مقدار زیادی تغییر می‌کند. همچنین با افزایش مقدار جامد در محلول، نقطه جوش محلول به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، در نتیجه دمای جوش یک محلول غلیظ بسیار بیشتر از محلول خالص در همان فشار است.

2- **کف کردن:** بعضی از مواد به هنگام تبخیر کف می‌کنند. کف باعث ایجاد ماندگی در گاز می‌شود (پدیده entrainment ) در حالات بسیار شدید حتی ممکن است تمامی مایع بجوشد و به صورت تلفات خارج شود.

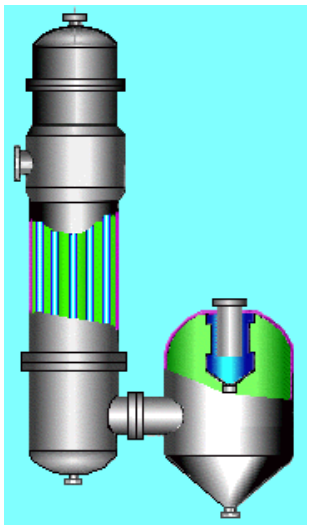
3- **حساسیت دمایی:** بسیاری از مواد شیمیایی حساس، محصولات دارویی و غذایی، وقتی در زمانی نسبتاً کوتاه تا درجه حرارت متوسطی گرم شوند، ضایع می‌شوند. در غلیظ کردن این مواد تکنیک‌های خاصی نیاز است تا هم دمای مایع و هم‌زمان گرم کردن را کاهش دهد.

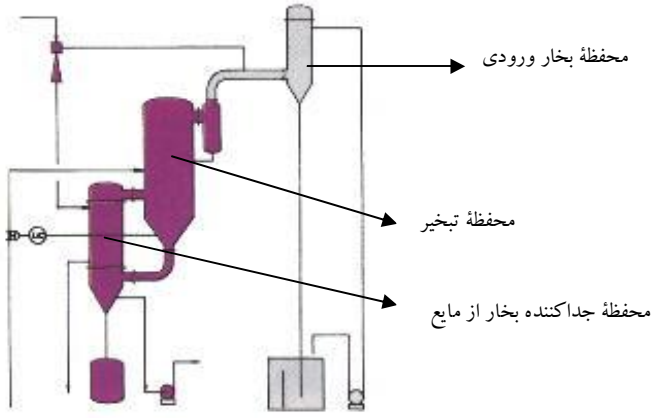
4- **جرم‌گرفتگی:** بعضی از محلول‌ها در عملیات تبخیر در دستگاه ایجاد جرم‌گرفتگی می‌کنند. این موضوع باعث کاهش میزان انتقال حرارت می‌شود که پدیده نامطلوبی است و در نتیجه باید طراحی طوری انجام گیرد که جرم‌گرفتگی حداقل باشد زیرا تمیز کردن مشکل و پرهزینه است.

5- **مصالح ساخت:** بیشتر از جنس فولاد استفاده می‌شود. اما اگر محلول در فولاد ایجاد خوردگی کند باید از آلیاژهای گران‌قیمت‌تر استفاده کرد. فولاد ضد زنگ معمولاً اولین انتخاب است.

## 10-3- تبخیرکننده‌های یک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای

بسیاری از تبخیرکننده‌ها با حرارت ناشی از میعان بخار آب در لوله‌های فلزی، گرم می‌شوند. دراکثر مواقع ماده‌ای که گرم می‌شود در لوله قرار می‌گیرد. علت این موضوع سادگی شستشوی لوله‌ها می‌باشد زیرا مایع غلیظ رسوب بیشتری می‌دهد. فشار بخار آب اغلب پایین و زیر 3 atm و مایع معمولاً در خلأ و در فشار 0.05 atm می‌باشد.



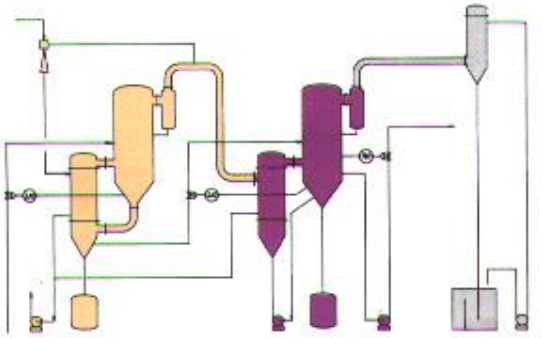



شکل 10-2- نمایی از تبخیرکنندهٔ فیلمی یک مرحله‌ای

وقتی از یک تبخیر کننده استفاده شود، بخار حاصل از مایع در حال جوش به مایع تبدیل می‌شود و دور ریخته می‌شود. به این روش، تبخیر یک‌مرحله‌ای گویند که روش ساده و با هزینه ساخت پایین می‌باشد.

اگر بخار خروجی از یک تبخیرکننده وارد محفظه بخار تبخیرکننده دیگری شود و بخار حاصل از این تبخیرکننده وارد مبرد گردد، در این عمل از دو دستگاه تبخیرکننده استفاده کرده‌ایم، اما بخار حاصل از مرحله اول به جای دور ریخته شدن وارد یک تبخیرکننده دیگر می‌شود و در آنجا صرف تبخیر محلول می‌شود. در این حالت اقتصاد بخار را بهبود داده‌ایم. یعنی با همان میزان بخار ورودی از utility تقریباً دو برابر مرتبه تبخیر قبل

انجام داده‌ایم. با این کار هزینه عملیاتی کاهش می‌یابد، یعنی انرژی کمتری نیاز است حال آنکه هزینه ساخت دستگاه افزایش یافته است.



شکل 10-3- نمایی از یک تبخیرکنندهٔ فیلمی دو مرحله‌ای. بخار حاصل از مایع تغلیظ شده به مرحلهٔ بعد می‌رود .

در این صورت احتیاج به یک بهینه‌سازی می‌باشد بین هزینه عملیاتی و هزینه ساخت اولیه دستگاه. تعداد واحدهای بهینه توصیه شده برای عملیات تبخیر بین 3 تا 5 مرحله می‌باشد.

شکل10-4- یک تبخیرکنندهٔ فیلمی دو مرحله‌ای

## 10-4- انواع تبخیرکننده

الگوی جریان در تبخیرکننده‌ها به دو صورت می‌باشد:

1- تبخیرکننده با یک مسیر عبوری

2- تبخیرکننده با مسیر گردشی

در نوع اول خوراک مایع فقط یک بار از داخل لوله عبور می‌کند و با آزاد کردن بخار به صورت محلول

غلیظ از تبخیرکننده خارج می‌شود. کاربرد این نوع الگوی جریان برای مواد حساس به گرما می‌باشد. زیرا مواد تنها یکبار از لوله‌های تبخیرکننده عبور می‌کند.

در تبخیرکننده‌های گردشی، حوضچه مایعی در دستگاه تعبیه شده است. خوراک ورودی با مایع داخل حوضچه مخلوط می‌شود و مخلوط حاصل از داخل لوله‌ها می‌گذرد. مایع تبخیر نشده از داخل لوله تخلیه شده، به حوضچه بر می‌گردد. پس فقط قسمتی از کل تبخیر در یک مسیر انجام می‌شود. همه تبخیرکننده‌های به روش گردش اجباری به این صورت کار می‌کنند. تبخیرکننده‌های با جریان رو به بالا نیز معمولاً از واحدهای گردشی تشکیل شده‌اند. تبخیرکننده‌های گردشی برای مایعات حساس به گرما مناسب نیستند. در به وجود آوردن گردش از پمپ یا اختلاف دانسیته استفاده می‌شود. در ساخت تبخیرکننده‌های چند مرحله‌ای معمولاً از الگوی جریان "یک مسیر عبوری" استفاده می‌شود. حال آنکه در ساخت تبخیرکننده‌های تک‌مرحله‌ای معمولاً از الگوی جریان "مسیر گردشی" استفاده می‌شود.

به علت کاربرد گسترده تبخیرکننده‌ها در صنعت، امروزه طراحی‌های متنوعی از این دستگاه وجود دارد. معرفی تمامی این تبخیرکننده‌ها از حوصله بحث خارج می‌باشد و در ادامه تنها به توضیح انواع تبخیرکننده‌های فیلمی می‌پردازیم.

## 10-4-1- تبخیرکننده فیلمی

دستگاه تبخیرکننده فیلمی یکی از پرکاربردترین انواع تبخیرکننده‌ها در صنایع شیمیایی می‌باشد. به طور کلی این تبخیرکننده برای موادی با ویسکوزیته بالا و حساس به گرما بکار می‌رود. اساس کار این تبخیرکننده‌ها بر مبنای تشکیل فیلم مایع در حال تبخیر در اطراف محیطی است که انتقال حرارت صورت می‌گیرد.

سه نوع تبخیرکننده فیلمی وجود دارد:

Falling Film (فیلم پایین رونده)

Rising Film (فیلم بالا رونده)

Thin Film(فیلم نازک)

حال به شرح کامل هر کدام از این تبخیرکننده‌ها می‌پردازیم.

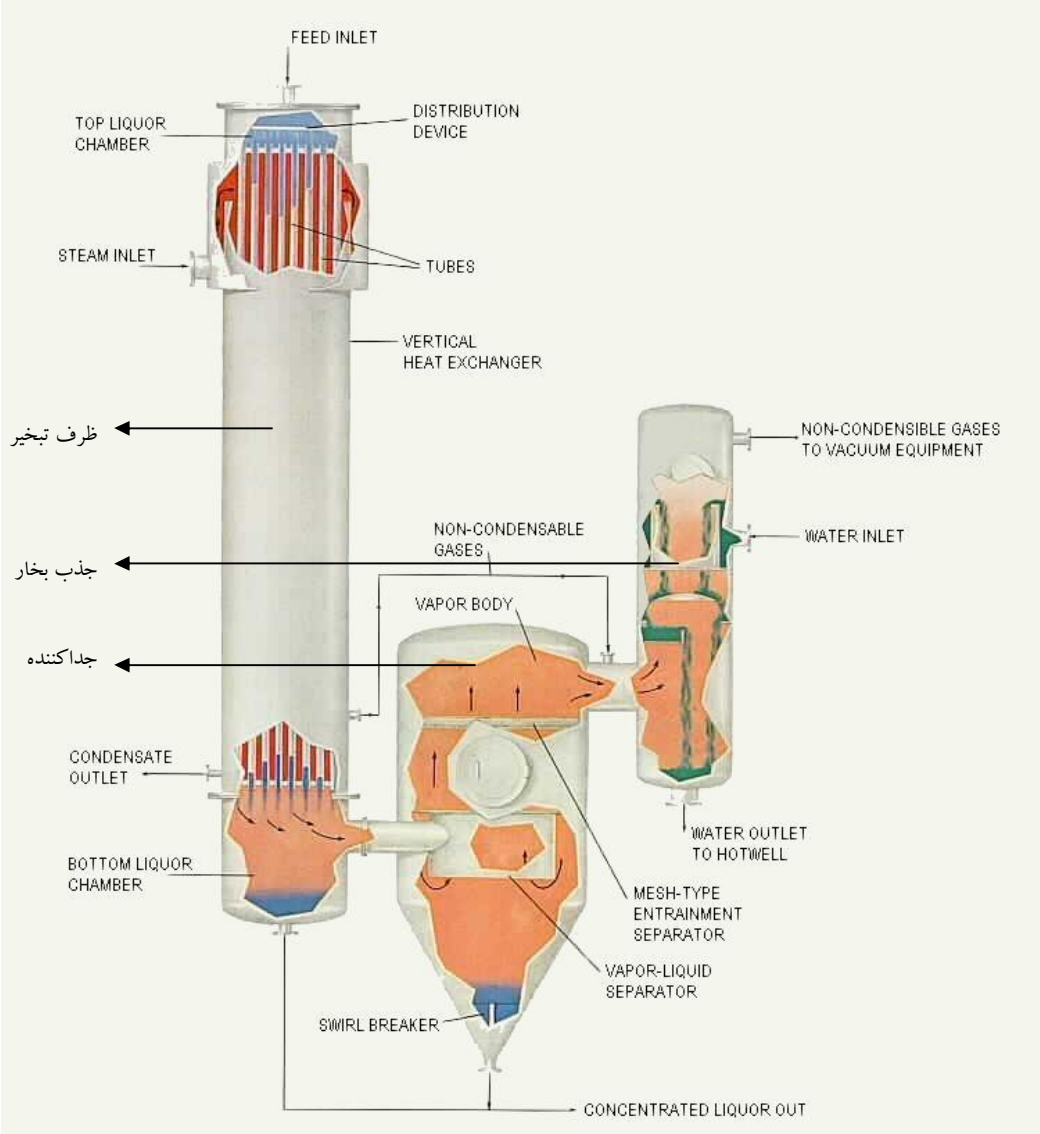
### 10-4-1-1- تبخیرکننده با فیلم پایین رونده (Falling Film)

قسمت‌های اصلی این دستگاه عبارتند از:

1- مبدلی لوله‌ای که بخار در داخل پوسته و ماده‌ای که غلیظ می‌شود در لوله‌ها قرار می‌گیرد.

2- جداکننده مایع از بخار (Separator)

3- توزیع‌کننده مایع در قسمت‌های فوقانی




شکل 10-5- نمایی از یک تبخیرکننده با فیلم پایین رونده

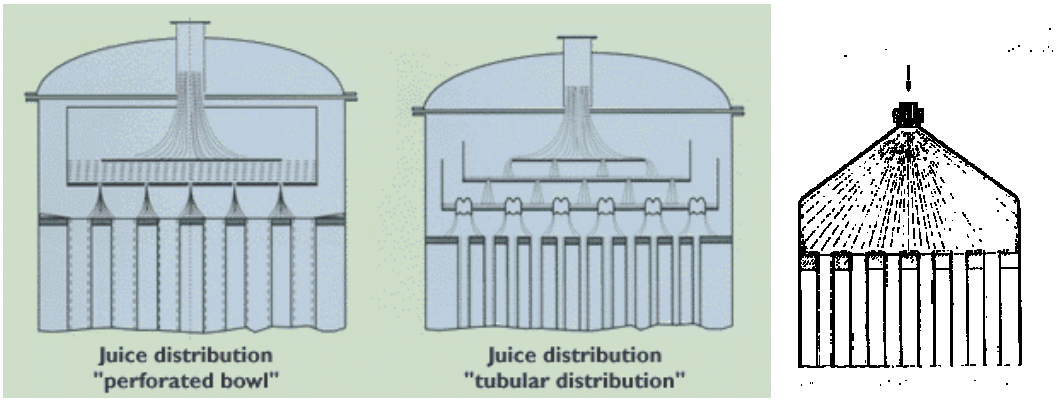
در مقایسه با دو نوع تبخیرکننده دیگر این تبخیرکننده‌ها برای مایعاتی با خواص جرم‌گرفتگی و رسوب کم و ویسکوزیته پایین‌تر و نیز مایعات به نسبت رقیق مناسب می‌باشد. این تبخیرکننده‌ها به میزان وسیعی در صنایع شیمیایی، غذایی و صنایع مشابه کاربرد دارند.

در حالت تک‌مسیره، مایع از قسمت فوقانی وارد می‌شود و در داخل لوله‌های داغ جریان می‌یابد (به صورت فیلم) و از انتهای ستون خارج می‌شود. لوله‌ها بزرگ هستند و قطر آنها 50 تا 250 میلی‌متر (2 تا 10 اینچ) می‌باشد.

بخار حاصل از مایع همراه مایع به طرف پایین لوله‌ها حرکت کرده، از قسمت انتهایی دستگاه خارج می‌شود.

مشکل اساسی این تبخیرکننده‌ها نحوه توزیع مایع به طور یکنواخت و به صورت فیلم در داخل لوله‌ها است. این کار با قرار دادن صفحه فلزی سوراخ‌دار (مشبک) در بالای صفحه لوله انجام می‌شود که باعث جریان مایع به

طور یکنواخت در لوله می‌شود. روش دیگر استفاده از توزیع‌کننده‌های عنکبوتی با بازوهای شعاعی می‌باشد که خوراک تحت حالت پایا به داخل لوله‌ها پاشیده می‌شود. روش دیگر استفاده از یک پاشنده در داخل هر لوله است.




شکل 10-6- نمایی از چگونگی تشکیل فیلم مایع در لوله‌ها. در شکل سمت چپ از صفحهٔ مشبک استفاده شده ودر شکل سمت راست از پاشش در لوله‌ها استفاده شده

اگر امکان گردش مجدد مایع بدون اینکه ضایع شود وجود داشته باشد، توزیع ماده در لوله با برگرداندن مایع به قسمت فوقانی لوله آسان می‌شود. حجم جریان مایع در لوله‌ها در این حالت بسیار بیشتر از حالت تک‌مسیره است.

مزایای تبخیرکننده‌های با فیلم پایین رونده:

1- ساخت ساده

2- عملیات تمیز کردن راحت

3- ضرایب انتقال حرارت بالا

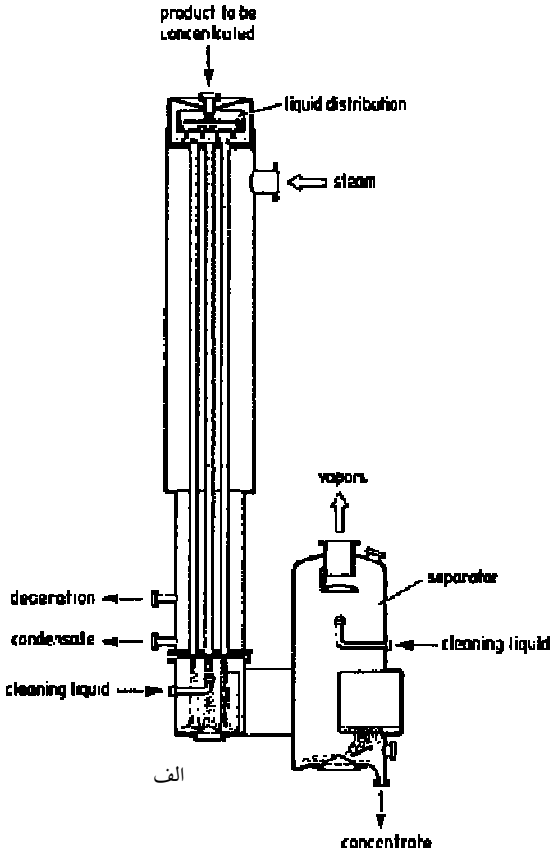
4- امکان عملیات در اختلاف دمای پایین (در واحدهایی که از نظر مکانیکی و حرارتی محدودیت دارند)

5- زمان اقامت کوتاه (برای محصولات با حساسیت دمایی)

6- انعطاف‌پذیری عملیاتی خوب

ب

ج




الف

شکل 10-7- الف. نمایی از نحوهٔ عملکرد تبخیر کننده با فیلم پایین رونده، ب. تبخیر کننده سه مرحله‌ای با فیلم پایین رونده، ج. تبخیر کننده دو مرحله‌ای با فیلم پایین رونده

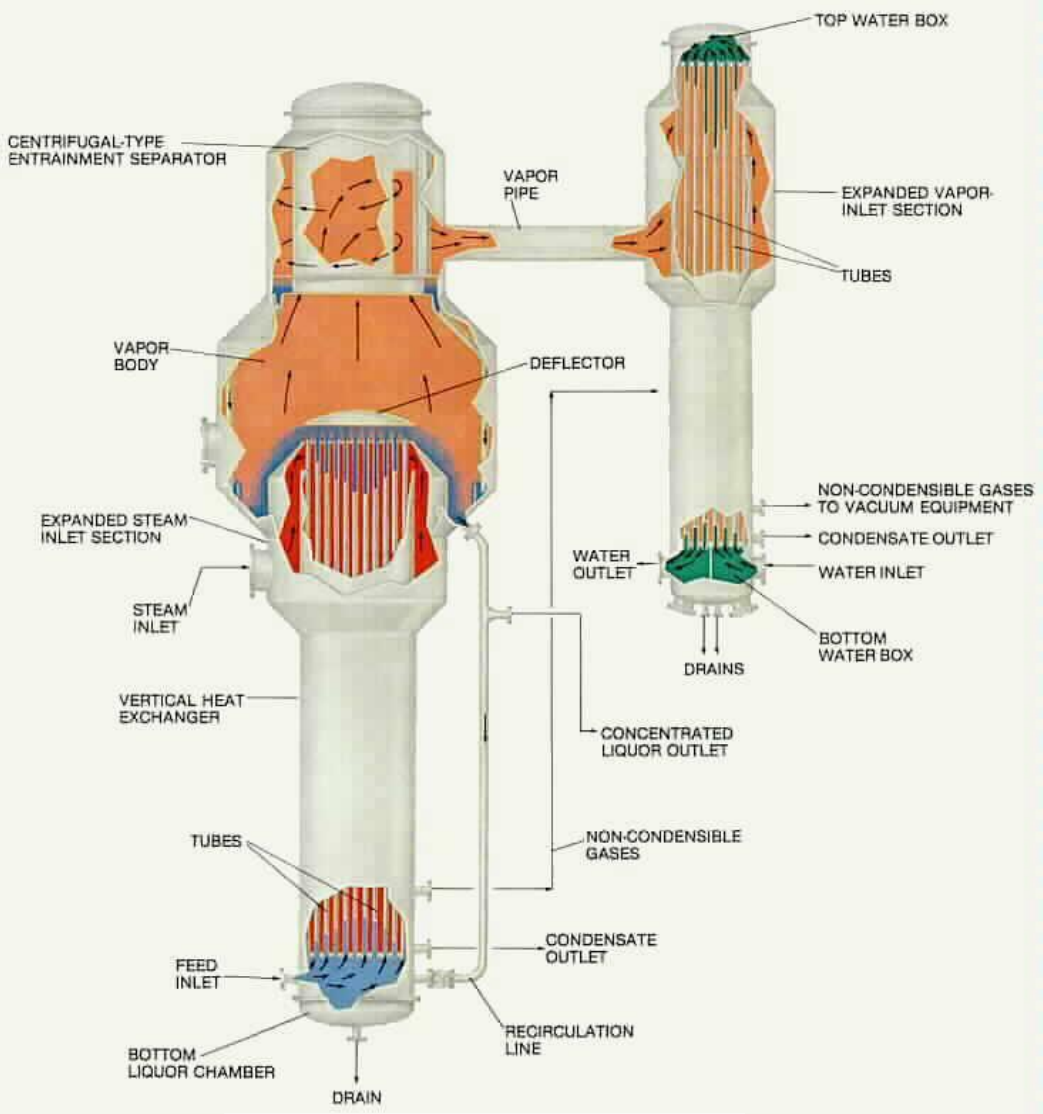
### 10-4-1-2- تبخیرکننده‌های با فیلم بالارونده (Rising Film)

شکل کلی این دستگاه مثل دستگاه تبخیرکننده با فیلم پایین‌رونده می‌باشد با این تفاوت که مایع از پایین وارد می‌شود. قسمت‌های اصلی دستگاه عبارتند از:

1- مبدلی لوله‌ای که بخار در داخل پوسته و مایعی که غلیظ می‌شود در لوله‌ها قرار می‌گیرد.

2- جداکننده مایع از بخار (Separator)

3- وقتی سیستم به صورت برگشتی کار کند، شاخه‌ای که مایع را از جداکننده به انتهای مبدل برمی‌گرداند.در این تبخیرکننده قطر لوله‌ها از تبخیرکننده‌های با فیلم پایین‌رونده کمتر می‌باشد و حدود 25 تا 50 میلیمتر (1 تا 2 اینچ) می‌باشد و طول آنها 3 تا 10 متر است.




شکل 10-8- نمایی از یک تبخیرکننده با فیلم بالا رونده

خوراک رقیق به همراه مایعی که از جداکننده بر می‌گردد مخلوط شده سپس وارد دستگاه می‌شود.محلول غلیظ شده از انتهای گرم‌کن خارج می‌شود. مایع غلیظ باقی‌مانده وقتی از داخل لوله عبور می‌کند به طور جزئی تبخیر می‌شود. مخلوط مایع و بخار از قسمت فوقانی لوله‌ها وارد جداکننده می‌شود. در این تبخیرکننده نیازی به پخش مایع روی دیواره‌های لوله نیست. هنگامیکه تبخیر شروع می‌شود، بخار تولید شده در لوله‌ها، مایع غلیظ شده را به سمت بالا می‌برد. به علت رژیم جریان آشفته ضریب انتقال حرارت بهبود می‌یابد.

در بالای تبخیرکننده برای حذف قطرات موجود در بخار، قبل از ورود به جداکننده (Separator) از یک دسته صفحات پره‌دار و یا mesh استفاده می‌شود. تبخیرکننده‌های با فیلم بالارونده برای مایعاتی که ایجاد کف می‌کنند بسیار موثر هستند. وقتی مخلوط مایع و بخار با سرعت بالا از میان صفحات پره‌دار عبور می‌کند، کف از بین می‌رود.

الف

ب

ح

شکل 10-9- تصاویری از چند تبخیرکننده با فیلم بالا رونده
الف. یک مرحله‌ای ب.وج. چند مرحله‌ای

مزایای این تبخیرکننده‌ها:

1- هیچ وسیله‌ای برای پخش مایع جهت ساخت فیلم لازم نیست

2- پمپ‌های Circulating حذف شده‌اند و نیازی به آنها نیست

3- ابزار دقیق کمتری مورد نیاز است

4- ساختار ساده‌ای دارد

5- برای مایعات با ویسکوزیته بالا و تمایل جرم‌گرفتگی مناسب می‌باشد.

محدودیت‌ها:

1- شرایط عملیاتی، انعطاف‌پذیری دارد.

2- ضریب انتقال حرارت پایین‌تر می‌باشد، زیرا بخار تولید شده نیز به همراه مایع در مجاورت انتقال حرارت قرار می‌گیرد.

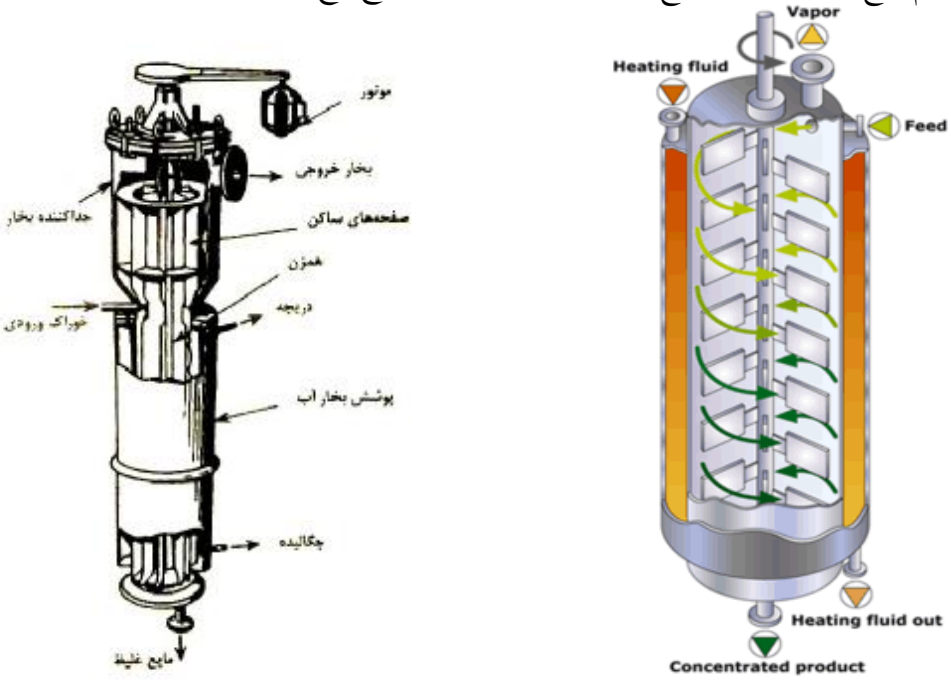
### 10-1-4-3- تبخیرکننده‌های با فیلم نازک (Thin Film)

یک تبخیرکننده با فیلم نازک از بخش‌های اصلی زیر تشکیل شده است:

1- یک بخش استوانه‌ای شکل ژاکت‌دار

2- یک بخش جداکننده بخار با صفحات ساکن در بالای ظرف استوانه‌ای

3- یک روتور چرخنده که در انتهای آن یکسری تیغه (blade) و یا جاروکننده (wipe) نصب می‌باشد که وظیفه تشکیل فیلم مایع غلیظ و انتقال سریع محصول فیلمی بر روی سطح داغ را بر عهده دارند.




شکل 10-10- نماهایی از تبخیرکننده با فیلم

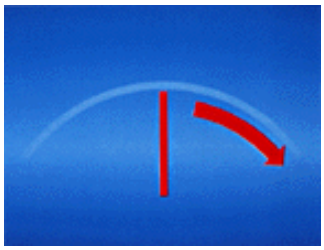
مزیت اصلی تبخیرکننده Thin Film در انتقال حرارت سریع به مایعات با ویسکوزیته بالا می‌باشد. در دمای تبخیر محصول ممکن است ویسکوزیته بالای 1000P داشته باشد. در تبخیرکننده‌های دیگر با افزایش ویسکوزیته ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد، اما در این تبخیرکننده کاهش ضریب کمتر است. از اینرو برای موادی با ویسکوزیته بالا و حساس به درجه حرارت مثل ژلاتین، مواد خام پلیمری، آنتی‌بیوتیک‌ها و آب‌میوه‌ها بسیار کاربرد دارد.

در این تبخیرکننده معمولاً فشار بسیار پایین می‌باشد و می‌توان تا فشار 1 mmHg خلا ایجاد کرد. حتی برخی از انواع جدید وجود دارند که در فشارهای پایین‌تر نیز کار می‌کنند.

سه روش جهت ایجاد فیلم نازک در این تبخیرکننده‌ها وجود دارد:

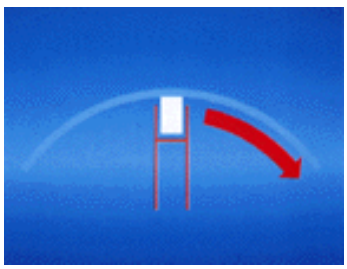
1- **روتور با تیغه ثابت (Rigid Blade Rotor):**

در این روش بین تیغه و سطح انتقال حرارت یک فاصله ثابت وجود دارد.



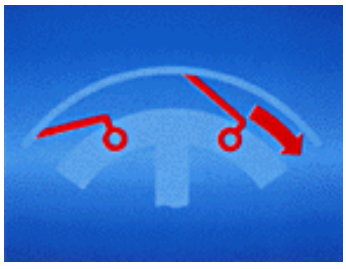
2- **روتور جارویی (wiper) با حرکت شعاعی (Rotor with Radial Moving wiper) :**

در این روش روی روتور جاروهایی نصب می‌شود که وظیفه توزیع مایع را بر عهده دارند. جنس این جاروها معمولاً گرافیت می‌باشد.



3- **روتور با تیغه جارویی لغزنده (Rotor with Hinged Free-Swinging wiper Blade):**

در این روش روی روتور مثل قبل جاروهایی وصل می‌شوند که روی روتور لولا شده‌اند و انعطاف‌پذیرتر از حالت قبل می‌باشد.



محدودیت‌های تبخیرکننده با فیلم نازک:

1- هزینه ساخت بالا

2- قسمت‌های متحرک میانی که باید نگهداری و تعمیر شوند و نیز هزینه عملیاتی بیشتری لازم دارند.

3- ظرفیت پایین این تبخیرکننده در مقایسه با تبخیرکننده‌های لوله‌ای

الف

ب

ج

شکل 10-11- تصاویری از تبخیرکننده با فیلم نازک

الف. تصویری از یک روتور

ب. نمایی از تبخیرکننده با فیلم نازک

ج. جدارهٔ یک تبخیرکننده با فیلم نازک

فصل یازدهم

# برج‌های خنک کننده
# Cooling Towers

## 11-1- شرح وتوصیف

از برج‌های خنک‌کننده به طور گسترده برای خنک‌کردن مقادیر زیادی آب در نیروگاههای حرارتی، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌های اتمی ، کارخانه‌های فولادسازی، سیستم تهویه مطبوع و سایر مراکز صنعتی استفاده می‌شود. برای کاهش دمای قسمتهای مختلف در صنایع یاد شده لازم است تا گرمای حاصل از عملکرد ماشین‌ها و موتورها به نحو مناسبی از سیستم گرفته، به محیط خارج منتقل شود.

از آنجایی‌که میزان تبخیر آب در این صنایع بسیار بالا و آب مصرفی آنها دارای خلوص بالا و طبیعتاً قیمت گران می‌باشد، لازم است این بخارها مجدداً به آب تبدیل شده، مورداستفاده قرار گیرند. تبدیل بخار به آب از طریق گرفتن گرمای آن امکان‌پذیر است. لذا چنانچه این بخار گرم با آب سرد درمجاورت هم واقع شوند گرمای بخار آب‌گرفته شده، به آب تبدیل می‌گردد. برای ادامه روند فوق نیاز به آب سرد می‌باشد. یک شیوه ابتدایی در این مورد برگشت آب گرم به محیط و استفاده از آب تازه است. این عمل به علت بالا بودن دمای آب و حجم بالای آن از نظر زیست‌محیطی قابل قبول نمی‌باشد و همچنین تامین این مقادیر عظیم آب برای این صنایع همیشه میسر نیست. آنچه در اکثر صنایع برای دست‌یابی به‌منظور فوق رواج یافته، استفاده از برج‌های خنک‌کننده(Cooling tower) می‌باشد.

برج خنک‌کن عبارت است از یک ساختمان بتنی، فلزی و یا چوبی، با شکل و ترکیب خاص‌که برای سرمایش آب گرم به صورت طبیعی یا مکانیکی طراحی و ساخته می‌شود. طبعاً ابعاد و شکل این سازه، تابعی از میزان تبادل گرمایی موردنیاز و مکانیزم سرمایش می‌باشد.

در این سیستم آب گرم به طور مستقیم و یا غیرمستقیم در تماس با جریان هوای طبیعی یا مکانیکی قرارگرفته و گرمای آن به هوا منتقل می‌شود و برای مصرف بعدی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

در ادامه مختصری راجع به انواع برجهای خنک‌کننده توضیح داده شده و تصاویری از چند Cooling tower رایج در صنایع آورده شده است.

## 11-2- تقسیم‌بندی انواع برج‌های خنک‌کننده

تقسیم‌بندی‌های متفاوتی برای برج‌های خنک‌کن آمده است؛ از جمله براساس نوع جریان و یا براساس عامل تبادل گرما (طبیعی یا مکانیکی) و یا بر حسب نحوهٔ تبادل (مستقیم یا غیرمستقیم).

### 11-2-1- برج‌های خنک‌کن طبیعی

این نوع برج‌ها، ساختمان‌هایی هستند، قائم (با ارتفاع نسبتاً زیاد) به صورت استوانه‌ای، مخروط ناقص که از پوسته‌های فلزی یا بتنی و با سطح جانبی مسدود تشکیل شده‌اند، که بر روی تعدادی ستون قائم یا مورب با بلندی نسبتاً زیاد (تا حدود 20 متر) قراردارند. اساس کار این برج‌ها عبارت است از استفاده از قانون فیزیکی حاکم در دودکش‌ها، یعنی جریان یافتن هوا از ناحیه پرفشار به ناحیه کم‌فشار.

استفاده از برج‌های خنک‌کن طبیعی نسبت به نوع مکانیکی، دارای مزایای زیر می‌باشد:

1-هزینه‌کم بهره‌برداری؛ زیرا نیاز به انرژی خاص نداشته و برای بهره‌برداری از آن نیازی به نصب، تعمیرو نگهداری خاصی نیست.

2-همیشه آماده بهره‌برداری است و احتیاج به متوقف کردن و تعمیرات دوره‌ای ندارد.

3-برای ظرفیت‌های بسیار زیاد سرمایش، مناسب است.

در این قسمت مکانیزم کار این نوع به طور مختصر شرح داده می‌شود:

آب گرم از قسمتهای پایین این برج‌ها، به جریان درآمده و مقداری از گرمای آن به هوای مجاور منتقل شده، باعث گرم شدن و درنتیجه سبک شدن هوا می‌گردد. هوای گرم شده در اثر سبکی وزن به ارتفاعات بالاتر در داخل برج منتقل می‌شود و به این ترتیب هوای سبک در ارتفاعات بالا و هوای سنگین در ارتفاعات پایین قرار می‌گیرد که عامل جریان یافتن هوا از پایین به بالاست. برای آنکه هوای سردی که در ارتفاعات پایین و در سطح زمین، در اطراف برج وجود دارد، بتواند در این جریان هوایی شرکت نماید، قسمتهای پایین ساختمان برج در سطح جانبی باز است و دراین قسمت فقط ستونهای برج قرار دارند. در زیر تصاویری از این نوع برجها آورده شده است.

شکل 11-1- تصویری از Cooling towerهای طبیعی مورد استفاده در صنعت

شکل 11-3- تصویر بالا داخل یک Cooling tower طبیعی را نشان می‌دهد.

میزان جریان هوای برقرار شده در سیستم فوق از یک طرف به اختلاف فشار در بالا و پایین برج و از طرف دیگر به سطح مقطع ورودی برج بستگی دارد و برای ایجاد اختلاف فشار در بالا و پایین برج بایستی ارتفاع آن را

به نسبت تغییر داد و برای ازدیاد سطح مقطع برج بایستی قطر پایه را اضافه نمود. به این ترتیب با تغییر دادن دو پارامتر فوق می‌توان ظرفیت سرمایشی برج را متناسب با نیاز کارخانه افزاش یا کاهش داد.

بطورکلی با افزایش ارتفاع و قطر پایه برج خنک‌کن طبیعی کارایی آن بالا می‌رود و ظرفیت سرمایشی آن افزایش می‌یابد.

نسبت افزایش قیمت ساخت برج به مراتب کمتر از افزایش راندمان برج است و به همین جهت امروزه ساخت برج‌های عظیم بسیار اقتصادی‌تر از نوع کوچک آن می‌باشد.

### 11-2-1-1- برج‌های خنک‌کن طبیعی مدار بسته (خشک)

چنانچه آب گرم در سیستم بسته‌ای مانند رادیاتور، در معرض برخورد با هوای جاری در برج قرار گیرد، پس از طی طول سیستم مبدل حرارتی از گرمای آن کاسته شده و می‌توان از آن برای سرمایش ماشینهای کارخانه استفاده نمود. از آنجا که در این نوع، آب در سیستم بسته قرار دارد و تماس مستقیم بین آب‌گرم و هوا وجود ندارد، امکان تبخیرشدن و خروج از سیستم را نداشته و نیاز به جایگزینی آب اضافی (Make up) نخواهد بود. این نوع برج به نوع خشک یا بسته موسوم است. از مزایای دیگر این نوع آن است که غلظت آب موجود در مدار بسته سیستم نیز ثابت خواهد بود.

محاسن و معایب برج خنک‌کن طبیعی‌خشک نسبت به نوع تر (مدار باز) را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

**الف) محاسن:**

- آزادی عمل در انتخاب محل‌کارخانه بدون توجه به منابع آب منطقه
- به‌علت خشک بودن نسبی هوای داخل و خارج برج، می‌توان بدون بیم از مسأله خوردگی از اسکلت فلزی برای برج استفاده نمود.
- نیاز به آب اضافی برای جایگزینی تبخیر یا پایین آوردن غلظت مواد محلول در آب ندارد که خود نوعی صرفه‌جویی در هزینه است.
- ستون بخار بر بالای آن تشکیل نمی‌شود.

ب) معایب

- نیاز به مبدل‌های حرارتی دارد.
- در ابعاد مساوی با نوع تر، دارای قدرت سرمایشی کمتری است.

### 11-2-1-2- برج‌های خنک‌کن طبیعی مدار باز (تر)

در این برج‌ها، آب گرم توسط یک شبکه توزیع و پخش، در یک مدار باز، در تماس مستقیم با هوای جریان یافته در برج قرار می‌گیرد تاگرمای آن به هوا منتقل‌گردد. در این سیستم، انتقال گرما از آب به هوا از طریق جابجایی و تبخیر صورت می‌گیرد.

در سیستم فوق، به‌علت تماس مستقیم آب گرم با هوا، معمولاً 0/3 تا 1 درصد آب در گردش به صورت بخار از آب جدا شده و با هوا مخلوط می‌گردد که غالباً باعث اشباع شدن هوای خروجی از برج می‌گردد. این پدیده در روزهای سرد به صورت ابر سفیدی که از دهانه برج خارج می‌گردد نمایان است.

### 11-2-1-3 - برج‌های خنک‌کننده طبیعی مختلط

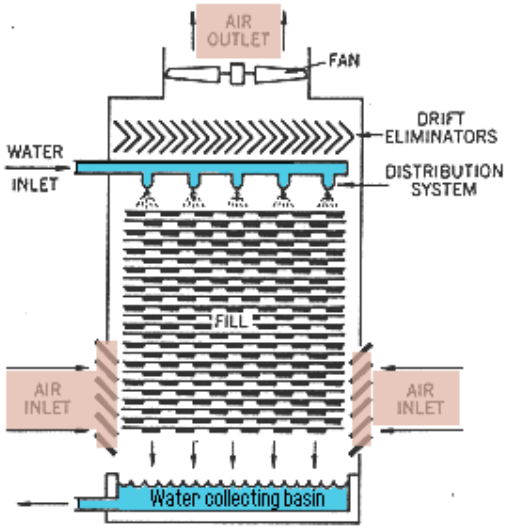
این نوع برج، اختلاطی از دو نوع سیستم‌تر و خشک (مدار باز و بسته) است. با امتزاج این دو سیستم در ابتدا هوای جریان یافته مقداری از گرمای آب را گرفته و گرم می‌شود، به این ترتیب از اشباع شدن هوا توسط بخار آب و مشکلات ناشی از آن پیشگیری می‌شود و این هوای نسبتاً گرم به صورت مستقیم با آب تماس یافته، آن را خنک می‌کند.

## 11-2-2- برج‌های خنک‌کن مکانیکی

برج‌های خنک‌کن طبیعی برای به جریان انداختن هوا، نیاز به ساختمان بلندی دارند. حال چنانچه در اثر محدودیت‌های خاص ساخت ساختمان بلند مقدور نباشد و یا آنکه برای ظرفیت موردنیاز ساخت برج طبیعی بیش از نیاز باشد، استفاده از برج‌های خنک‌کن مکانیکی اجتناب ناپذیرخواهد بود. در این برج‌ها، کمبود ارتفاع را بایستی به نحوی جبران نمود و آن عبارت است از راندن هوا به داخل برج و یا خارج کردن هوا از آن. در زیر به برج‌هایی با مکانیزم‌های گفته شده، اشاره می‌شود.

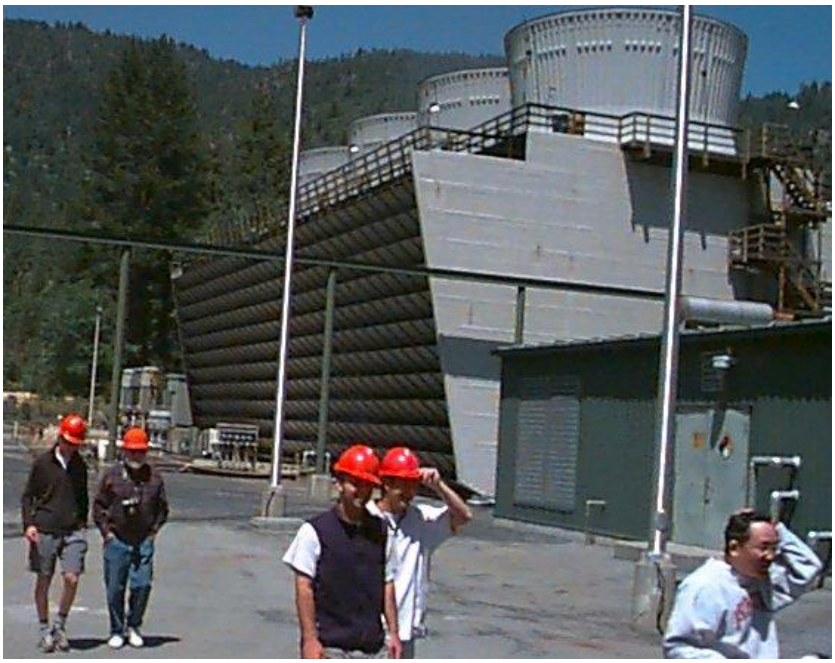
### 11-2-2-1- برج‌های خنک‌کن مکنده

در قسمت بالای آن یک مکنده وجود دارد که با ایجاد نیروی مکش، هوا را از طریق بادگیرها وارد برج می‌کند، هوای وارد شده پس ازتبادل حرارت با آب گرم برگشتی، از خروجی مکنده خارج می‌شود. برحسب اینکه هوای ورودی عمود بر جریان آب یا اینکه موازی و در خلاف جهت جریان باشد دو نوع برج خنک‌کن مکنده‌ای ساخته شده است.




شکل 11-4- طرز کار برجهای خنک‌کن دمنده

در شکل 11-4 WATER INLET، آب گرم ورودی به برج خنک کننده است که به وسیله آب‌پاشها بر روی بستر خاصی ریخته می‌شود و AIR INLET هم که در قسمت پایین تصویر نشان داده شده است ورودی هوای برج را نشان می‌دهد.



شکل 11-5- تصویری از Cooling towerهای دمنده را نشان می‌دهد

شکل 11-6- تصاویری از Cooling towerهای دمنده را نشان می‌دهد

### 11-2-2-2- برج‌های خنک‌کن دمنده

برج خنک‌کننده دمنده تقریباً شبیه برج خنک کن مکنده است. البته بین این‌دو برج تفاوت‌هایی نیز وجود دار دکه در زیر آمده است.

- اطراف برج خنک‌کن دمنده، بسته ولی اطراف برج خنک کننده مکنده باز است.

– در برج خنک‌کن دمنده تخته‌های بازیابی آب در بالای توزیع‌کننده قرار دارد ولی در برج‌خنک‌کن مکنده به ازای هر ردیف از تخته‌های پخش‌کننده، یک ردیف تخته بازیابی وجود دارد.

– دمنده در پایین برج قرار دارد ولی مکنده در بالای برج قرار دارد.

– در برج مکنده هوا از تمام جهات و بطور یکنواخت با آب تماس حاصل می‌کند ولی در برج دمنده، این‌طور نیست.

شکل 11–7– تصویری از Cooling tower نوع مکنده

## 11–3– خصوصیات برج‌های خنک‌کن

در این بخش خصوصیات انواع مختلف برج خنک‌کننده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### 11–3–1– خصوصیات برج‌های خنک‌کن مدار باز

1–ظرفیت دستگاه: مقدار آبی است که در حوضچه پایین برج، دستگاه‌های تبادل حرارت و مسیر رفت و برگشت آب وجود دارد. معمولاً 20 درصد آب در مدار و دستگاه‌های تبادل حرارت جریان دارد و بقیه در حوضچه برج خنک‌کن.

2-زمان یک‌گردش: زمان لازم برای اینکه جریان آب از مکش پمپ برج خنک‌کن خارج شود و دوباره به همان نقطه برگردد.

3-از دست دادن آب به وسیله تبخیر: حدوداً برای هر 10 درجه فارنهایت افت حرارت آب، حدود 1٪ مقدار آب در گردش را درنظر می‌گیرند.

4-کم شدن به‌وسیله باد: در برج‌های خنک‌کن مقداری از آب برج به همراه جریان هوا، از سیستم خارج و وارد جو می‌شود، این مقدار آب به طور متوسط در حدود 0/2 درصد مقدار آبی است که در مدت یک ساعت در مدار گردش می‌کند.

5-درجه تغلیظ: تبخیر قسمتی از آب برج، غلظت نمکهای محلول در آب را افزایش می‌دهد. در نتیجه هرچه تبخیر بیشتر صورت گیرد، غلظت مواد در آب باقیمانده بیشتر خواهد شد و به عبارت دیگر درجه تغلیظ افزایش خواهد یافت. از این‌رو درجه تغلیظ عبارت است از نسبت مواد محلول موجود در آب درگردش به مقدار مواد موجود در آب تأمینی (جبرانی) . البته این نسبت موقعی درست است که مواد دیگری به آب اضافه نشده باشد. درجه تغلیظ را می‌توان از نسبت کلر آب در گردش به کلر آب جبرانی حساب کرد.

### 11-3-1-1- کنترل پارامترها

برای اینکه برج خنک‌کن خوب کار کند و در برابر عوامل خارجی پایدار باشد، باید نکات زیر موردتوجه قرار گیرد:

1-درجه تغلیظ: معمولاً بین 2 تا 5 باشد.

2-بکار بردن مواد شیمیایی: این مواد عبارتند از؛ کلر، اسید و مواد ثابت‌کننده (ضدخوردگی و ضدرسوب). این مواد باید به نحوی در مکانهایی استفاده شود که با آب سیستم کاملاً مخلوط گردد.

3-اضافه‌کردن‌گاز کلر: به‌منظور کنترل رشد موجودات زنده، غلظت آن نباید از حد معینی کمتر شود.

4-اضافه‌کردن ضد لجن: برای جلوگیری از تشکیل رسوب.

### 11-3-2- خصوصیات سیستم خنک‌کن مدار بسته

سیستم خنک‌کن مدار بسته سیستمی است که آب در آن در یک مسیر بسته درگردش می‌باشد و به علت عدم مجاورت با هوا تبخیر در آن صورت نمی‌گیرد. بنابراین در ترکیب آن تغییر چندانی به‌وجود نمی‌آید. سیستم مدار بسته، مشابه هر شبکه آبی احتیاج به بهسازی شیمیایی دارد ولی چون هدررفتن آن کم است هزینه بهسازی در شرایط خوب سیستم، زیاد نمی‌باشد.

برای اینکه سیستم به خوبی کارکند، آب اولیه وآب تأمینی بایستی از کیفیت خوبی برخوردار باشند. سیستم مداربسته کارخانجات معمولاً در مراکز حساس مثل مدلهای ریخته‌گری در کارخانجات ذوب فلز به‌کارگرفته می‌شوند. مصرف وکاربرد سیستم سردکننده مدار بسته از این لحاظ است که اشکالات ناشی از رسوب در

مبدل‌های حرارتی حساس را از بین ببرند. سرعت آب در مدار بسته بطور کلی کم و بین 0/9 تا 1/5 متر بر ثانیه می‌باشد و اختلاف دمای ایجاد شده در این سیستم برابر 10 تا 15 درجه فارنهایت (6 تا 9 درجهٔ سانتی‌گراد) می‌باشد.

سیستم مدار بسته چنانچه نشتی درپمپ‌ها و مراکز مصرف نداشته باشد، به آب جبرانی بسیار کم نیاز دارد. این سیستم مجهز به مخزن انبساط و دریچه خروجی تبخیر جزئی می‌باشد. هرچند آب جبرانی، آب‌کندانس‌شده می‌باشد و احتمال رسوب و خوردگی بی‌اندازه کم است، لذا احتیاج است بعضی اوقات آب آزمایش شده، و مقدار مواد محلول آن در صورتی‌که آب نرم(آب عاری از ناخالصی) مصرف می‌شود با مخزن آب تغذیه مقایسه گردد. چون غالباً این سیستم در مدار دارای آلیاژها و فلزات مختلف می‌باشد در معرض خطر احتمالی خوردگی گالوانیکی قرار دارد. چون آب جبرانی دارای غلظت‌کم اکسیژن است، لذا خوردگی به وسیله اکسیژن کم است. اما چنانچه مصرف آب جبرانی زیاد باشد و به دفعات آب وارد سیستم شود، احتمال وجود اکسیژن و خوردگی اکسیژن وجود دارد.

از نظر تئوری چون تغلیظ در مدار صورت نمی‌گیرد، خطر تولید رسوب هم در آن کم است و چون رسوب وجود ندارد کاهش در تبادل حرارت نیز وجود ندارد و خوردگی نیز نباید در سیستم باشد. ولی چنانچه به‌علت نشت، لازم باشد مکراً به سیستم آب اضافه شود، هرچند آب جبرانی، آب کندانس باشد، ممکن است همراه آب، مواد معلق، اکسیژن و حتی میکروارگانیسمها نیز به سیستم اضافه شود ودرحالیکه سرعت آب کم می‌باشد، پتانسیل ایجادرسوب افزایش می‌یابد و شرایط خوردگی و بوجود آمدن رسوبات سخت در مبدل‌ها فراهم می شود. از اینرو در سیستم‌های مداربسته که نیاز مکرر به آب جبرانی باشد، لازم است تدابیری برای جلوگیری از ایجاد رسوب اتخاذ کرد.

## 11-4- مشکلات عملیاتی برج‌های خنک کننده

عمده‌ترین مشکلات سیستم‌های سردکننده عبارتند از:

1-خوردگی

2-رسوب گذاری که از مهمترین آنها می‌توان رسوبات میکروبیولوژی را نام برد.

3- کف کردن

### 11-4-1- خوردگی

خوردگی در سیستم‌های سردکننده و انتقال آب مهمترین و عمده‌ترین مشکل می‌باشد. عوامل اصلی در خورده شدن فلزات مخصوصاً فلزات سری آهن در سیستم سردکننده عبارتند از:

-کیفیت آب: بالا رفتن غلظتهای نمک محلول در آب، خوردگی را شدت می‌بخشد، زیرا زیاد بودن غلظت مواد در آب غلظت یونی را افزایش می‌دهد که نتیجه آن بالا رفتن فعل و انفعالات یونی و احتمالاً تشکیل

نمکهای خورنده از طریق جابجایی نمکهای محلول می‌باشد. از نمک‌های محلول در آب، کلرورها بیشترین سهم را در افزایش میزان خورندگی دارند.

- اثر حرارت: با افزایش درجه حرارت، خوردگی افزایش می‌یابد.

- اکسیژن محلول در آب: به فلز آهن حمله‌ور شده، سبب خوردگی و سوراخ شدن آن می‌شود. منبع اصلی آن، اکسیژن محلول در آب در تماس با هواست.

-میکروارگانیسم‌ها: باکتریهای احیاءکننده سولفات با تولید هیدروژن‌سولفوره و اسیدسولفوریک خوردگی را در سیستم سبب خواهند شد.

### 11-4-1-1- جلوگیری از خوردگی

به طور کلی در سیستمی که با آب سر و کار دارد، محافظت فلزات و آلیاژها به‌طورکامل در برابر خوردگی غیرممکن است. هدف از کنترل خوردگی، رسیدن به حد قابل قبول از طریق طراحی درست، انتخاب فلزات و آلیاژهای مناسب و همچنین بهسازی آب و ترکیبات شیمیایی متناسب با شرایط سیستم و کیفیت آب است.

عده‌ای معتقدند برای رسانیدن خوردگی به حداقل بایستی طراحی خوب انجام شود و فلزات و آلیاژهای مناسب انتخاب گردد، اما با توجه به مسائل اقتصادی و امکانات، اکثریت کارشناسان و مهندسین آب و خوردگی معتقد می‌باشند تنها راه رسانیدن خوردگی به حد قابل‌قبول استفاده از مواد شیمیایی می‌باشد.

## 11-4-2- رسوب

### 11-4-2-1- منابع ایجاد رسوب

**1- منابع‌داخلی:** یکی از اساسی‌ترین منابع تولید رسوب کیفیت خود آب است که علاوه بر مواد محلول در آب ممکن است دارای مواد معلقی همچون ترکیبات سیلیسی، آهن محلول یا رسوب، منگنز یا موادی که در نتیجه صاف‌کردن آب به آن اضافه شده است باشد.

**2- منابع خارجی:** مهمترین عامل خارجی ایجاد رسوب در یک سیستم سردکننده، مخصوصاً سردکننده مدارباز، هوا می‌باشد. برج خنک‌کن مانند یک مکنده بزرگ هواست و آب وسیله مناسبی برای جذب گرد و خاک، میکروارگانیسم‌ها و سایر ذرات است که در حجم بسیار بزرگ در مجاورت آب قرار دارند و چون مواد معلق در هوا بر حسب شرایط جوی و فصول مختلف تغییر می‌کند، مواد معلق در برج نیز همیشه در حال تغییر است.

### 11-4-2-2- انواع رسوب

برای جلوگیری از ایجاد رسوب در سیستم باید نخست آنها را شناخت تا بتوان به نحو موثر با آنها مبارزه کرد.

رسوب‌ها، مخلوطی از گردوخاک، آلودگی‌های آب، روغن، میکروارگانیسم‌ها و محصولات خوردگی می‌باشند. عوامل مؤثر تشکیل‌دهندهٔ آنها عبارتند از :

- آلودگی‌های آب تأمینی
- مواد جامد معلق در آب
- آهن، منیزیم و آلومینای موجود در آب
- آلودگی‌های فرایند
- سرعت جریان، درجه حرارت و pH آب

بطورکلی با توجه به کیفیت و منابع تأمین آب و درنظر گرفتن مسائل اقتصادی، تشکیل رسوب را با اتخاذ یک یا دو روش توأم زیر به حداقل می‌رسانند:

1- حذف مواد مولد رسوب از آب

2- اصلاح آب به‌منظور جلوگیری از نشست یا چسبیدن مواد به سطوح فلزی

### 11-4-3- میکروارگانیسمها

تقریباً می‌توان گفت تمام صنایعی که با آب سروکار دارند، میکروارگانیسم‌ها در آن صنایع اثر می‌گذارند، زیرا تعداد زیادی از فعل و انفعالات شیمیایی بوسیله میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود.

در پاره‌ای از صنایع مثل صنایع غذایی، دستگاه‌های سردکنندهٔ کارخانجات صنایع شیمیایی، میکروارگانیسم‌ها، ضررهای زیادی را ایجاد می‌کنند و حتی ممکن است مسیر تولید را تغییر دهند. تابش مستقیم نور خورشید به برج‌های خنک‌کننده، وجود حرارت مناسب وغذا که ممکن است در نتیجه نشت از مسیر تولیدات کارخانه به برج وارد شود، فراوانی اکسیژن در نتیجه ریزش و تلاطم آب در سیستم مداری باز محیط خوبی برای رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها می‌باشد.

#### 11-4-3-1- کنترل میکروارگانیسم‌ها در برج‌های خنک‌کننده

از نظر عملی در بیشتر سیستم‌های آب صنعتی در استفاده از طرق فیزیکی برای نابودی و کنترل فعالیت میکروارگانیسم‌ها محدودیت زیادی وجود دارد. مثلاً حرارت دادن آب تا 70 درجه ممکن است بسیاری از میکروارگانیسم‌ها را از بین ببرد اما منظور اصلی استفاده از برج، خنک‌کردن آب و استفاده از آن در مبدل‌ها و یا مراکز دیگر کارخانه می‌باشد. تشعشع، مثل اشعه گاما یا اشعه ایکس و یا حتی فرکانسهای خاصی از صوت می‌تواند از فعالیت میکروارگانیسم‌ها جلوگیری کرده، آنها را بکشد. اما این نوع کنترل متضمن هزینه بسیار و تجربیات عملی زیاد می‌باشد. از روش‌های شیمیایی نیز که می‌توانند کنترلی در برابر موجودات زنده موجود در آب برج باشد pH است که اکثریت میکروارگانیسمها قادر به ادامه زندگی، رشد و تکثیر در محدوده‌های خاصی از pH نمی‌باشند اما این pH های اسیدی یا قلیایی نیز مسائل عمده‌ای را در برج بوجود خواهد آورد.

بنابراین تنها راه مبارزه و کنترل میکروارگانیسم استفاده از ترکیبات و میکروب‌کش‌های شیمیایی می‌باشد.

معمولی‌ترین ترکیباتی که برای کنترل میکروارگانیسم برج‌های خنک‌کن مصرف می‌شوند، عبارتند از؛ کلر، برم، فنل کلروینه و نمکهای مس.

کلر یکی از مؤثرترین مواد برای کنترل میکروارگانیسم‌ها در سیستم سردکننده مدار باز می‌باشد. تصمیم در مورد اینکه در یک برج، کلر یا مواد دیگر مصرف شود بستگی به بررسی اقتصادی، مقدار کلر موردنیاز، هزینه محل، کارگر و نصب تجهیزات دارد. در حال حاضر هیچ ماده میکروب‌کشی وجود ندارد که بتواند طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌های موجود در برج‌های خنک‌کن را از بین ببرد. از اینرو با تجربه و دقت بایستی بر مبنای شرایط عملکرد هر برج، ماده میکروب‌کش انتخاب گردد. تنها، توجه به ارزان بودن یک ماده شیمیایی و انتخاب آن، نه تنها اقتصادی نیست بلکه ممکن است متضمن ضررهایی نیز باشد. مواد شیمیایی باید به‌نحوی انتخاب شوند که در صورت مخلوط شدن و وارد شدن در مسیر فرایند خساراتی متوجه آن نسازد.

### 11-4-4-کف کردن

در پاره‌ای از برج‌های خنک‌کننده، تولید کف می‌تواند موجب مشکلاتی شود. ریزش آب از بالای برج و جذب هوا توسط آن، سبب تولید جباب‌هایی در آب خواهد شد که همراه مقداری روغن و ترکیباتی آلی مشابه می‌باشدکه در کل برج پخش خواهد شد. در اغلب موارد ایجاد کف، علاوه بر کاهش ظرفیت حوضچه برج از طریق انسداد لوله‌های انتقال آب خساراتی را متوجه پمپ‌ها خواهد نمود. یکی از عواملی که سبب ایجاد کف در برج خواهد شد، مواد تثبیت‌کننده‌ای می‌باشد که به چوب برج‌ها برای محافظت آنها تزریق می‌گردند. این پدیده غالباً بعد از چند هفته کار برج مرتفع خواهدگردید. یادآوری می‌کنیم که یکی از مهمترین اجسامی که برای ایجاد سطح تماس بین آب و هوا در برجهای خنک‌کننده از آن استفاده می‌شود الوارهای چوبی است.

برای بهبود شرایط سیستم باید از ضدکف‌های مناسبی استفاده نمود.

فصل دوازدهم

# غربال
# Screen

## 12-1- شرح و توصیف

در تولید مواد شیمیایی جداسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در واقع بیشتر دستگاههای فراوری به جداسازی یک ماده از یک فاز یا ماده‌ای دیگر اختصاص دارند.

جداسازی‌ها دو نوعند: تفکیک نوع اول که به عملیات نفوذ معروف است و شامل انتقال مواد بین فازهاست و تفکیک نوع دوم که به جداسازی مکانیکی معروف است و غربال کردن جزء این دسته می‌باشد.

## 12-2- غربال کردن

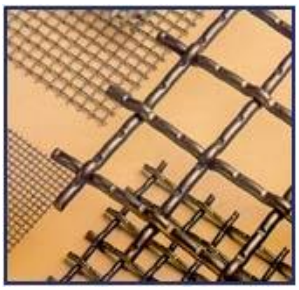
غربال کردن یا سرند کردن روش جداسازی ذرات بر اساس اندازه آنهاست. در غربال کردن صنعتی، جامدات را روی سطح یک غربال می‌ریزند. ذرات با دانه ریز، از سوراخ‌های غربال عبور می‌کنند و ذرات درشت از سوراخها عبور نکرده و باقی می‌مانند. یک غربال عمل تفکیک را به دو جزء مختلف انجام می‌دهد. به این اجزاء، اجزای بدون اندازه معین گویند. چون اگرچه حد بالا یا پایین اندازه ذراتی که در آنهاست معلوم می‌باشد، ولی حد دیگر معلوم نیست. ماده‌ای که از یک سری غربال با اندازه‌های مختلف عبور می‌کند به اجزاء دارای ذرات معلوم تفکیک می‌شود، یعنی اجزایی که در آنها هم اندازه حداکثر ذره و هم اندازه حداقل آن معلوم است. غربال کردن گاهی به صورت مرطوب انجام می‌شود ولی اغلب به صورت خشک است.

غربال‌های صنعتی از توری سیمی، پارچه ابریشمی یا پلاستیک، میله‌های فلزی، صفحات فلزی سوراخدار یا شیاردار یا سیمهای با مقطع سه‌گوش ساخته می‌شوند. برای این کار از فلزات مختلف استفاده می‌شود که فولاد و فولاد ضدزنگ از بقیه رایج‌ترند. اندازه شبکه در الکهای(غربال) استاندارد بین in40 تا in400 است و غربال توری با منافذ 1 میکرومتر نیز در بازار موجود است. اما الکهای ریزتر از $150\mu$، معمولاً به کار نمی‌روند، چون برای ذرات بسیار ریز روشهای تفکیک دیگر، با صرفه‌تر است.

برای مواد با دانه‌های درشت از میله‌های آهنی یا فولادی و یا ریل‌های آهنی استفاده می‌شود. با کوچک شدن اندازه مواد اندازه چشمه‌ها(سوراخهای غربال) نیز کوچکتر می‌شود. در عمده موارد از سطوح مشبک استفاده می‌شود. در سالهای اخیر الیافی مثل پلی‌اورتان برای ساخت شبکه غربالها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که مقاومت در مقابل ضربه و سایش دارند و از سر و صدا می‌کاهند. درشکل 12-1 تعدادی از شبکه‌های مورد استفاده برای غربال‌کردن(screen media) نشان داده شده است.

شکل 12-1-
الف. پارچهٔ سیمی wire cloth
ب. توری فلزی برای Industrial heavy screen
ج.شبکهٔ expanded metal
د. شبکهٔ chainlink fencing
ه. شبکهٔ ساخته شده از پلی اورتان
و.شبکهٔسوراخ‌شده perforated

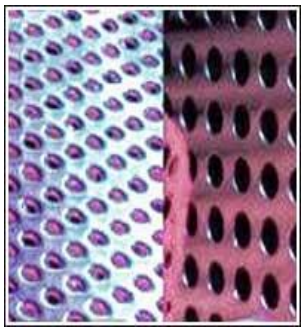
الف



ب

ج

د



و

## 12-3- موارد استفاده غربالها

به طور کلی از غربالها بیشتر در صنایع معدنی استفاده می‌شود. برخی از کاربردهای غربال در زیر آمده است.

- برای جلوگیری از ورود قطعات درشت‌تر از حد به دستگاه‌ها و واحدهای عملیاتی.
- برای جلوگیری از ورود قطعات کوچکتر از حد به دستگاه‌ها. این کار برای افزایش ظرفیت و نیز گاهی جهت حفاظت از دستگاه‌ها صورت می گیرد.
- برای جلوگیری از ورود قسمت دانه درشت مواد از یک مرحله خردکن به مرحله بعدی خردکن.
-تهیه محصول با دانه‌بندی محدود.

## 12-4- انواع غربالها

انواع گوناگونی از غربالهای صنعتی برای منظورهای مختلف موجود است. در این قسمت به دسته‌بندی غربالها و آشنایی با انواع مهم آن‌ها می‌پردازیم.

در اکثر غربالها، ذرات بر اثر نیروی جاذبه زمین از یک‌سری منافذ عبور می‌کنند و در نتیجه دسته بندی می‌شوند. در برخی از طراحی‌ها، ذرات به وسیله برس یا بر اثر نیروی گریز از مرکز به درون الک رانده می‌شوند.

به‌طور کلی ذرات درشت به راحتی از منافذ بزرگ در یک سطح پایین می‌روند، اما برای ذرات ریز سطح غربال بایستی نوعی همزن داشته باشد تا همهٔ ذرات بتوانند خود را به سطح غربال برسانند. در صنعت جهت همزدن از روش‌هایی مثل تکان‌دادن، دوران‌دادن یا اتعاش به طریق مکانیکی یا الکتریکی استفاده می‌شود. به طور کلی غربالهای صنعتی دو نوع کلی دارند:

الف- غربالهای ساکن

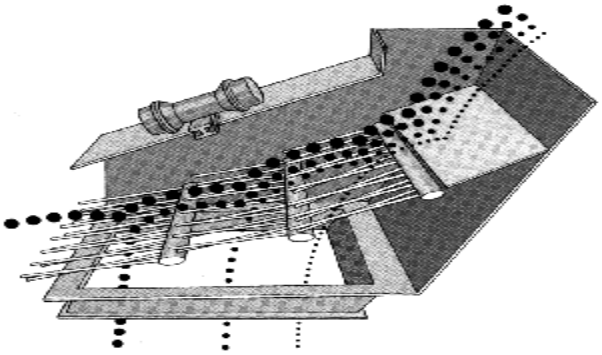
ب- غربالهای متحرک

### 12-4-1- غربالهای ساکن

در این نوع سرند، خودِ سرند ساکن است ولی با استفاده از یک شیب مناسب یا در اثر نیروی کمکی مثل حرکت خود مواد روی سرند، مواد منتقل می‌شوند. انواع زیر در این دسته طبقه‌بندی می‌شوند:

#### 12-4-1-1- غربال گریزلی (Grizzly)

این غربال یکی از مهمترین غربالهای مورد استفاده در صنعت می‌باشد. غربال گریزلی از یک سری میله‌های فلزیِ موازی تشکیل شده است که درون یک قاب ساکن مایل قرار دارند.



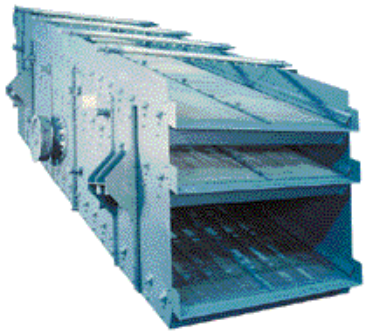
شکل 12-2- نمایی از یک غربال گریزلی. همانطور که در شکل دیده می‌شود ، مواد با دانه بندی‌های مختلف پس از عبور از یک سری غربال گریزلی به ترتیب دسته بندی می‌شوند.

شیبِ مسیر مواد معمولاً موازی با طول میله‌ها است. خوراک با دانه‌های درشت مثل خوراک یک خردکنِ اولیه روی انتهای فوقانی شبکه قرار می‌گیرد. قطعات درشت غلتیده و از محل تخلیه مواد درشت دانه خارج می‌شوند، قطعات کوچک از یک جمع‌کننده پایین می‌روند. هرچه شیب زیادتر باشد ظرفیت بالا می‌رود اما

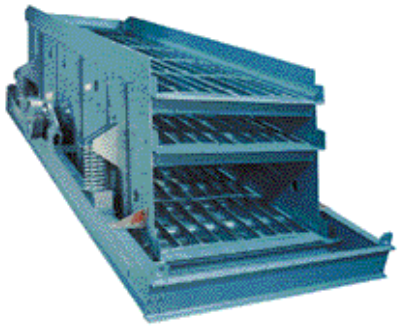
فرصت جداسازی کم می‌شود. امروزه به علت سادگی و قیمت پایین از این نوع غربال با طراحی‌های متنوع استفاده می‌شود. این غربال می‌تواند لرزش نیز داشته باشد که در بخش غربال‌های متحرک بیشتر توضیح داده می‌شود.

جنس میله‌ها معمولاً فولاد منگنز دار می‌باشد که مقاوم در مقابل ساینده‌گی است در نظر می‌گیرند. از این سرند برای جداسازی‌های ابعاد بزرگ مواد ورودی به دستگاه‌ها استفاده می‌شود. ابعاد مدار حدود mm200 تا mm300 می‌باشد و ظرفیت می‌تواند 1000 $ton/m^2.hr$ باشد.

الف



ب



ج

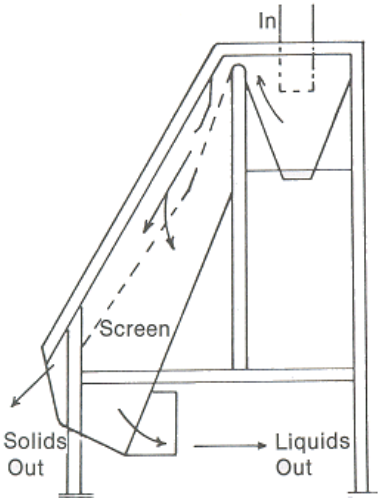
شکل 12-3- غربال گریزلی
الف و ب. غربال گریزلی چند طبقه جهت دانه بندی بیشتر. ج. این غربال می‌تواند لرزش نیز داشته باشد

### 12-4-2-1- غربال ساکن شیبدار

در صنعت از این سرند بیشتر برای طبقه‌بندی مواد به طریقه تر مورد استفاده می‌شود. حد پایین ذرات تا 50 میکرومتر می‌تواند باشد. سطح مقطع این سرند به شکل شیبدار یا قوسی شکل بوده و شبکه‌ای شکل می‌باشد که حجمی حدود 180 $m^3/m^2.hr$ را می‌تواند از خود عبور دهد.

## 12-4-2- غربال‌های متحرک

در این ندستگاهها، همانطور که از نامشان پیداست، بوسیله حرکت سرند عمل غربال کردن صورت می‌گیرد. در ادامه برخی از این غربالها توضیح داده می‌شوند.



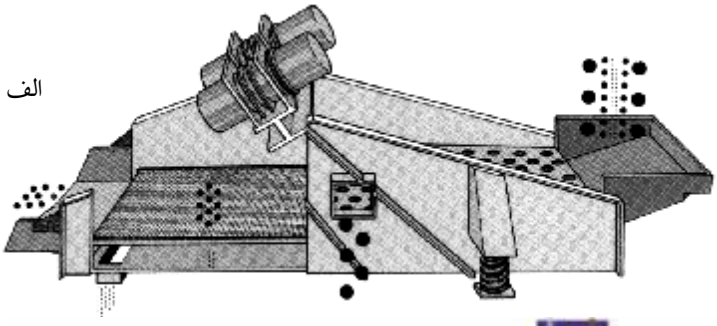

شکل 12-4- غربال ساکن شیبدار

### 12-4-2-1- غربال نوسانی(Vibrating Screen)

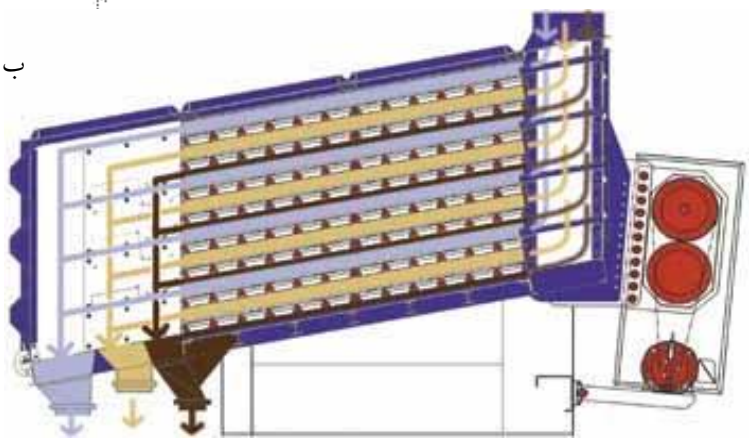
این نوع سرند به سرند رفت و برگشتی reciprocating نیز معروف می‌باشد. در یک طرف این نوع سرند یک وسیله مکانیکی قرار دارد که با ایجاد ارتعاش باعث انتقال و غربال شدن خوراک ورودی می‌شود. این سرند شامل یک صفحه می‌شود که با شیب ملایمی از یک طرف به ارتعاش‌کننده متصل است. هرچه ارتعاش سریعتر و دامنه کوچکتر باشد غربال کمتر کور می‌شود.

کاربرد این غربال در صنعت بسیارگسترده است و در ظرفیت‌های کم و نیز ظرفیت‌های زیاد بسیار خوب عمل می‌کند.

الف



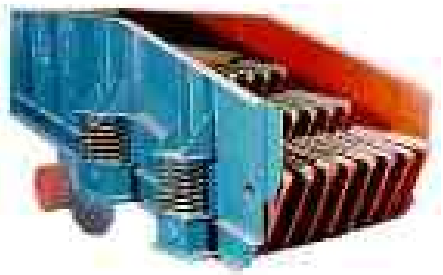
ب



شکل 12-5- غربال ارتعاشی
الف. مواد درشت‌تر از بالای شبکهٔ غربال بیرون می‌ریزند و مواد ریز دانه از زیرِشبکه و از قسمت جلو.
ب. نوعی غربال ارتعاشی با ظرفیت بالا. به شبکه‌های موازی دقت کنید.
ج ، د ، ه . تصاویری از غربال‌های ارتعاشی صنعتی.
و، ز. دو نوع غربال گریزلیِ ارتعاشی.
ح. غربال ارتعاشی جهت جداسازی به طریقهٔ تر.

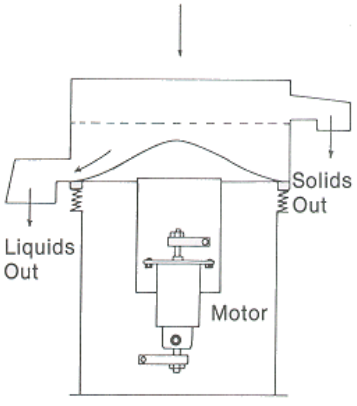
د

ج

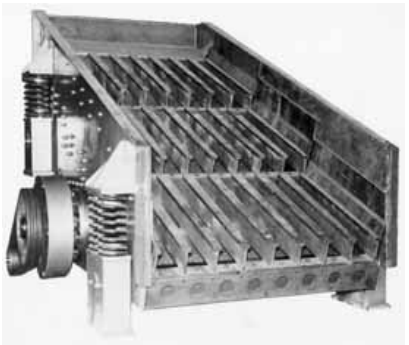


و

ه



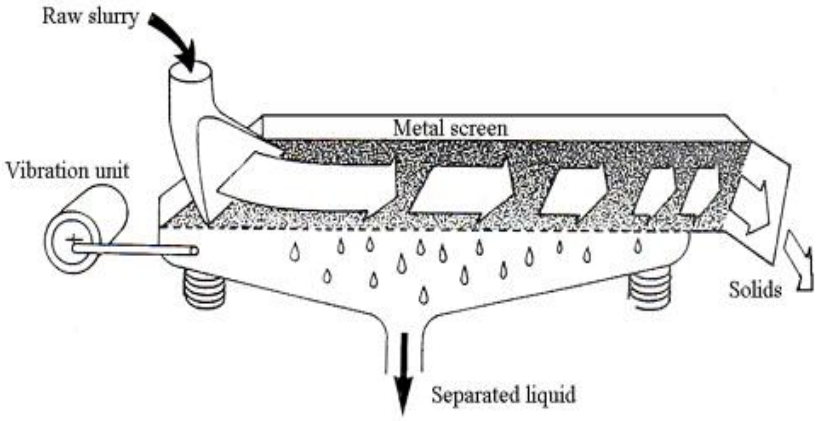

ح



ز

به علت بازدهٔ بالای عملیات غربال کردن به طریقهٔ ارتعاشی امروزه طراحی‌های متنوعی در این زمینه صورت گرفته است. بعنوان مثال روی غربال گریزلی (شکل 12-5- و، ز) موتور ارتعاشی گذاشته‌اند تا عملیات غربال کردن سریعتر و بهتر صورت گیرد. شکل 12-5- ح چگونگی جداسازی دانه‌ها به روشِ تر نشان داده شده

است. در این روش مواد جامد به همراه مایع از بالا وارد یک ظرف استوانه‌ای می‌شوند. از پایین ظرف یک موتور، عمل ارتعاش را انجام می‌دهد. مواد جامدریز به همراه مایع از شبکهٔ غربال که پایین خروجی جامد قرار



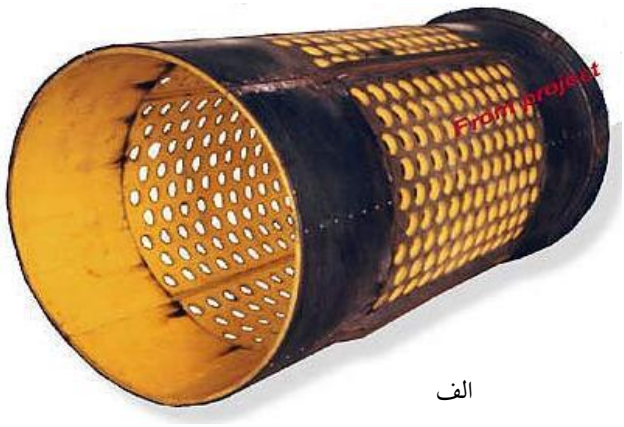

شکل 12-6- نمایی از یک غربال ارتعاشی که به روش تر عمل می‌کند

دارد عبور می‌کنند و از کف ظرف خارج می‌شوند. مواد جامد درشت دانه از بالای شبکهٔ غربال و از خروجی مربوطه خارج می‌گردند.

در این نوع غربال برای جلوگیری از کور شدن چشمه‌ها از یک‌سری گلوله که در زیر شبکهٔ سرند قرار می‌گیرند و به تناوب به چشمه‌ها ضربه وارد می‌کنند، استفاده می‌شود. در این نوع غربال محدوده جدایش ذرات بین 10mm تا 250 μ می‌باشد.

شکل 12-7- تصویری از چگونگی
قرارگرفتن گلوله‌ها در زیر شبکهٔ غربال.

شکل 12-8- غربال گردان (Trommel)
الف . شبکهٔ یک غربال گردان از جنس پلی اورتان . ب. تصویر یک غربال گردان . ج . تصویری از چگونگی جداسازی مواد. د ، ه . تصاویری از درون و بیرون سرند گردان.

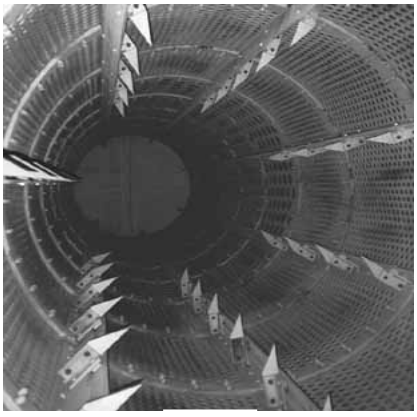


الف

ب

ج

د



### 12-2-4-2- غربال گردان (Trommel screen)

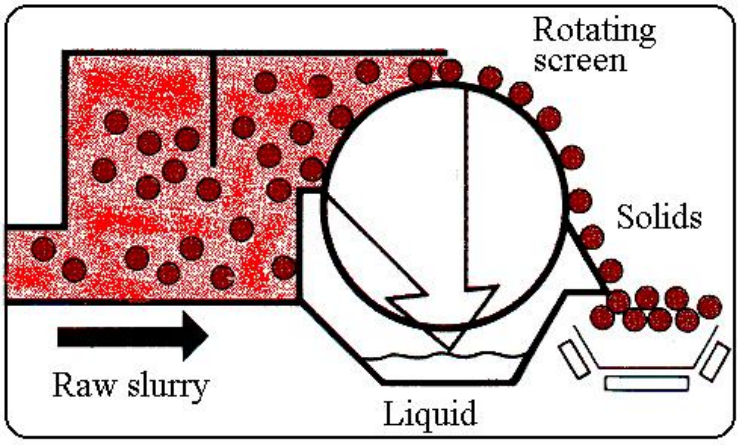
این سرند از غربالهای متداول می‌باشد و برای جداسازی مواد در محدوده mm6 تا mm55 استفاده می‌شود. روش جداسازی هم به طور تر و هم خشک امکان‌پذیر می‌باشد. Trommel در زبان آلمانی به معنای گردان می‌باشد.

این غربال یک استوانه با جداره مشبک شیبدار می‌باشد. از یک طرف مواد ورودی وارد و از طرف دیگر دانه‌های درشت خارج می‌شوند و دانه‌های ریز از جداره غربال بیرون می‌روند. از مزایای این غربال ساده بودن، با دوام بودن و قابلیت بار زیاد می‌باشد و عیب مهم این دستگاه گیر کردن مواد در چشمه‌ها و سوراخها می‌باشد.

### 12-2-4-3- سرند دورانی (Rotating)

در این غربال می‌توان چند شبکهٔ غربال را به طور طبقاتی روی هم قرار داد. شبکه غربال در یک محفظه قرار دارد و انعطاف‌پذیر می‌باشد تا بتواند مانند نقاله حول یک محور دوران کند. شیب این سرند بین $16^{o}$ تا $30^{o}$ می‌باشد. مواد از یک طرف روی غربال می‌ریزد و مواد دانه درشت از طرف دیگر خارج می‌شود و مواد ریزتر از شبکهٔ غربال عبور می‌کند و از آن‌سوی شبکه خارج می‌شوند. شکل عمومی این دستگاه شبیه غربال ارتعاشی است و تنها تفاوت آن با سرند ارتعاشی وجود میل‌لنگ و محور به جای موتورارتعاشی می‌باشد. کاربرد این غربال در صنعت زیاد نمی‌باشد.

نوع خاصی از این غربال(شکل 12-9) برای عملیات غربال کردن به روش تر استفاده می‌شود. در این حالت ابتدا مواد دوغابی را وارد یک محفظه می‌کنند. سوی دیگر محفظه یک غربال دورانی وجود دارد که از یک طرف به دوغاب و از طرف دیگر به خارج منتهی می‌شود. با گردش غربال مواد جامد روی شبکه قرار می‌گیرند. در این حالت مواد دانه درشت از شبکه عبور نمی‌کند و به خارج هدایت می‌شود. اما مایعات به همراه مواد ریزاز شبکه عبور کرده و از سوی دیگر خارج می‌گردند. دقت شود که این نوع غربال تنها برای مواد دانه درشت استفاده می‌شود و در غیر این‌صورت اگر مواد دانه ریز باشند باید از فیلتر استفاده نمود.




شکل 12-10- نمایی از یک غربال دورانی برای جداسازی به روش تر.

## 12-5- مشکلات غربال‌ها

- یکی از مهمترین مشکلات عمده غربالها مسدود شدن چشمه‌اهای غربالها با دانه‌های مواد می‌باشد که این پدیده را کور شدن غربال گویند. به خصوص وقتی با ذراتی به شکل کشیده و میله‌ای شکل و یا چسبناک سروکار داریم این پدیده بیشتر اتفاق می‌افتد. برخی راههای مقابله با این پدیده در خلال توضیحات انواع سرندها گفته شد. مثل قرار دادن گلوله‌هایی در زیر شبکه غربال.
- نوع سطح مورد استفاده بستگی به نوع بار اولیه و حد جداسازی دارد.
- برای لایه‌بندی مناسب روی سطح سرند، ضخامت مواد روی سرند نباید از حدی بیشتر باشد.
- دقیق‌ترین جداسازی، با ذرات کروی روی الکهای آزمایشی استاندارد حاصل می‌شود. اما در مورد ذرات فیبری‌شکل و سوزنی برخی ذرات با سر به راحتی از سطح سرند عبور می‌کنند در حالیکه برخی دیگر که با پهلو برخورد می‌کنند از سطح سرند عبور نخواهند کرد.

به طور کلی شرکت‌های سازنده میزان ایده‌آل بودن و نحوهٔ توزیع مواد را در منحنی‌هایی ارائه داده‌اند و هنگام طراحی و انتخاب غربال می‌توان از آنها به خوبی برای انتخاب نوع غربال کمک گرفت.

فصل سیزدهم

# جوش آورها
# Boilers

## 13-1- شرح وتوصیف

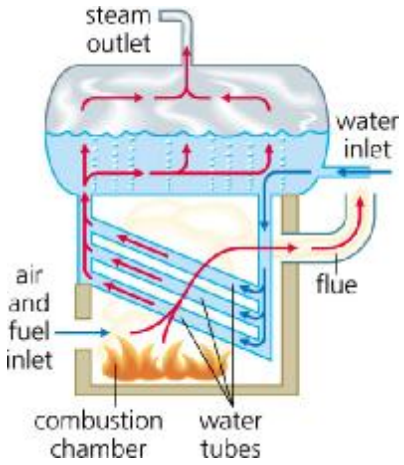
جوش‌آور محفظه‌ای است که با تغذیه آب به درون آن به کمک یک منبع گرمایی به طور پیوسته بخار تولید می‌کند. در طرحهای اولیه جوش‌آور پوسته‌ای ساده با یک لوله تغذیه و یک خروجی بخار بودکه روی آن با آجر پوشیده می‌شد. سوخت در داخل پوشش دیگ سوزانده می‌شد، سپس جوش‌آورهایی طراحی شد که در آن آب از درون لوله‌ها و آتش از بیرون آن عبور می‌کرد. امروزه اجزای اصلی جوش‌آور را می‌توان به صورت زیر نام برد:

1-دیگ بخار (Steam Drum): ظرف استوانه‌ای بزرگی است که به طور افقی کارگذاشته می‌شود. درون نوع تکامل یافته آن تعداد زیادی جدا کننده آب وبخار (Separator) وجود دارد.

2-کوره(furnace): محفظه ای است که نفت کوره یا گاز طبیعی در آن می‌سوزد.

3-مشعل(Burner): وسیله‌ای است که برای سوزاندن نفت کوره ویا گاز طبیعی در مجاورت هوا در محفظه احتراق بکار می‌رود.

عموماً جوش‌آور را بویلر یا دیگ بخار نیز می‌نامند. ما در این متن از لفظ جوش‌آور استفاده می‌کنیم.




شکل 13-1- نمای کلی یک جوش‌آور

آبی که قرار است در جوش‌آور بخار شود قبلا تحت عمل هوازدایی توسط هیدرازین یا سایر مواد شیمیایی قرار می‌گیرد. زیرا اگر حبابهای هوا در این آب وجود داشته باشد حجم مفید آن کاهش می‌یابد و نتیجتاً دارای کاهش تبادل حرارت هستیم علاوه بر این امکان خوردگی در سیستم افزایش پیدا می‌کند. عملیات دیگری که قبل از ورود آب به جوش‌آور بر روی آن انجام می‌شود پیش‌گرم کردن آن است. این کار برای بالا بردن راندمان سیستم انجام می‌شود و به این ترتیب است که آب قبل از ورود به جوش‌آور وارد محفظه‌ای به نام اکونومایزر(Economizer) می‌شود. اکونومایزر در واقع مبدل پوسته و لوله‌ای است که توسط دود خروجی از

کوره آب را گرم می‌کند. به این صورت که دود قبل از ورود به دودکش از اکونومایزر گذشته و سیال را گرم می‌کند سپس از طریق دودکش به محیط فرستاده می‌شود.

## 13-2- تقسیم بندی جوش آورها

جوش‌آورها را می‌توان از دیدگاههای مختلف تقسیم بندی نمود. چند نوع از این تقسیم‌بندی‌ها به طور خلاصه در زیرآورده شده است. نحوه کار بعضی از انواع رایج این جوش‌آورها در صفحات بعد توضیح داده خواهد شد.

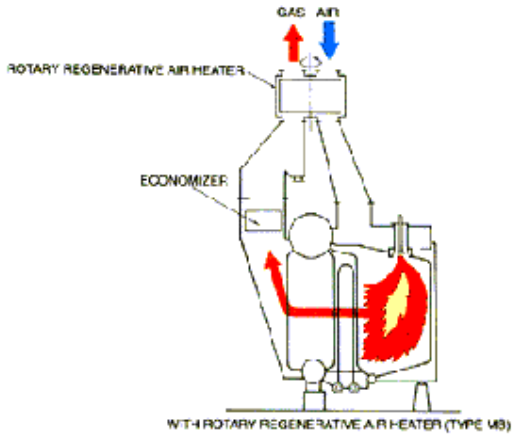
1-تقسیم بندی بر اساس جهت محور پوسته(عمودی یا افقی)

2- تقسیم بندی بر اساس نحوه استفاده از آن(ثابت یا قابل حمل)

3- تقسیم بندی بر اساس وضعیت کوره

4- تقسیم بندی بر اساس وضعیت نسبی آب و گازهای داغ(Water tube & Fire tube)

به جوش‌آورهایی که آب داخل لوله جریان داشته باشد لوله آبی(Water tube)گفته می‌شود. دسته دیگر که گازهای داغ داخل لوله جریان دارد به جوش آورهای لوله دودی (Fire tube) معروف می‌باشند. به علت اینکه این جوش آورها متداول می باشند درباره آنها بیشتر به بحث می پردازیم.




شکل 13-2- نحوه حرکت آب، بخار وهوا در یک جوش‌آور

### 13-2-1- جوش‌آورهای Fire tube

این جوش‌آورها از سه قسمت دیگ بخار، کوره و مشعل تشکیل شده‌اند. ساختمان آن بدین صورت است که دیگ بخار آن به صورت یک دستگاه مبدل حرارتی پوسته و لوله است. این جوش‌آور بیشتر در جاهایی کار گذاشته می‌شود که بخواهند از هدر رفتن گرمای حاصل از یک فعل و انفعال جلوگیری کنند(مثل گرمای حاصل از سوزاندن گوگرد و اکسیژن برای تهیه اسید سولفوریک).

در این نوع جوش‌آورها گازهای گرم از درون لوله‌های دیگ بخار می‌گذرند و ضمن تبادل حرارت با آب داخل پوسته، آب را به بخار تبدیل می‌کنند. در یک نوع از جوش‌آورهای Fire tube،دیگ عمودی

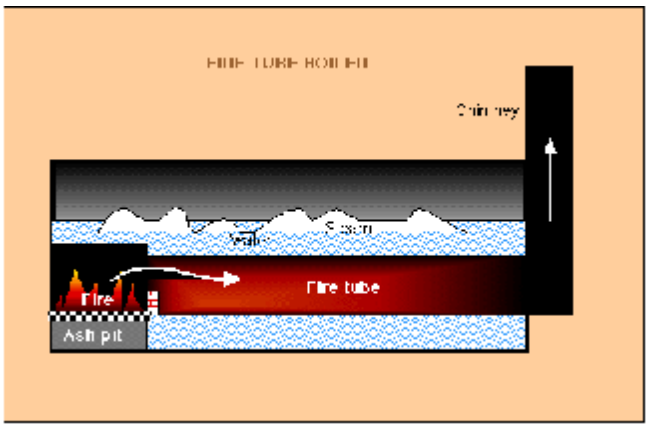
بالا خشک است. این جوش‌آور شامل یک پوسته استوانه‌ای عمودی حاوی یک آتشدان استوانه‌ای و تعدادی لوله‌های دودی کوچک است. گرمای ناشی از عبور آتش از ورقه‌های آتشدان به آب درون دیگ از طریق تابش انتقال می یابد. گازهای داغ به سمت بالا و از میان لوله‌های دود به دودکش می‌روند و در این میان قسمتی از گرمای خود را به فلز لوله‌ها می‌دهند که سبب انتقال گرما به آب درون دیگ می شود. فشار این نوع جوش‌آورها به ندرت از 200 psi تجاوز می کند.

### 13-2-1-1- مزایای جوش آورهای فایر تیوب

هزینه ساخت جوش‌آورهای فایرتیوب کمتر از سایر انواع جوش‌آورها است، علاوه بر این، جوش‌آورهای فایرتیوب با داشتن سطح حرارتی مساوی آب بیشتری نسبت به سایر جوش‌آورها در دیگ بخار خواهند داشت. از این مولدها معمولا برای تولید حجم کم بخار استفاده می‌شود.

### 13-2-1-2- معایب جوش آورهای فایرتیوب

قسمتهای مختلف جوش‌آورهای فایرتیوب برای تمیزکاری، بازرسی وتعمیرات کمتر قابل دسترس است. ظرفیت این نوع جوش‌آورها با بالا رفتن فشار و دمای مورد نیاز محدودیت پیدا می‌کند و به ضخامت جداره بیشتری احتیاج دارد در نتیجه با کم و زیاد شدن تقاضای بخار کمتر هماهنگ می‌شود، همچنین به دلیل اینکه تغییرات درجه حرارت ایجاد تنش‌های زیادی در اجزای جوش‌آور می‌نماید احتمال انفجار در این نوع جـــوش‌آورها از سایر انواع بیشتر است، لذا ضریب اطمینان کمتری دارند.




شکل 13-3- نمونه یک جوش آور فایر تیوب

## 13-2-2- جوش‌آورهای Water tube

جوش‌آورهای Water tube نیز از دیگ بخار، کوره و مشعل تشکیل شده‌اند لکن از دیگ بخار ( Steam Drum) آن لوله‌های زیادی منشعب شده و به دیگ ته‌نشین‌کننده (Mud Drum) وصل می‌شود وضع انشعاب لوله‌ها و قرارگرفتن آنها در کوره به نحوی است که:

-لوله‌هایی که دورتر از آتش کوره قرار دارند آب را از دیگ بخار به دیگ ته‌نشین‌کننده می‌برند، این لوله‌ها را پایین‌بر(Downcomer) می‌گویند.

-لوله‌هایی که در مجاورت شعله آتش قرار دارند مخلوط آب و بخار آب را به دیگ بخار می‌برند این لوله ها را بالا بر(Riser) می‌نامند.

بر حسب شرایط مختلف جوش‌آورهای واترتیوب را با یک، دو یا بدون دیگ ته‌نشین‌کننده می‌سازند. سیستم گردش آب در جوش‌آورهای واتر تیوب می‌تواند به صورتهای زیر باشد:

-سیستم گردش طبیعی آب(Natural Circulation) : می‌دانیم سیال با جرم کمتر همواره بالای سیال با جرم حجمی بیشتر قرار می‌گیرد، این پدیده مبنایی در طراحی سیستم گردش آب جوش‌آورها است. بر این مبنا اغلب لوله‌های انتقال آب و بخار، عمود بر سطح افق نصب می شوند و معمولا یک مخزن جداکننده آب و بخار در بالای جوش‌آور قرار داده می‌شود.آب توسط لوله‌های پایین‌بر به پایین جوش‌آور منتقل و توسط لوله‌هایی به نام هدر(Header) در لوله‌های اصلی توزیع می‌شود. همزمان آب،گرم شده، جرم حجمی آن کمتر شده و به بالا هدایت می شود. بنابراین سرعت لازم در جریان آب بر اساس وزن ستون آب (موجود در لوله های پایین بر) و تفاوت جرم حجمی در لوله های اصلی حاصل می‌گردد.

-گردش اجباری کنترل شده(Controlled Forced Circulation) : در سیستمهایی که اثر وزن آب در لوله‌های پایین‌بر نتواند به تنهایی ایجاد جریان لازم را نماید از یک پمپ کمکی هنگام راه‌اندازی استفاده می‌شود.

-سیستم گردش اجباری (Forced Circulation): در این سیستم علاوه بر استفاده از اصول گردش طبیعی آب برای به دست آوردن دبی‌های جرمی بالاتر از پمپ استفاده می کنند.

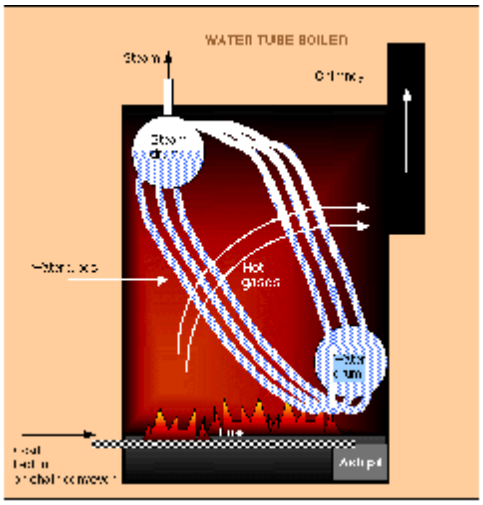
ساخت وجوه کوره وکانالهای در معرض شعله و دود از جنس نسوز وبا ورقه فلزی، حجم کانال وکوره را زیاد کرده و سطح تبادل حرارتی را کم کرده و نیز خوردگی در آن زیاد است، با توجه به این مسایل، محلهای در تماس با شعله و دود را از لوله‌هایی که آب در آنها جریان دارد می‌سازند. جریان آب از بالا رفتن دمای فلز و جداره لوله‌ها جلوگیری می‌کند. در نتیجه از خوردگی سریع آنها جلوگیری می‌کند.

شکل 13-5- دیواره جوش آور ،لوله های در معرض شعله

بر اساس شکل لوله‌ها و دیواره‌ها می‌توان این جوش‌آورها را به صورت زیر تقسیم بندی نمود:

1-جوش‌آورهای با لوله‌های مستقیم (Straight Tube Boilers): در این سیستم تنها از یک دسته لوله‌های مستقیم برای گرم کردن آب استفاده می‌شود که یک صفحه تغذیه‌کننده را به یک صفحه جمع‌کننده وصل می‌کنند. صفحات تغذیه‌کننده و جمع‌کننده توسط لوله‌هایی به مخزن جداکننده آب و بخار متصل می شوند.

2- جوش‌آورهای با لوله‌های خمیده (Bent Tube Boilers): در این سیستم با دادن خمهایی به لوله‌ها و قرار دادن آنها به نحو مناسب شکل اتاق احتراق و قسمتی از کانال دود را ایجاد می‌کنند، همچنین در مسیر عبور گازهای داغ و دود دسته‌هایی از لوله‌های خم شده که به صورت کویل در آمده‌اند قرار داده می‌شوند. این سیستم در بیشتر جوش‌آورها مورد استفاده واقع می‌شود. استقرار لوله‌ها در جداره باعث افزایش سطح تبادل حرارتی می‌شود.




شکل4-نمونه یک جوش آور واتر تیوب

### 13-2-2-1- مزایا و معایب جوش‌آورهای واترتیوب

جوش‌آورهای واترتیوب از لحاظ ایمنی مطمئن‌ترهستند. زیرا آب در واحد کوچکتری یعنی در لوله‌ها است. کلیه قسمتهای یک جوش‌آور واترتیوب جهت تمیزکاری، بازرسی و تعمیرات قابل دسترس است. جوش‌آورهای واترتیوب به دلیل بزرگی سطح تبادل حرارتی و طولانی بودن مسیرعبورگاز و سرعت چرخش آب سریعتر بخار تولید می‌کنند، به همین دلیل آنها را می‌توان تحت بار بسیار بیشتری نسبت به سایرین قرار داد. این جوش‌آورها با تغییرات ناگهانی وکم و زیاد شدنهای بخار سریعتر هماهنگ می شوند. با وجود مزایای ذکر شده این جوش‌آورها نسبتاً گران هستند لذا در طرحهای کوچک معمولاً از جوش‌آورهای فایر تیوب استفاده می‌شود.

## 13-3- کنترل وکاربرد جوش آورها

ابتدا به بررسی تامین هوای مورد نیاز سوخت در کوره‌ها می‌پردازیم، که این به دو روش متفاوت صورت می‌گیرد:

1- روش استفاده از دمنده Forced Draft Fan

2- روش استفاده از مکنده Induced Draft Fan

در کوره‌هایی که از دمنده استفاده می‌شود باید ساختمان کوره به نحوی باشد که گازهای گرم و شعله‌های حاصل از احتراق نتواند به بیرون راه پیدا کند، زیرا فشار کوره کمی بیشتر از فشار جو است. مکنده را درکوره‌هایی به کار می‌برند که حجم کوره و تعداد مشعلهای آن زیاد باشد. زیرا با بودن مکنده در کوره، خلا ایجاد می‌شود و هوا می‌تواند از محلهای معینی وارد کوره گردد. از امتیازات کوره‌هایی که با دمنده کار می‌کنند این است که به علت وجود خلا در کوره شعله و گازهای گرم به خارج راه پیدا نمی کند.

در مورد کنترل جوش‌آورها باید به نکات زیر توجه نمود:

1- ارتفاع مایع در دیگ بخار یکی از مهمترین چیزهایی است که باید به خوبی در هر جوش‌آوری کنترل گردد. زیرا اگر سطح مایع کم باشد با افزایش تولید امکان، اینکه تمام آب بخار شود زیاد است. در چنین وضعی ممکن است که قسمتهایی از دیگ بخار ذوب شود. از طرف دیگر اگر ارتفاع مایع زیاد باشد تولید بخار کاهش می یابد.

2- مقدار سوخت نیز باید به خوبی کنترل گردد.چرا که اگر سوخت کم شود تولید بخار پایین آمده و روند را به هم می زند. اگر سوخت زیاد باشد باعث ازدیاد تولید بخار می‌شود که این خود به کم کردن آب دیگ بخار کمک می‌کند.

3-هوا جهت احتراق باید کاملا کنترل شود، زیرا کمبود هوا باعث سوختن ناقص هوا و یا نفت کوره می‌گردد و بالعکس ازدیاد هوا ممکن است باعث خاموش شدن شعله مشعلها گردد.

4-کنترل مواد شیمیایی جهت پیشگیری از خورندگی نیزاز نکات مهم است که باید به آن توجه شود.

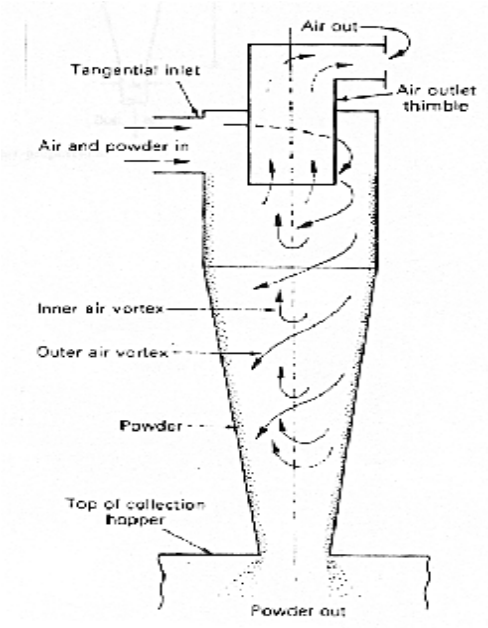
فصل چهاردهم

# جدا کننده‌هـای سیکلونی
# Cyclones

## 14-1- شرح و توصیف

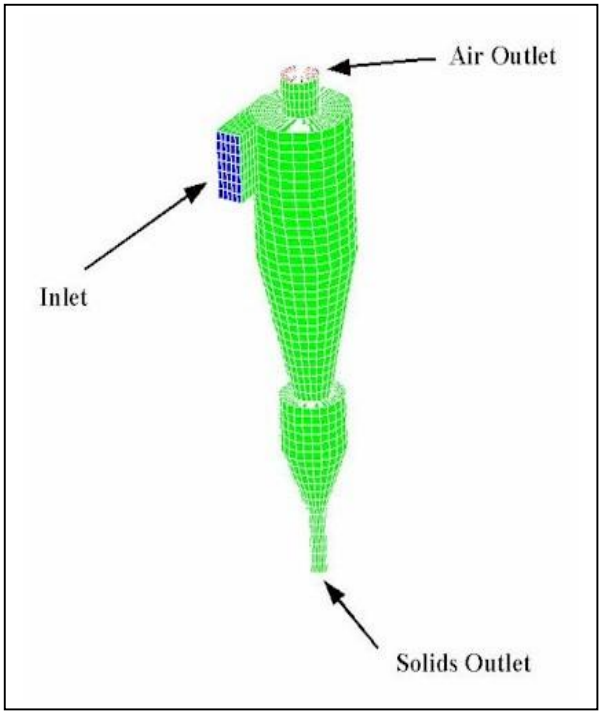
یکی از وسایلی که در جداسازی ذرات جامد از فاز گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیکلون‌ها هستند. در این دستگاه‌ها جریان گاز همراه با ذرات ریز جامد وارد یک محفظه استوانه‌ای یا مخروطی شکل می‌شود.

با توجه به دیواره استوانه‌ای سیکلون، جریان مواد با یک حرکت گردباد مانند به سمت پایین سیکلون حرکت می‌کند. با توجه به اینکه نیروی اینرسی وارد شده بر ذرات جامد، از نیروی اینرسی وارد شده بر فاز گاز بیشتر است، این ذرات مماس بر دیواره ظرف به سمت پایین محفظه هدایت می‌شوند. در قسمت پایین محفظه نیز فضایی برای جمع شدن این ذرات جامد تعبیه شده است که به صورت ناپیوسته یا پیوسته این ذرات از محفظه خارج می‌شوند این مورد در شکل 14-1 مشاهده می‌شود.




شکل 14-1- مسیر حرکت مواد در سیکلون

اساس جداسازی این ذرات از توده جریان گاز به این صورت است که نیروی اینرسی وارد شده بر ذرات جامد در سیکلون‌ها، چندین برابر نیروی اینرسی وارد شده بر فاز گاز می‌باشد و لذا این ذرات از کناره‌های محفظه سیکلون به پایین محفظه هدایت می‌شوند. ولی فاز گاز تحت تاثیر نیروی کمتری قرار می‌گیرد و از نقاط فوقانی ذرات جامد، به سمت پایین محفظه می‌رود. در قسمت مرکزی سیکلونها، معمولاً از یک استوانه نسبتاً قطور برای خروج گاز استفاده می‌شود. این لوله در وسط سیکلون تعبیه شده و از ذرات جامد که در اثر نیروی اینرسی وارد شده، در کناره‌های سیکلون قرار دارند فاصله دارد. به این ترتیب اکثر ذرات جامد ورودی از جریان گاز جدا می‌شوند.

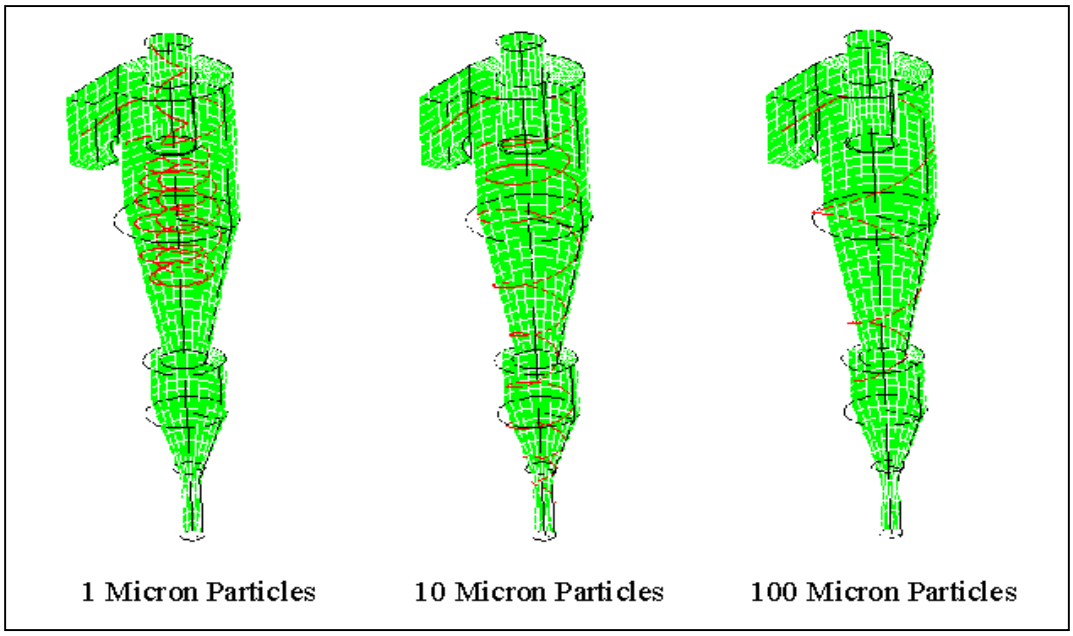



شکل 14-2- سه جریان اصلی ورودی و خروجیکه در اکثر سیکلونها مشاهده می‌شود

یک سیکلون در حقیقت یک محفظه ته‌نشین سازی است که شتاب جاذبه با شتاب سانتریفوژی جایگزین شده است. مقدار نسبت شتاب سانتریفوژی به شتاب جاذبه، بستگی به قطر سیکلون دارد. برای سیکلونهای استوانه‌ای با قطرهای خیلی بزرگ شتاب سانتریفوژ در حدود 5 برابر شتاب جاذبه است و در مورد سیکلونهای استوانه‌ای با قطر کوچک شتاب سانتریفوژی در حدود 2000 برابر بزرگتر از شتاب جاذبه می‌باشد. نیروی وارد شده بر ذرات بزرگتر مقدار بیشتری می‌باشد و لذا ذرات بزرگتر با چرخش کمتری در سیکلون به پایین سیکلون می‌رسند. این مورد در شکل 14-3 مشاهده می‌شود.

## 14-2- انواع سیکلونها

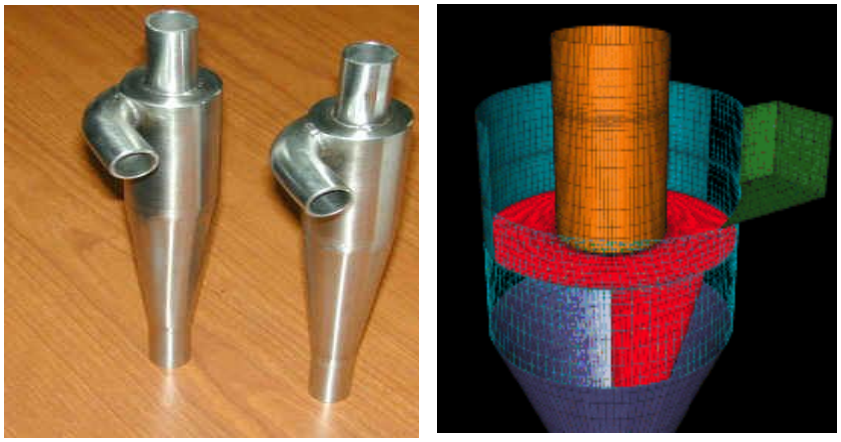
سیکلون‌ها را می‌توان از دیدگاه‌های مختلفی مورد تقسیم‌بندی قرار داد. در این قسمت ابتدا پس از بحث روی موارد شاخص سیکلونها که سیکلونها را با آن دسته‌بندی می‌کنند به چند نوع مهم از سیکلونها پرداخته می‌شود. یکی از این موارد مقطع ورودی به سیکلونها است. مقطع ورودی به سیکلونها معمولاً به شکل مستطیل یا دایره ساخته می‌شود.در بعضی موارد نیز با توجه به نوع فرآیند، از سیکلونهایی با مقطع ورودی بیضی شکل نیز استفاده می‌شود. در شکل 14-4، دو نوع از سطح مقطع ورودی سیکلونها نشان داده شده است.



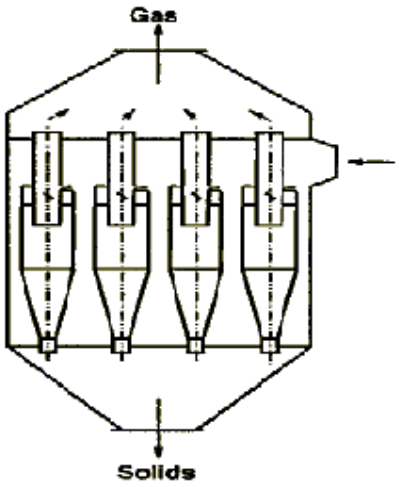

شکل 14- 3- چگونگی حرکت ذرات با قطرهای مختلف در سیکلونها

هرچه مقطع ورودی سیکلونهاکوچکتر باشد، ذرات ریز ساده‌تر می‌توانند از جریان گاز جدا شوند. اما با این کار ظرفیت سیکلونها کاهش می‌یابد. در چنین مواردی که نیاز است ذرات ریز از جریان گاز جدا شوند باید از تعداد زیادی سیکلون که به صورت موازی در داخل یک Box قرار گرفته‌اند استفاده شود. با این کار ظرفیت عملیاتی سیکلونها که به واسطه کاهش سطح مقطع ورودی سیکلون، کاهش یافته است، افزایش می‌یابد. این مورد در شکل 14-5 نشان داده شده‌است.

در مورد سیکلونهای موازی باید به تعداد این سیکلونها، راندمان جداسازی، هزینه ساخت، هزینه عملیاتی و مقایسه این سیکلونها با سایر وسایل جداکننده گاز-جامد توجه کرد. زیرا در بعضی از موارد استفاده از Multi Cyclone ها مقرون به صرفه نمی‌باشد.



شکل 14-4- انواع سطح مقطع ورودی سیکلونها




شکل 14-5- چند سیکلون که به صورت موازی در یک جعبه قرار گرفته‌اند

تا به حال سیکلونها را ار نظر مقطع ورودی جریان گاز و جامد به داخل محفظه سیکلون و از نظر اینکه به تنهایی کار می‌کنند و یا در یک Box دیگر به صورت Multi Cyclone کار می‌کنند بررسی نمودیم. سیکلونها را از نظر چگونگی قرار گرفتن Blower یا کمپرسور (یا به طور کلی، دمنده) نسبت به سیکلون نیز به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند.

1-سیستمهایی که دمنده قبل از سیکلون قرار دارد.

2- سیستمهایی که دمنده بعد از سیکلون قرار دارد.

شکل 14-5- در این شکل، دمنده بعد از سیکلون قرار گرفته است

همانطور که می‌دانیم، حرکت مواد در داخل سیکلون با افت فشار همراه می‌باشد. این افت فشار معمولاً توسط یک کمپرسور یا Blower تامین می‌شود. نحوه قرار گرفتن این دمنده به ویژگیهای فاز گاز و جامد در جریان ورودی به سیکلون بستگی دارد. مثلاً در حالتیکه ذرات ورودی در جریان گاز روی پره‌های دمنده اثر منفی داشته باشند، باعث تخریب پره‌های دمنده می‌شوند. به این ترتیب در این موارد سیکلون را قبل از دمنده قرار می‌دهند تا ذرات جامد در سیکلون از فاز گاز خارج شوند و به پره‌های Blower برخورد نکنند. لازم به ذکر است که در این مورد، Blower کار مکش فاز گاز را از داخل سیکلون به بیرون انجام می‌دهد. لازم به ذکر است که در اکثر موارد، دمنده را بعد از سیکلون قرار میدهند. زیرا وجود ذرات جامد در جریان ورودی به سیکلون، روی دمنده اثر منفی می گذارد.

حال به طور خلاصه انواع دسته‌بندی سیکلونها را در زیر می‌آوریم:

الف)دسته‌بندی سیکلونها از نظر مقطع ورودی جریان گاز:

1- مقطع ورودی مستطیلی

2- مقطع ورودی دایره‌ای

3- مقطع ورودی به شکل خاص در موارد لزوم

ب)دسته‌بندی سیکلونها از نظر تعداد در حال کار

1- سیکلونهای منفرد

2- سیکلونهای چندتایی

ج) دسته‌بندی سیکلونها از نظر چگونگی قرار گرفتن عامل تامین افت فشار نسبت به سیکلون

1- سیکلونهایی که دمنده قبل از آنها قرار دارد

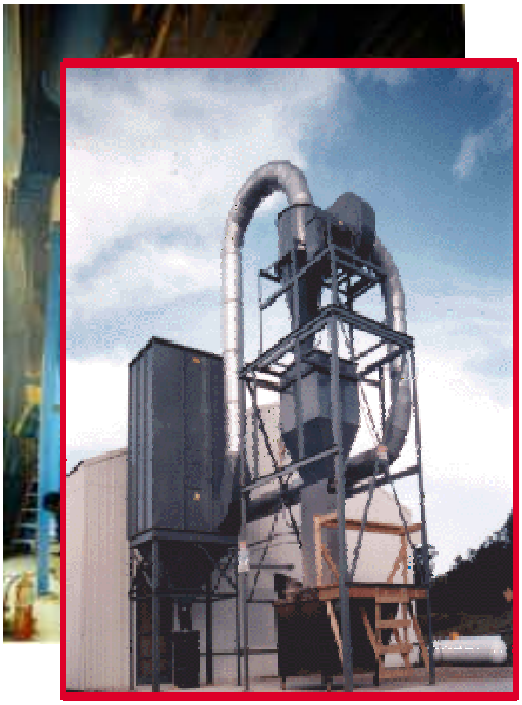
2- سیکلونهایی که دمنده بعد آنها قرار دارد.

## 14-3- موارد کاربرد سیکلونها

همانطوریکه به طور مختصر بیان شد، از سیکلونها برای جدا کردن جامدات ریز موجود در گاز استفاده می‌شود. در اینجا باید به این نکته توجه کرد که تنها این وسایل نیستند که برای جدا کردن ذرات جامد از فاز گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. بلکه سیکلون‌ها با صافی‌ها، فیلترها، جداسازی‌های الکترواستاتیکی و جداسازهای ته‌نشین کننده در حال رقابت هستند. اما در مقایسه با سایر جداکننده‌های گاز-جامد سیکلونها از لحاظ هزینه ساخت و هزینه عملیات دارای هزینه کمتری می‌باشند. همانطوری که در شکلهای این وسایل نیز مشاهده می‌شود، نحوه ساخت این وسایل از پیچیدگیهای خاصی برخوردار نمی‌باشد. درشکلهای 14-6 و14-7، چند نمونه سیکلون صنعتی و آزمایشگاهی نشان داده شده است.

در جریان‌های گاز- جامد که قطر ذرات جامد از $\mu m5$ کوچکتر است، راندمان جداسازی سیکلونها مقدار کمی می‌باشد ولی اگر ذرات جامد تمایل بهم چسبیدن را دارا باشند، می‌توان ذرات با قطر $\mu m3$ را نیز با استفاده

از سیکلونها از جریان گاز جدا کرد. یکی دیگر از موارد کاربرد سیکلونها، توانایی عملیاتی این دستگاهها در فشار و دماهای بالا می‌باشد. با توجه به کارایی و مقاومت مواد موجود در سیکلونها، این دستگاهها در دمای حدود 1000 درجه سانتی‌گراد و فشاری در حدود atm(50700Kpas500) نیز استفاده می‌شود. همانطوریکه با توجه به شکل این دستگاهها مشخص است، دما و فشار پایین و ایجاد خلاء در سیستم نیزمشکلی روی کار سیکلون ایجاد نمی‌کند. به این ترتیب، این وسایل در دامنه وسیعی از دما و فشار، قابل استفاده هستند.



شکل 14-6- چند نمونه سیکلون صنعتی

شکل 14-7- چند نمونه سیکلون آزمایشگاهی

در مورد کاربرد سیکلونها، یکی از مسائلی که مطرح می‌شود قطر برش (Cut diameter) است. به طور کلی هر وسیله جداکننده ذرات جامد از جریان گاز، دارای قطر برش می‌باشد. منظور از قطر برش این است که ذراتی که قطر آنها از قطر برش ($D_{cut}$) بزرگتر هستند از وسیله مورد نظر عبور نمی‌کنند و به این وسیله از جریان گاز جدا می‌شوند. البته در بعضی از موارد به طور قاطع، از $D_{cut}$ به عنوان قطر برش استفاده نمی‌شود و تنها کسری از مواد جامد با قطری بزرگتر از $D_{cut}$ از وسیله جداکننده عبور نمی‌کنند. لازم به ذکر است که قطر برش در مورد همه وسایل جداکننده گاز-جامد مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعیین دقیق مقدار قطر برش با رسم نمودار حاصل از بررسی توزیع ذرات موجود در گاز خروجی از سیکلون بر حسب قطر ذرات ورودی به سیکلون، قابل محاسبه است.

## 14-4- عیوب و موارد عدم مطلوب بودن سیکلونها

یکی از عیوبی که سیکلونها با آن مواجه هستند، در مورد وجود ذرات ریز در فاز گاز ورودی به سیکلون است. در این موارد دیگر نمی‌توان از این وسایل استفاده کرد و باید از وسیله مناسب دیگری سود جست. دلیل نامناسب بودن سیکلون در مورد ذرات ریز (کوچکتر از $\mu m5$) به خاطر عدم کافی بودن نیروی سانتریفوژی برای جداسازی ذرات جامد از گاز است. زیرا در مورد ذرات بسیار ریز نیروی اینرسی وارد شده بر ذرات جامد بسیار کم است.

یکی دیگر از مواردی که باعث پایین آمدن راندمان دستگاه می‌شود، افزایش دبی ورودی به سیکلون است. قطر برش ذکر شده در قسمت قبل در مورد حالتی که دستگاه با دبی مناسب در حال کار است به دست می‌آید واگر شدت جریان فاز گاز و جامد ورودی به سیکلون افزایش یابد به همین ترتیب باعث کاهش راندمان دستگاه می‌شود. در مواردی که نیاز به جداسازی مقدار زیادی از فاز گاز- جامد داریم باید به جای یک سیکلون از تعداد زیادی سیکلون که به صورت موازی (Multi Cyclone) قرار گرفته‌اند استفاده کنیم.

در مواردی که ذرات جامد موجود در فاز گاز، ذرات بارداری هستند استفاده ار جداسازهای الکترواستاتیکی بر سیکلونها ترجیح داده می‌شوند. زیرا در این مورد راندمان جداسازهای الکترواستاتیکی نسبت به سیکلون‌ها بسیار بیشتر است.

یکی از مواردی که به شدت روی راندمان دستگاههای جداساز سیکلونی تاثیر می‌گذارند، میزان افت فشار موجود در این دستگاهها می‌باشد. برای آشنا شدن با این موضوع عوامل ایجاد کننده افت فشار در سیکلونها و دلایل آنها را مورد بحث قرار می‌دهیم. عوامل ایجاد کننده افت فشار در سیکلونها از قرار زیرند:

1-افت فشار در اثر انقباض ورودی(Inlet Contraction): این افت فشار در اثر کم شدن مساحت ورودی فاز جامد و گاز به داخل سیکلون ایجاد می‌شود و مقدار آن نیز با توجه به نوع مقطع ورودی تغییر می‌کند.

2-شتاب ذرات جامد: ذرات جامد موجود در فاز گاز در اثر ورود به سیکلون شتاب بیشتری می‌گیرند و به

این ترتیب میزان افت فشار افزایش می‌یابد.

3-اصطکاک دیواره سیکلون: اصطکاک بین جریان گاز و دیواره جامد باعث افزایش افت فشار در سیکلون می‌شود. لازم به ذکر است که با افزایش سرعت ورودی مواد به سیکلون، این افت فشار به شدت افزایش می‌یابد.

4-افت فشار به خاطر چرخش گاز در سیکلون

5-افت فشار به خاطر انقباض نهایی جریان گاز برای ورود به لوله خروجی گاز خالص شده.

فصل پانزدهم

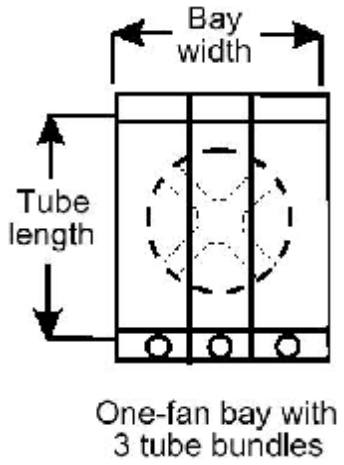
# خنک‌کننده‌های هوایی
# (مبدل‌های هواخنک)
# Aircooled Heat Exchangers

## 15-1- شرح و توصیف

یکی از وسایلی که در اکثر واحدهای پالایشگاهی و پتروشیمیایی برای کاهش دمای سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند، خنک‌کننده‌های هوایی می‌باشند. در این مبدل‌ها برای کاهش دمای سیال داخل لوله‌ها، از هوای محیط استفاده می‌کنند. اجزای اصلی این مبدل‌ها شامل یک یا چند لوله که در معرض جریان هوای فن‌ها قرار دارند، تجهیزات فن و موتور آن، کنترل‌کننده سرعت چرخش فن و تجهیزات لازم برای هدایت جریان‌ها می‌باشد.

در این مبدل‌ها جریان سیال گرم پس از عبور از یک نازل وارد لوله‌هایی می‌شود که در مجاورت فن قرار دارند. این لوله‌ها با توجه به پره‌هایی که روی دیواره بیرونی لوله قرار دارند، کار انتقال حرارت را سریع‌تر انجام می‌دهند.

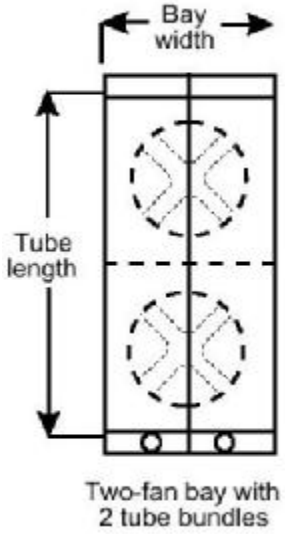
در قسمت عبور سیال از مجاورت فن، هر مجموعه از لوله‌های حاوی سیال گرم را یک Bundle می‌نامند که خود شامل چندین لوله است. معمولاً چند Bundle به طور موازی با یکدیگر از روی فن عبور می‌کنند. به این مجموعه یک Bay می‌گویند. در شکل 15-1، یک Bay که شامل سه Bundle می‌باشد نشان داده شده است.




شکل 15-1- یک Bay با 3 Bundle

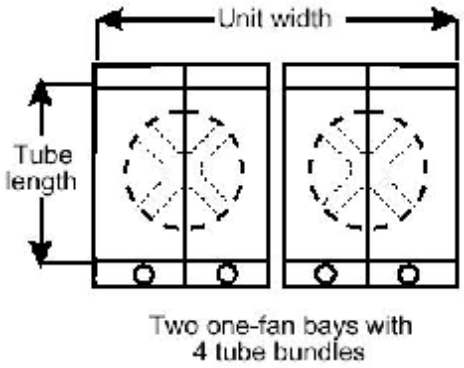
در بعضی موارد دو فن به صورت سری روی جریان‌های موازی Bundleهای یک Bay عمل می‌کنند. این حالت که در شکل 15-2 نشان داده شده، نشان‌دهنده دو Bundle از لوله‌های حاوی سیال گرم است که از مجاورت دو فن سری شده عبور می‌کند.

معمولاً برای خنک کردن سیال گرم توسط مبدل هواخنک در صنعت از چند Bay که به صورت موازی قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود. به مجموعه این Bayها، Unit گفته می‌شود. در شکل 15-3، دو Bay به صورت موازی کنار هم قرار گرفته‌اند و هر Bay نیز شامل دو Bundle می‌شود که مجموعا یک Unit را تشکیل می‌دهند. لذا به این مجموعه Two one-Bay with 4 tube bundles گفته می‌شود. در شکل 15-4 دو Bay که




شکل 15-2- دو Bay و دو Bundle

هر کدام شامل دو فن و سه Bundle می‌باشد نشان داده شده است که به این مجموعه Two two-Bays with 6 tube bundles گفته می‌شود. قطر فن‌های مورد استفاده در مبدل‌های هواخنک در دامنه 3 تا 28 فوت قرار دارد. با این حال معمولاً فن‌هایی با قطر 14 تا 16 فوت از بزرگ‌ترین فن‌های مورد استفاده در صنایع پتروشیمی به شمار می‌روند.

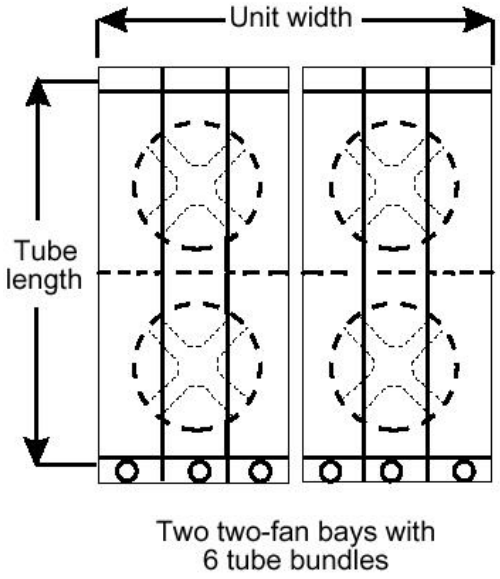



شکل 15-3- دو Bay با 4 Bundle

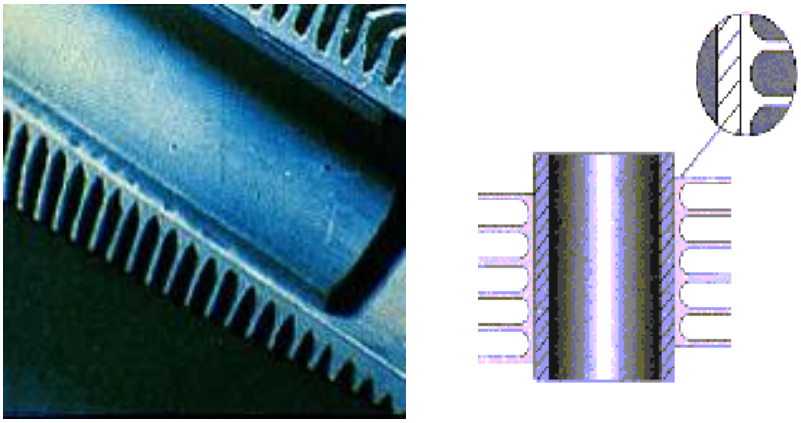
همانطوریکه گفته شد، هوا با دمای محیط به لوله‌های حاوی سیال گرم برخورد کرده و باعث کاهش دمای دیواره لوله می‌شود و به این ترتیب دمای سیال داخل لوله کاهش می‌یابد. برای افزایش میزان انتقال حرارت، از لوله‌های پره‌دار استفاده می‌شود. لوله‌های پره‌دار در مبدل‌های هواخنک به صورت‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی از مهمترین انواع این پره‌ها، پره‌های Extruded (Extruded fin) می‌باشد که معمولاً از جنس آلومینیوم ساخته می‌شوند. نحوه ساخت این پره‌ها به این صورت است که یک لایه از فلز مربوطه را بر روی لوله قرار می‌دهند و سپس این لایه را با اعمال فشار توسط دستگاه دیگری روی لوله نصب می‌کنند. قالب این دستگاه به صورتی عمل می‌کند که سطح خارجی لوله در نهایت به صورت پره‌های مارپیچ و یا شکل‌های دیگر در

می‌آید و به این ترتیب سطح خارجی لوله افزایش یابد. از این پره‌ها معمولاً در دمای پایین‌تر از 200 درجه سانتیگراد استفاده می‌شود.

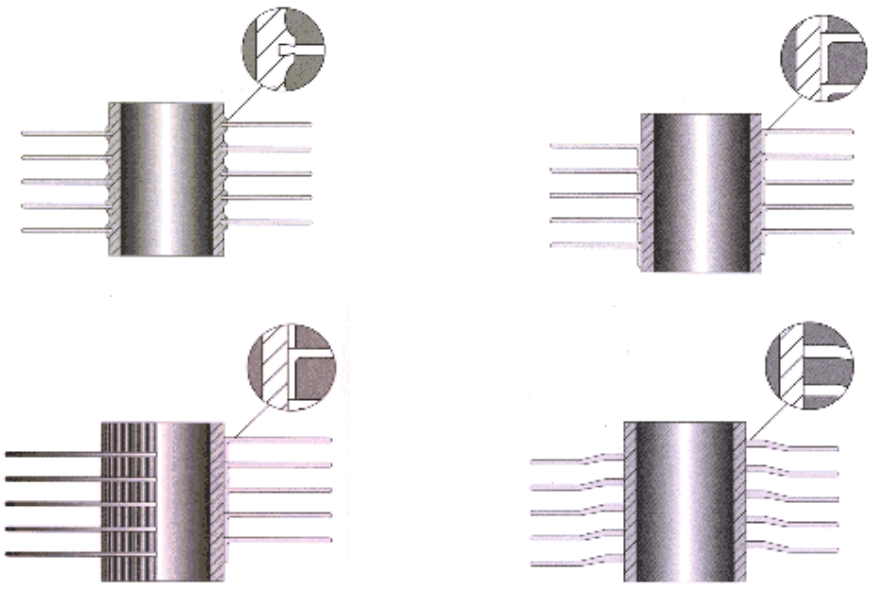



شکل 15–4- یک Unit که شامل دو Bay و شش Bundle می‌باشد



شکل 15–5- یک نمونه از پره‌های Extruded که روی لوله‌ای ایجاد شده‌اند

نوع دیگر پره‌های مورد استفاده در مبدل‌های خنک‌کننده هوایی، پره‌های Embedded (Embedded fins) می‌باشند. این پره‌ها نیز معمولاً از جنس فولاد یا آلومینیوم ساخته می‌شوند. این پره‌ها به شکل میله‌های نازک با سطح مقطع دایره‌ای یا مربعی می‌باشند که در داخل دیواره لوله حاوی سیال گرم فرو رفته‌اند. در شکل 15–6، چهار مورد از انواع این پره‌ها به طور شماتیک نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل در می‌یابیم که این پره‌ها از تنوع زیادی برخوردارند. از این پره‌ها در مبدل‌هایی که در دماهای بالا و فرایندهای ناپیوسته کار می‌کنند استفاده می‌شود.

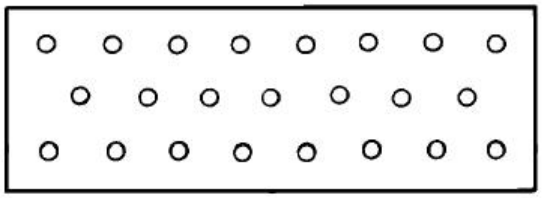


شکل 15-6- انواع پره‌های Embeded مورد استفاده در مبدل‌های خنک‌کننده هوایی

## 15-2- ابعاد مبدل‌های خنک‌کننده هوایی

طول استاندارد لوله‌های مورد استفاده در مبدل‌های خنک‌کننده هوایی، معمولاً 20، 30 و 40 فوت می‌باشد. عرض هر bay نیز از 1/2 تا 9/1 متر تغییر می‌کند. معمولاً استفاده از لوله‌های بلندتر باعث کاهش هزینه ساخت مبدل خنک‌کننده هوایی می‌شود.

قطر لوله‌های مورد استفاده در مبدل خنک‌کننده هوایی در دامنه 16 تا 38 میلی‌متر می‌باشد. ارتفاع پره لوله‌ها نیز در دامنه 12/7 تا 25/4 میلی‌متر قرار دارد. تعداد این پره‌ها در هر یک اینچ از طول لوله،(Fin Per Inch) FPI، از 8 تا 11 پره تغییر می‌کند. استفاده از پره‌ها به طور موثری باعث افزایش سطح خارجی لوله می‌شود به طوریکه مساحت خارجی یک لوله پره‌دار شده می‌تواند 12 تا 25 برابر مساحت خارجی لوله بدون پره باشد. نحوه قرار گرفتن لوله‌ها معمولاً به صورت مثلثی‌شکل می‌باشد و فاصله‌ای در حدود 1/6 تا 6/4 میلی‌متر بین پره‌های لوله‌های مجاور در نظر گرفته می‌شود. در شکل 15-7 آرایش مثلثی لوله‌ها (Triangular Pitch) نشان داده شده است.



شکل 15-7- آرایش مثلثی لوله‌ها(Triangular Pitch) که در مبدل‌های خنک‌کننده هوایی

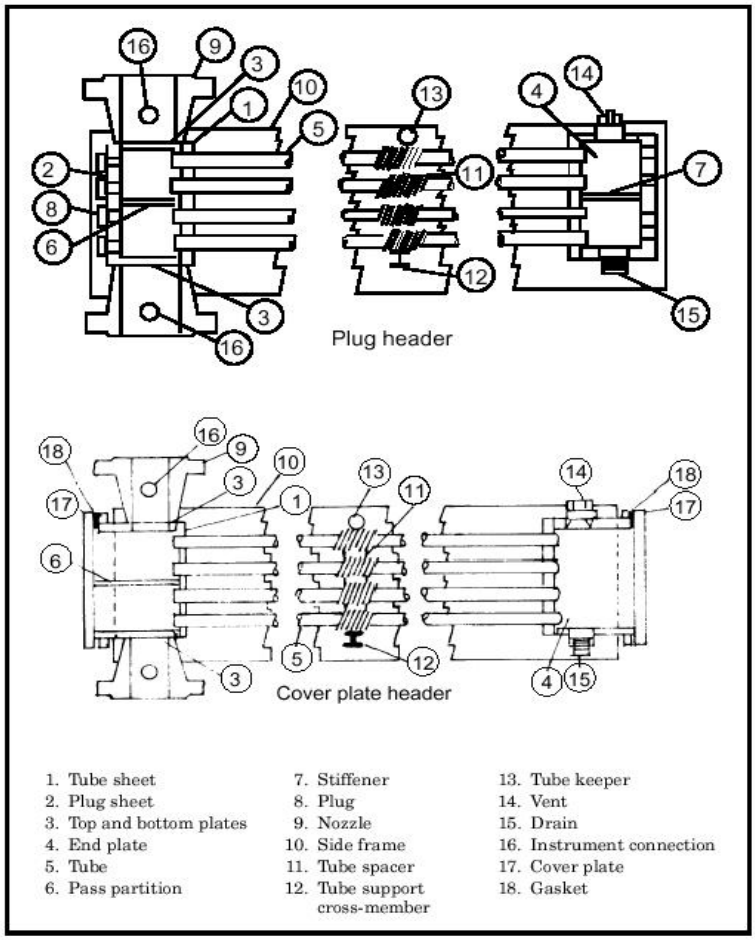
یکی از مسائلی که در مورد مبدل‌های خنک‌کننده هوایی اهمیت دارد، نسبت مساحت فن به مساحت Bay می‌باشد. این نسبت را Converage fan می‌گویند و در مقدار آن در مبدل‌های خنک‌کننده هوایی نباید از 0/4 کوچکتر باشد.

در مبدل‌های خنک‌کننده هوایی افزایش تعداد لوله‌ها باعث افزایش سطح خارجی لوله‌ها و باعث افزایش سرعت سیال در لوله‌ها به واسطه کاهش قطر لوله‌ها می‌شود که این موارد باعث افزایش میزان انتقال حرارت می‌گردد. از طرف دیگر افزایش تعداد لوله‌ها باعث افزایش افت فشار در لوله‌ها، افزایش هزینه ساخت مبدل و افزایش مقدار توان مصرفی مورد نیاز برای فن می‌گردد. با این توضیحات واضح است که در طراحی مبدل خنک‌کننده هوایی با در نظر گرفتن این اثرات باید تعداد بهینه لوله‌ها تعیین گردد. با توجه به لزوم منطقی بودن نسبت طول به عرض در مبدل‌های خنک‌کننده هوایی معمولاً 3 تا 8 ردیف لوله‌های فین‌دار، برای هر فن مورد استفاده قرار می‌گیرند.لازم به ذکر است که استفاده از چهار ردیف لوله از سایر موارد متداولتر است.

در شکل 15-8، انواع لوله‌های مبدل خنک‌کننده هوایی نشان داده شده است. یکی از مواردیکه در این شکل مشاهده می‌شود، چگونگی قرار گرفتن هدر در این مبدل‌ها می‌باشد. در این قسمت از مبدل‌ها با توجه به وضعیت صفحه Pass Partition، چگونگی حرکت سیال در لوله‌ها تعیین می‌شود.

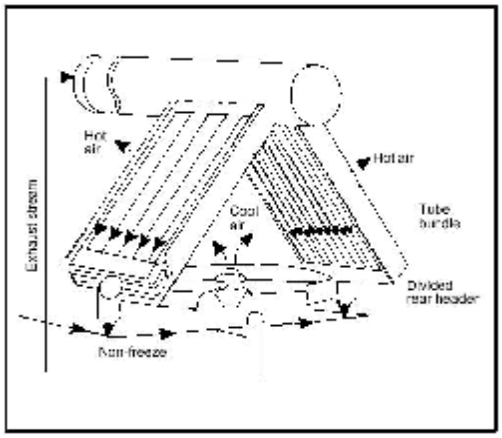
پره‌های آلومینیومی معمولاً برای لوله‌ها استفاده می‌شود تا سطح بیشتری را در برابر هوا ایجاد کند و ضریب انتقال گرمای نسبتاً پایین هوا را جبران کند. فینها انواع مختلفی دارند که متداولترین آنها Extrude finاست که از این فینها به خاطر اقتصادی بودنشان بیشتر استفاده می‌شود. قطر پایه‌ای لوله‌ها حدود ½ تا8/5 اینچ می‌باشد ارتفاع فینها حدود ½ - 1 in است. معمولاً هدر از جنس کربن استیل و فینها از جنس آلومینیوم ساخته می‌شوند. آلیاژ برنج و استیل نیز دارای خواص مشابهی هستند ولی هردو گرانتر از کربن استیل می باشند.

اقتصادی‌ترین و متداولترین نوع قرار گرفتن فنها به صورت افقی هستند. البته برای سیالاتی که قابلیت انجماد دارند. لوله باید حداقل شیب 8/1 اینچ داشته باشد. در اغلب موارد مشکل انجماد به وجود نمی‌آید به خاطر همین و به خاطر هزینه‌بر بودن این روش معمولاً لوله‌ها به صورت افقی قرار داده می شوند.




شکل 15-8- ساختار داخلی دو نوع مبدل خنک‌کننده هوایی

سیستم‌های عمودی و زاویه‌دار برای مواقعی که ماکزیمم راندمان مورد نیاز است (به طور مثال در سیستمهای مایع‌سازی) بکار برده می‌شوند. اغلب سیستم‌های زاویه‌دار، زاویه‌ای در حدود 30 درجه با افق می‌سازند. یکی از انواع این نوع مبدل‌ها در شکل 15-9 نشان داده شده است.

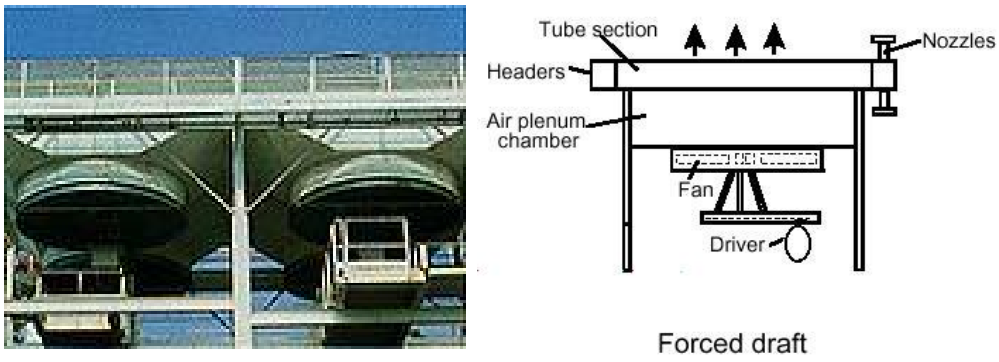



شکل 15-9- شمایی از کاربرد لوله‌های زاویه‌دار در مبدل‌های خنک‌کننده هوایی

## 15-3- انواع مبدل‌های خنک‌کننده هوایی

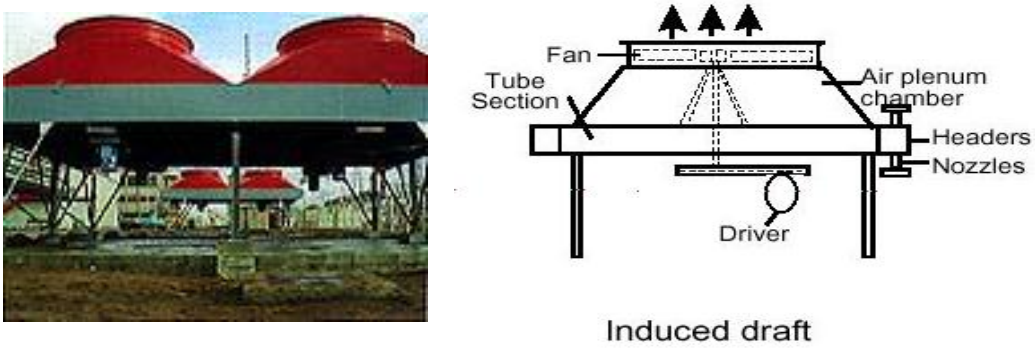
معمولاً مبدل‌های خنک‌کننده هوایی در دو آرایش زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

1-آرایش Forced (Forced Draft): در این آرایش لوله‌ها در قسمت دمنده فن قرار دارند یعنی فن زیر مجموعه لوله‌ها قرار می‌گیرند. این آرایش به صورت شماتیک در شکل 15-10 نشان داده شده است.




شکل 15-10- شکل شماتیک و صنعتی آرایش Forced

2-آرایش Induced (Induced Draft): در این آرایش لوله‌ها در قسمت مکنده فن قرار دارند یعنی فن بالای مجموعه لوله‌ها قرار می‌گیرد. در شکل 15-11 نمای شماتیک این نوع آرایش همراه با یک شکل واقعی از این فن‌ها نشان داده شده است.




شکل 15-11-نمای یک Induced Fan

گفته شد که در نوع Forced لوله‌ها در قسمت بالایی فن قرار می‌گیرند. به این ترتیب در اثر گرم شدن هوای ورودی، در بالای لوله‌ها مکش طبیعی هوا به سمت بالا صورت می‌گیرد. لذا توان مصرفی فن کمتر خواهد شد. از طرف دیگر در این نوع از مبدل‌ها قطعات فن برای تعمیر، به راحتی در دسترس هستند. در ضمن این نوع مبدل‌ها دارای سازگاری بیشتری در مناطق سردسیر می‌باشند. اما این سیستم برخلاف مزایای ذکر شده دارای معایبی هم هست از آن جمله می‌توان به عدم توزیع مناسب هوا در بین لوله‌ها و امکان برگشت هوای گرم به

خاطر سرعت کم هوای خروجی از قسمت لوله‌ها اشاره کرد. در ضمن به خاطر اینکه لوله‌ها در معرض نور خورشید، باران و تگرگ قرار دارند میزان استهلاک بالا می‌رود.

نوع induced نیز دارای مزایا و معایبی است. در این نوع، هوا در قسمتهای مختلف اطراف لوله‌ها به نحو مناسبی توزیع می‌شود و امکان برگشت هوای گرم به قسمت هواگیری فن کمتر است. تاثیر خورشید و باران و تگرگ بر روی لوله‌ها نیزکمتر است زیرا 60٪ سطح پوشیده است و تاثیر جریان طبیعی در سیستم بیشتر است. معایب این سیستم نیز به شرح زیر است:

توان مصرفی بیشتری مورد نیاز است زیرا فن در معرض هوای گرم عبوری از لوله‌ها قرار دارد. دمای هوای گرم خروجی از قسمت تیوبها باید تا حدود$200f^{o}$ محدود شود. زیرا امکان خراب شدن پره‌ها و یاتاقان و تسمه و دیگر قطعات فن در جریان هوای گرم وجود دارد. عیب دیگر این است که قطعات فن برای تعمیر، کمتر در دسترس هستند.

## 15-4- کارکرد و تنظیم دستگاه با تغییرات دمای هوا

خنک‌کننده‌های هوایی برای هوای گرم در تابستان طراحی شده‌اند و تغییرات دما در نتیجه تغییرات فصلی می‌تواند باعث تغییر در خنک‌کنندگی آنها شودکه ممکن است مطلوب نباشد. یک راه این است که میزان جریان هوا را کم کنیم تا میزان انتقال حرارت سیال داخل لوله کمتر شود. برای اینکار از موتورهای چندسرعته استفاده می‌شود. اغلب موتورها در دو سرعت متفاوت می‌توانند کار کنند. دومین راه کنترل، قرار دادنLouvers (کرکره هایی) به عنوان پوشش یا سقف بر روی قسمت لوله‌ها و دیگری استفاده از فن‌های با Pitch متغیر است(پره‌های فن قابلیت تغییر شیب دارند).

Louver قابلیت کنترل زیادی دارد. این کنترل می‌تواند به صورت دستی یا اتوماتیک توسط موتورهای الکتریکی یا سیستم‌های هوایی باشد که از کنترلرهای دما و فشار سیستم فرمان می‌گیرند. Louver ها معمولاً برای فن‌های با سرعت ثابت استفاده می‌شود. در فن‌های با شیب متغیر، شیب پره‌های فن برای تامین جریان هوای مورد نیاز با توجه به دما و فشار سیستم تغییر می‌کند. زاویه پره وقتی دما افت پیدا می‌کند کاهش می‌یابد و این باعث می‌شود فن پایین‌تر بیاید. موتورهای هیدرولیکی نیز می‌توانند سرعت فن را کاهش دهند. وقتی جریان هوای کمی مورد نیاز است، توان مصرفی فن نیز کاهش می یابد. یک راه‌حل دیگر برای کنترل انتقال حرارت در سیستم، کنترل جریان سیال در دو جهت است. در این مورد به جای اینکه جریان هوا(به عنوان خنک‌کننده سیال داخل لوله‌ها) کنترل شود جریان سیال گرم داخل لوله‌ها کنترل می‌شود. سیستم‌های دو جریانی به این صورت است که یک نازل ورودی در ته قسمت هدر وجود دارد. این نازل جریان طبیعی سیال را عکس می‌کند. در بعضی سیالات با ویسکوزیته زیاد گاهی اوقات این تنها راه جلوگیری از انجماد سیال است.

آخرین تغییری که می‌توان در دمای هوا به وجود آورد مخصوصاً در آب و هوای سرد، استفاده از گردش جریان هوای گرم است. از این راه هم به خاطر کنترل دمای سیستم و هم به خاطر جلوگیری از انجماد سیال استفاده می‌شود.

گردش هوای گرم در سیستم های با فن متغیر و Louver اتوماتیک استفاده می‌شود. جریان هوای گرم به دو نوع گردش خارجی و گردش داخلی تقسیم‌بندی می‌شود.

گردش داخلی(Internal recirculation ) به این صورت است که یک فن سرعت ثابت و یک فن سرعت متغیر با هم به کار می‌روند. در این حالت فن سرعت‌ثابت هوای نیمه پایین اتاقک را به جریان می‌اندازد و فن سرعت‌متغیر که با مد عکس کار می‌کند (یعنی هوا را از بالا می‌مکد و به طرف پایین اتاقک می‌دمد)، هوای گرم بالای اتاقک که توسط فن اول به بالا رانده شده را با هوای سرد ورودی از بیرون، به طرف پایین اتاقک می‌دمد. Louver بالای اتاقک به طور اتوماتیک توسط سنسورهای دمای سیستم کنترل می‌شوند. اگر دمای سیستم افزایش یابد، Louver ها (کرکره‌ها) باز می‌شوند. در حالت نرمال، Louver کاملاً باز است و هر دو فن در حالت استاندارد سرعت هستند.

خنک‌کننده‌های با گردش درونی یک حالت بین بدون گردش هوا و حالت کاملاً کنترل شده توسط گردش خارجی است. البته این روش از گردش خارجی ارزانتر است و افت فشار کمتری دارد. با این حال در این روش به طور کامل نمی‌توان از یخ‌زدگی سیال جلوگیری کرد. زیرا هیچ کنترلی روی دمای هوای خروجی نیست.

در حالت گردش خارجی از دو فن با سرعتهای متغیر و در حالت نرمال روی سرعت کم با قابلیت تغییر شیب استفاده می‌شود. در این طرح Louver به صورت دستی باز و بسته می‌شود. بالاترین Louver توسط دمای سیال کنترل می‌شود. وقتی دمای هوای درونی به دمای سیال نزدیک شود، louver خارجی باز می‌شود. این تطابق‌ها توسط کنترلری که روی فن قرار دارد و دمای هوا را سنس می‌کند انجام می‌شود.گردش خارجی برای کنترل دقیق دمای سیال و جلوگیری از انجماد آن کاربرد فراوان دارد.

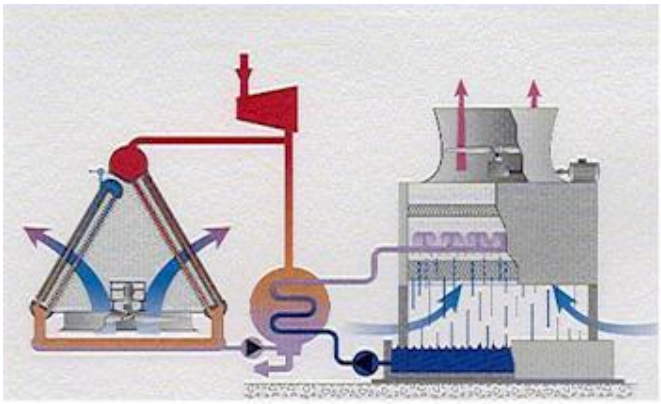
یکی از مزایای مبدلهای خنک‌کننده هوایی کاربرد این مبدلها در نقاط کم آب است. در نقاط کم‌آب، مبدلهای معمولی و برجهای خنک‌کننده به دلیل احتیاج زیاد به آب، نمی‌توانند مورد مصرف قرار بگیرند. لذا یکی از بهترین روشها برای خنک کردن سیالات بدون استفاده از آب،استفاده از مبدلهای خنک‌کننده هوایی می‌باشد.

## 15-5- مشکلات مبدل‌های خنک کننده هوایی

سیستم‌های گردش هوای گرم می‌توانند در هر موقعی از سال مشکل‌ساز باشند. این سیستم‌ها در تابستان به شدت از توانشان کاسته می‌شود. مهمترین علتهای آن را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

وقتی خنک‌کننده‌های هوایی نزدیک ساختمان بلند و در مسیر پایین باد قرار گیرند، هوای گرم خروجی از خنک‌کننده‌ها توسط جریان باد حمل می‌شود و پس از برخورد با مانع مقداری از هوای گرم دوباره به داخل سیستم برگشت داده می‌شود. قرار دادن خنک‌کننده‌های هوایی دور از چنین موانعی بهترین راه‌حل است. خنک‌کننده‌های هوایی از نوع forced همیشه مستعد برگشت هوای گرم هستند. مخصوصاً اگر چنین خنک‌کننده‌هایی در جایی نزدیک زمین قرار بگیرند به علت اینکه اختلاف بین سرعت جریانهای هوا کم می‌شود برگشت هوا تبدیل به مشکل اساسی می‌شود. در نتیجه چنین سیستمهایی باید در ارتفاع نصب شوند.

گاهی اوقات سیستم خنک‌کننده هوایی خشک به صورت سری با خنک‌کننده مرطوب به صورت سری به کار برده می‌شود. البته اگر نیاز به تغییر دمای زیادی در سیستم وجود داشته باشد، در این فرایندها سیال ابتدا وارد بخش لوله‌های پره‌دار خشک و سپس وارد قسمت لوله‌های مرطوب می‌شود. بعد از اینکه رطوبت اضافی هوا توسط مه‌گیرهایی گرفته شد، بر روی لوله‌های خشک وزیده می‌شود. در سیستم خنک‌کننده‌های مرطوب آب به داخل هوای خنک‌کننده اسپری می‌شود و سپس هوای مرطوب به روی لوله‌ها دمیده می‌شود. البته باید جنس لوله‌ها از نوعی باشد که بر اثر رطوبت خراب نشود.



شکل 15-11- در این شکل یک مبدل خنک‌کننده هوایی و یک برج خنک‌کننده به طور مشترک و موازی کار سرد کردن سیال گرم ورودی را انجام می‌دهند

فصل شانزدهم

# کمپرسورها
# Compressors

## 16-1- شرح وتوصیف

کمپرسور دستگاهی است که برای بالا بردن فشار گاز و یا انتقال آن از نقطه‌ای به نقطه دیگردر طول پروسس استفاده می‌شود. در واقع کمپرسوربا افزایش سرعت گاز و تبدیل آن به فشار، جریان گاز را در سیستم راحت‌تر می‌کند. البته افزایش فشار در نوعی از کمپرسورها به وسیله کاهش حجم صورت می‌گیرد.

مسئله مهمی که درکمپرسورها مطرح است، نسبت فشار خروجی، به ورودی کمپرسور است زیرا در ورودی کمپرسورها با افزایش فشار دمای گاز نیز بالا می‌رود و این افزایش دما در کار قطعات مختلف کمپرسور و سیستم روغن کاری و... اختلال ایجاد می کند. البته در کمپرسور می‌توان نسبت فشار را حتی تا10 رساند، ولی این امر با تدابیر خاصی امکان‌پذیر است که در قسمتهای بعد مفصلاً توضیح داده خواهد شد.

شکل 16-1- کمپرسور پیستونی با پنکه جهت خنک کردن هوا

## 16-2- انواع کمپرسورها

در کمپرسورها افزایش فشار به دو صورت انجام می گیرد، برحسب این مورد دو نوع اساسی کمپرسور نیز وجود دارد که عبارتند از:

-کمپرسورهای دینامیک که فشار گاز را با زیاد کردن سرعت آن و سپس، گرفتن سرعت گازافزایش می دهند.

-کمپرسورهای جابجایی مثبت که با کاهش حجم گاز، فشار آن را افزایش می‌دهند.

البته هر کدام از این کمپرسورها بر حسب شکل ساختمانی و نحوه عملکرد تقسیم‌بندی می‌شوند که در زیر به طور خلاصه آورده شده است:

1-کمپرسورهای دینامیک Dynamic Compressors

1-1- سانتریفوژ Centrifugal compressor

1-2- جریان محوری Axial Flow compressor

2-کمپرسورهای جابجایی مثبتPositive displacement compressor

2-1-رفت وبرگشتی Reciprocating compressor

2-2-دورانی Rotary compressor

از بین کمپرسورهای نامبرده،کمپرسورهای رفت و برگشتی، سانتریفوژ و جریان محوری بیشتر از سایر کمپرسورها مورد استفاده قرار می گیرند که آنها را به طور مفصل بررسی خواهیم کرد.

### 16-2-1- کمپرسورهای سانتریفوژ (Centrifugal compressors)

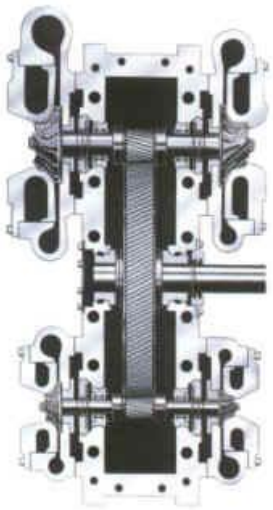
در این کمپرسورها افزایش فشار گاز بر اثرافزایش سرعت آن صورت میگیرد. به این صورت که سرعت گاز بر اثر حرکت پروانه (Impeller) زیاد شده پس از آن سرعت گاز با برخورد با پخش کننده‌ها کاهش پیدا می کند و در عوض فشارش بالا میرود.

شکل 16-2- نحوه حرکت گاز توسط پروانه کمپرسور

کمپرسورهای سانتریفوژ دقیقاً مانند پمپهای سانتریفوژ تشکیل شده اند از یک پروانه که داخل پوسته‌ای می‌چرخد. اساس کار این کمپرسورها بر پایه نیروی گریز از مرکز طراحی شده است. درکمپرسورهای سانتریفوژ فاصله بین پوسته و پروانه خیلی کم است. بنابراین جنس محور کمپرسور باید از فلز یا آلیاژی باشد که در دورهای بالا حداقل انحنا را داشته باشد تا پروانه با پوسته تماس پیدا نکند. همچنین گاز ورودی به کمپرسور باید کاملاً خشک باشد و هیچ مایعی به همراه نداشته باشد. برای همین، قبل از هر کمپرسور یک مخزن آبگیر (Knock Drum out) قرار می‌دهند تا اگر احیاناً قطرات مایعی در گاز موجود است توسط این مخازن گرفته شود. چون قطرات مایع به پره‌های کمپرسور ضربه وارد کرده و آسیب می‌رساند.

اگر فشار خیلی بالا مد نظر باشد، باید از کمپرسورهای سانتریفوژ چند مرحله‌ای استفاده کرد به خاطر اینکه با افزایش فشار گاز دمای آن نیز زیاد می‌شود و این افزایش دما اگر از حد معینی بیشتر شود باعث آسیب رساندن به قطعات کمپرسور و اختلال در سیستم می‌شود. همچنین ممکن است

با افزایش فشار، قسمتی از گاز تبدیل به مایع شود و این قطرات مایع ایجاد شده در گاز باعث از بین بردن پره های کمپرسور می‌شود. به دلایل ذکر شده از کمپرسورهای چند مرحله ای استفاده میشود. به این ترتیب که پس از هر مرحله فشردگی، گاز را خنک کرده و مایع احتمالی در آن را توسط intercoolerبه وسیله مخازنی در بین راه گرفته سپس گاز خشک (بدون مایع) و خشک شده را به مرحله دوم می‌فرستند و به این ترتیب می توان پس از چند مرحله فشردن به فشار نسبتاً بالایی دست یافت.



شکل 16-3- نمای داخلی کمپرسور سانتریفوژ 4 مرحله‌ای

### 16-2-1-1- مزایای کمپرسورهای سانتریفوژ

کمپرسورهای سانتریفوژ نیاز به تعمیرکمتری دارند و می توانند مدت زیادی را بدون وقفه در سیستم کار کنند. علاوه برآن، این کمپرسورها اندازه کوچکتری نسبت به کمپرسورهای رفت و برگشتی دارند. زیرسازی کمپرسورهای سانتریفوژ کوچکتر از انواع دیگراست و نیاز به آب یا روغن خنک‌کننده ندارد چون به طور کلی محفظه این نوع کمپرسورها با هوا خنک می‌شود. جریان خروجی از این نوع کمپرسورها یکنواخت است و ضربه ای به بخش تخلیه کمپرسور وارد نمی‌کند. مزیت دیگری که این نوع کمپرسورها دارند این است که استهلاک کمتری نسبت به انواع دیگر دارند و این به خاطر کم بودن قطعات متحرک این کمپرسور است .

### 16-2-1-2- معایب کمپرسورهای سانتریفوژ

کارکرد این کمپرسورها وابستگی شدید به وزن مخصوص، جرم مولکولی و نسبت $C_p/C_v$ گاز ورودی دارد. کاهش وزن مخصوص و وزن مولکولی گاز باعث افزایش توان مصرفی کمپرسور خواهد شد، همچنین متراکم

کردن گازهای با وزن مولکولی کم باعث افزایش تعداد مراحل در این کمپرسورها می شود. با وجود مزایایی که کمپرسورهای سانتریفوژی نسبت به کمپرسورهای رفت و برگشتی دارند، دارای راندمان کمتری نسبت به آنها هستند.

موتورهای محرک کمپرسورها به دو صورت الکتریکی و توربینی است اما باتوجه به سرعت زیاد کمپرسورهای سانتریفوژی اگر برای این نوع کمپرسورها از موتورهای الکتریکی استفاده شود، برای تغییر سرعت دوران برای گازهای متفاوت نیاز به جعبه‌دنده می باشد که این امر احتمال لرزش و ارتعاش را بالا می‌برد و باعث افزایش هزینه‌های تعمیرات و استهلاک خواهد شد. در نتیجه کنترل جریان در این کمپرسورها با سهولت کمتری انجام می شود.

### 16-2-2- کمپرسورهای جریان محوری (Axial Flow compressors)

این کمپرسورها نیز مانند کمپرسورهای سانتریفوژ یک قسمت چرخان (Rotor) دارند که سرعت سیال را بالا می‌برد اما برخلاف کمپرسورهای سانتریفوژ که جریان به صورت شعاعی می‌باشد، جریان به صورت موازی با محور کمپرسور حرکت می کند. ساختمان این نوع کمپرسورها به صورتی است که نصف فشار گاز در قسمت چرخان (Rotor) و نصف دیگر در قسمت ثابت (Stator) تولید می شود. پره‌های ثابت شده بر محور چرخان به ترتیب از قسمت مکش تا خروجی کمپرسور کوچکتر گشته و باعث بالا رفتن فشار ساکن ( static pressure) وانرژی جنبشی (kinetic Energy) گاز می‌شود. سیستم روغن‌زنی و سیستم کنترل جریان در سرعتهای مختلف در این کمپرسورها دقیقا شبیه کمپرسورهای سانتریفوژ است.

شکل 16-4- شبیه‌سازی ساده‌ای از نحوه حرکت سیال در کمپرسور جریان محوری

#### 16-2-2-1- مزایای کمپرسورهای جریان محوری

این نوع کمپرسورها اخیرا مصرف صنعتی زیادی پیدا کرده و برای حجم های خیلی بالا حتی تا 860000 فوت مکعب در دقیقه مناسب‌ترین کمپرسور می‌باشد. در مقام مقایسه با کمپرسورهای سانتریفوژ برای فشردگی یک حجم معین گاز قطر چرخان (Rotor) کمپرسور جریان محوری نصف قطر پروانه کمپرسور سانتریفوژ خواهد بود. اگر کمپرسور جریان محوری خوب طراحی و ساخته شود، سرعت گازمی تواند به ft/s400 در خروجی برسد. هزینه اولیه ساختن یک کمپرسور جریان محوری با هزینه اولیه ساختن یک کمپرسور سانتریفوژ برای انجام کار معین برابر است، ولی هزینه نیروی محرکه کمپرسور جریان محوری کمتر از هزینه نیروی محرکه

کمپرسور سانتریفوژ می‌باشد. یعنی اینکه برای یک کار معین، کمپرسور جریان محوری توربین یا موتور برقی کوچکتری نیاز دارد که این خود باعث کم شدن هزینه های بعدی می گردد.

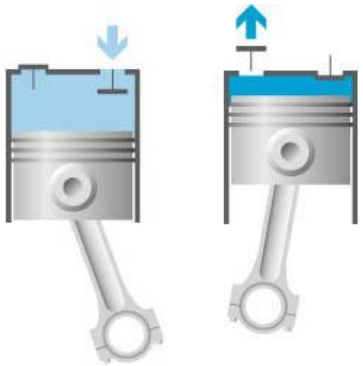
### 16-2-2-2- معایب کمپسورهای جریان محوری

اگر چه این کمپرسورها برای جریانهای بالاتری نسبت به کمپرسورهای سانتریفوژ استفاده می شود اما ارتفاع فرستادن گاز در این کمپرسورها خیلی پایین است و تقریبا کمتر از نصف کمپرسورهای سانتریفوژ می‌باشد که به معنی این است که فشار خروجی در این نوع کمپرسورها خیلی کمتر از کمپرسورهای سانتریفوژ است. مثلا برای رسیدن به فشار 65 psig به دوازده مرحله فشرده کردن گاز نیاز است که این خود باعث افزایش حجم اشغال شده توسط کمپرسور و سایر هزینه ها می شود. با توجه به موارد ذکر شده نتیجه می‌شود این کمپرسورها راندمان کمتری نسبت به کمپرسورهای سانتریفوژ دارند.

### 16-2-3- کمپرسورهای رفت و برگشتی (Reciprocating Compressors)

این کمپرسورها را می‌توان به هر اندازه که مورد احتیاج باشد، ساخت. نوع یک مرحله‌ای آن با حرکت رفت پیستون فشار گاز را از مکش تا خروجی بالا می برد. اساس کار این کمپرسورها حرکت یک پیستون داخل یک سیلندر است که با کاهش حجم گاز، فشار آن را بالا می برد.

کمپرسورهای رفت و برگشتی یک مرحله‌ای را بیشتر برای فشار بین 100 تا 150 psig به کار می‌برند. از کمپرسورهای دو یا چندمرحله‌ای زمانی استفاده می‌شود که فشار خیلی بالا (مثلا 600 psig) مورد احتیاج باشد، اما با توجه به افزایش درجه حرارت گاز به هنگام فشرده شدن در کمپرسورهای چند مرحله‌ای، بعد از هر مرحله از یک خنک کننده استفاده می‌شود تا درجه حرارت گاز را برای مرحله بعدی پایین بیاورد. چون حرکت گاز در خروجی این کمپرسورها به طور یکنواخت صورت نمی‌گیرد، در هر حرکت رفت پیستون، به خروجی کمپرسور ضرباتی وارد می‌گردد. برای جلوگیری از این ضربات و یکنواخت کردن جریان تدابیر مختلفی به کار می‌رود که مهمترین آنها عبارتند از:



شکل 16-5- مسیر ورود و خروج گاز

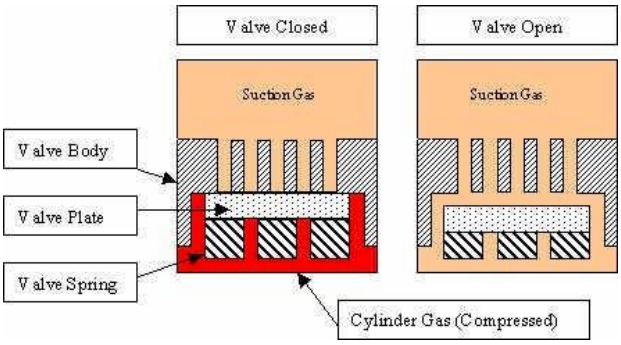
1- دو ضربه‌ای کردن پیستون، یعنی اینکه پیستون هم در حرکت رفت و هم در حرکت برگشت مقداری گاز فشرده به خروجی مشترکی وارد نماید.

2- به کار بردن ضربه‌گیر یا خفه‌کن (Damper):

ضربه‌گیرمخزنی است که به طور وارونه در خروجی کمپرسور (اگرچندمرحله‌ای باشد در خروجی هر مرحله یک ضربه‌گیر) کار گذاشته می‌شود. اساس کار ضربه‌گیر بر پایه انبساط و انقباض گازی که وارد آن می‌شود استوار است یعنی اینکه در حرکت رفت پیستون گاز درون ضربه‌گیر فشرده می‌شود و در حرکت برگشت پیستون به علت افت فشار درخروجی کمپرسور، گاز منقبض شده درون ضربه‌گیر، منبسط شده، از آن خارج شدن وارد لوله خروجی کمپرسور می‌شود.

### 16-2-3-1- مزایای کمپرسورهای رفت و برگشتی

هنگامی‌که احتمال تغییر وزن مولکولی گاز ورودی به تاسیسات وجود دارد، از این کمپرسورها استفاده می‌شود به علت اینکه در این کمپرسورها عمل تراکم حساسیت زیادی به وزن مولکولی ندارد، این کمپرسورها در مورد گازهای همراه با نفت (Associate gas)، مناسب می‌باشند. این کمپرسورها راندمان بالاتری نسبت به کمپرسورهای سانتریفوژ دارند، اما دارای سرعت کمتری نسبت به سایر کمپرسورها هستند. لذا بدون احتیاج به




شکل 16-6- مراحل فشردگی گاز در کمپرسور پیستونی

جعبه‌دنده به طور مستقیم می‌توانند به موتور الکتریکی متصل گردند. برای شروع حرکت نسبت به سایر انواع کمپرسورها توان کمتری لازم دارند. همچنین زمانی که میزان گاز کم باشد، نسبت به انواع دیگر ارجح هستند.

### 16-2-3-2- معایب کمپرسورهای رفت و برگشتی

همانطورکه قبلا ذکرشد این کمپرسورها جریان یکنواختی در خروجی ندارند و این می‌تواند ضرباتی به سیستم وارد کند. علاوه بر این کمپرسورهای رفت و برگشتی نسبت به نوع دورانی حجیم‌تر وسنگین‌تر هستند و نیاز به فونداسیون قویتری نیز دارند.

کمپرسورهای رفت و برگشتی دارای قطعات متحرک بیشتری نسبت به دیگر کمپرسورها هستند. در نتیجه هزینه‌های تعمیر، نگهداری و استهلاک بیشتری دارند. میزان ارتعاش این نوع کمپرسورها نیز نسبت به انواع دیگر بیشتر است .

## 16-3- موارد و نکات مهم درکاربرد کمپرسورها

اولین نکته‌ای‌که باید به آن توجه شود وجود ذرات خارجی درگاز ورودی به کمپرسورها است. این ذرات در کمپرسورهای سانتریفوژ و جریان محوری باعث وارد کردن ضرباتی به قسمت چرخان کمپرسور (پروانه) می‌شود. در نتیجه قبل از ورود گاز به کمپرسور آن را از فیلترهایی عبور می‌دهند تا ذرات زاید خارجی گرفته شود.

نکته دیگر در موردکمپرسورها نشت گاز از کمپرسور است که این در مورد گازهای سمی اهمیت به سزایی پیدا می‌کند. برای جلوگیری از این امر قطعه ای در کمپرسورتعبیه شده است به نام (Stuffing Box) که اطراف محور پمپ را آب‌بندی می‌کند. قدیمی‌ترین روش برای آب‌بندی، کارگذاشتن لایی در اطراف محورگردان بوده، ولی امروزه ازآب‌بندهای مکانیکی (Mechanical Seal) استفاده می‌شود که احتیاج به لایی ندارد.

اشکال دیگری که ممکن است پیش بیاید افت فشارگاز خروجی ازکمپرسور است. هنگامی‌که سرعت گاز خروجی از کمپرسور خیلی پایین باشد در نتیجه گازی پره را ترک نمی‌کند و فشار خروجی می‌افتد در این مورد کمپرسور باید دوباره روشن شود تا چرخه دوباره تکرار شود.

# انواع کنترلر
# Controllers

## 17-1- سیر تحولات سیستمهای کنترلی

در آغاز سیستمهای کنترلیِ صنعتی، عموماً سیستمهای نیوماتیک( بادی) بودند که هم برای انتقال فرمانها (سیگنالها) و هم برای تنظیم شیرکنترل مورد استفاده قرار می‌گرفتند. سیگنالهای نیوماتیک همگی فشاری هستند و با فشاری بین 3 تا 15 psi قادر به تنظیم فرمانها می‌باشند.

سیستمهای نیوماتیک با وجود ایمنی زیاد( به خاطر استفاده از هوا) دارای مشکلات فراوانی می‌باشند. زیرا تمامی قسمتهای سیستم مکانیکی هستند و اصطکاک زیاد و به هم خوردن کالیبراسیون همواره برای واحدهای صنعتی ایجاد مشکل می‌کنند. مشکل مهم این سیستمها هنگام انتقال سیگنالها و (فرمانها) از قسمت دستگاهها تا اتاق کنترل می‌باشد که زمان طولانی احتیاج دارد و مشکلات زیادی برای کنترل سیستم به وجود می‌آورد.

در دهه60 به علت مشکلات به وجود آمده توسط سیستمهای کنترلی بادی و همگام با گسترش صنایع الکترونیکی مهندسان به استفاده بیشتر از تجهیزات الکتریکی روی آوردند. در این زمان با استفاده از قطعات الکترونیکی مثل مقاومت، دیود و سلف تواستند سیگنالهای الکتریکی را جهت تنظیم و کنترل به کار گیرند. مزایای استفاده از چنین سیستمهایی عبارتند از

- ارزانتر بودن نسبت به سیستمهای نیوماتیک
- نداشتن تاخیر زمانی

با وجود این مزیتهای مهم به علت مسائل ایمنی، در ابتدا این صنعت زیاد مورد استقبال قرار نگرفت . اما مشکل جرقه زدن با استفاده از short circuit حل شد و پس از آن به سرعت وارد صنعت گردید.

در این زمان شیرهای کنترلی جدیدی به نام شیرهای موتوری وارد بازار شدند که دقت زیادی داشتند اما به علت دینامیک کند مورد استقبال قرار نگرفتند. عمدتاً ثابت زمانی شیرهای کنترلی موتوری در حد چند دقیقه می‌باشد در حالیکه ثابت زمانی شیرهای کنترلی بادی در حد چند ثانیه می‌باشد.

با توجه به دینامیک سریع شیرکنترل های بادی و مزایای سیستمهای کنترل الکترونیکی در این دهه دستگاهی به نام I to P convector به بازار عرضه شد. I to P این اجازه را به طراح می دهد که تا سر شیر کنترل تمامی فرمانها الکترونیکی باشند و درست در بالای شیر کنترل با استفاده از یک I to P این فرمانهای الکتریکی به فرکانسهای نیوماتیک تبدیل می‌گردند.

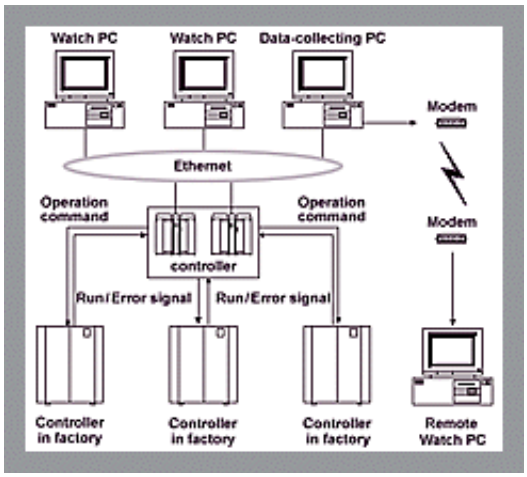
در دهه 70 عمده تحولات در بخش کنترل به وجود آمد و پس از مدتی وسایل اندازه گیری پیشرفته نیز عرضه شد. این بار میکروپروسسور به جای قطعات الکتریکی همچون مقاومت دیود و سلف به کار گرفته شد. مزایای میکروپروسسور عبارتند از:

- ارزانتر بودن
- قابلیت محاسبه با سرعت بسیار زیاد
- به کارگیری تنظیم کننده خودکار (Auto tuner mode)

شکل 17-1- اتاق کنترل یک سیستم کنترلیِ دیجیتال

در دهه 80 با استفاده از یک کامپیوتر قوی تحول عمده ای در صنعت کنترل صورت گرفت. تا قبل از استفاده از سیستم های DCS هر حلقه کنترلی با یک میکروپروسسور کنترل می شد اما پس از ابداع DCS کل plant با استفاده از یک میکروپروسسور قوی کنترل می شود.

تنها مشکل DCS این است که اگر میکروپروسسور از کار بیفتد تمامی plant به تبع آن از کار می‌افتد. در نیمه این دهه با قسمت کردن plant تا حدود زیادی مشکل حل شد اما از آنجا که هر قسمت یک میکروپروسسور لازم دارد، هزینه کنترل بالا رفت. امروزه جهت مقابله با این مشکل از دو میکروپروسسور به صورت موازی استفاده می شود. یعنی کل plant با دو میکروپروسسور کنترل می شود. این عمل بدین صورت است که هر دو میکروپروسسور ورودی دارند و محاسبات را همزمان انجام می دهند اما تنها یکی از این دو خروجی دارد و دیگری در حالت آماده به کار (Stand By) می باشد تا اگر میکروپروسسور اول از کار افتاد (fail کرد) سریعا دومی در همان لحظه وارد عمل گردد.



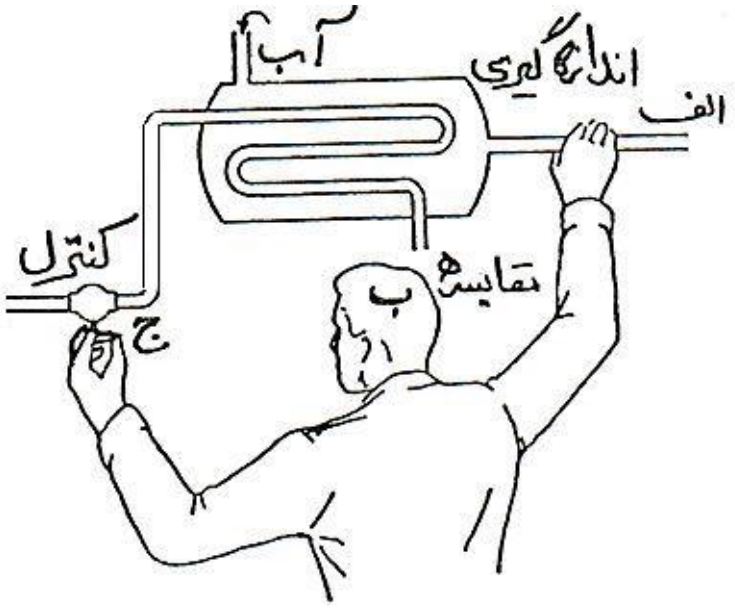

شکل 17-2- نمایی از نحوهٔ کنترل فرآیند توسط سیستم DCS

شکل 17-3- اتاق کنترل یک سیستم DCS

## 17-2- شرح و توصیف

هدف از کنترل، تنظیم فرایند درشرایط مورد نظر است. در ابتدا جهت آشنایی با برخی از مفاهیم کنترل فرایند به شکل ساده‌ای از کنترل یک فرایند می‌پردازیم. فرایند مورد نظر برای گرم کردن آب(توسط یک سیال داغ) بکار رفته است.

نحوه عمل بدین صورت است که ابتدا آب وارد یک مخزن به عنوان آب‌گرمکن می‌شود و توسط یک کویل حرارتی (لوله‌هایی که در آن یک سیال داغ وجود دارد) آب گرم می‌شود.




شکل 17-4- نمایی از نحوهٔ کنترل فرآیند توسط مسئول

الف) اندازه‌گیری:

توسط مسئول دستگاه و با استفاده از لمس نمودن آب خروجی از آب‌گرمکن میزان گرم یا سرد بودن آب اندازه‌گیری می‌شود.

ب) مقایسه:

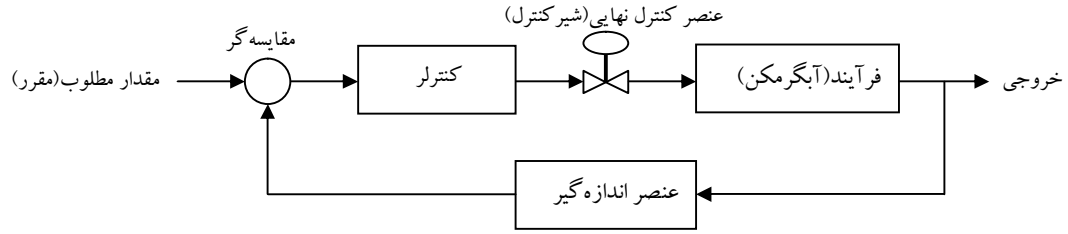
مسئول دستگاه، میزان گرمی آب خروجی را با میزان گرمی مطلوب( آنچه باید باشد) در ذهن مقایسه می‌کند.

ج) کنترل:

حال با توجه به مقایسه صورت گرفته و متناسب با میزان دوری از حالت مطلوب، شیر "ج" را باز یا بسته می‌نماید و سعی می‌نماید اختلاف دمای موجود را کاهش دهد.

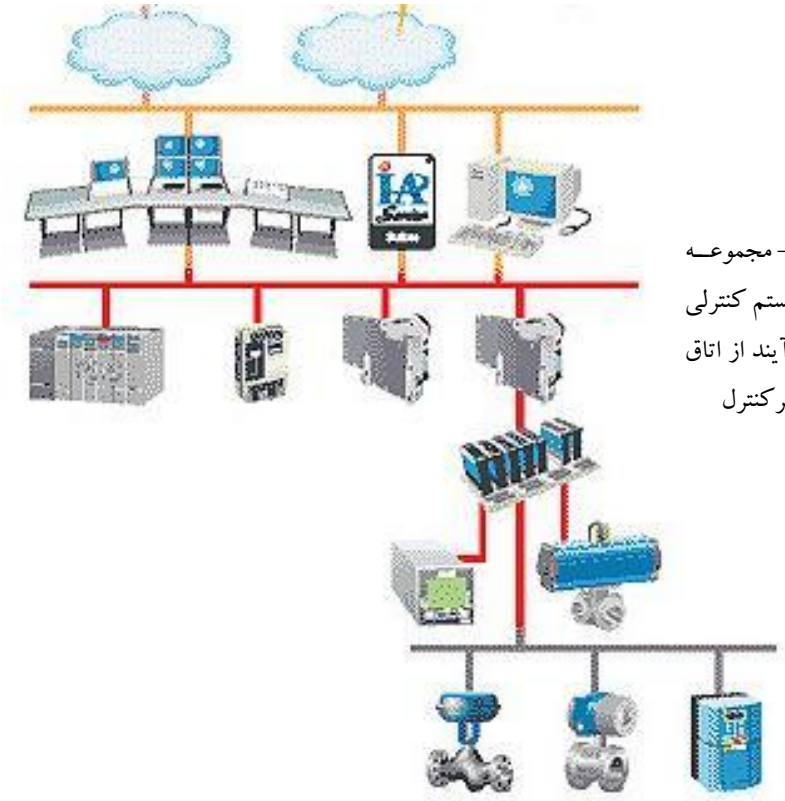
این مجموعه عملیات الف-ب-ج آنقدر ادامه می‌یابد تا در نهایت میزان گرمی آب خروجی برابر مقدار مطلوب شود. این مثال ساده اساس کار یک کنترلر متداول می‌باشد اما مسلم است که در صنعت هیچگاه از یک شخص به طور مستقیم و مداوم نمی‌توان استفاده کرد.

برای درک بهتر و راحت‌تر کردن محاسبات هیچگاه از شکل فوق استفاده نمی‌شود و بجای آن از نمودار جعبه‌ای به شکل زیر استفاده می‌شود.




شکل 17-5- نمودار جعبه‌ای

سیستم کنترل نشان داده شده در شکل، سیستم مدار بسته (Closed loop system) و نیز سیستم پس خور (feed back system) نامیده می‌شود زیرا مقدار اندازه‌گیری شده متغیر کنترل شونده(دمای آب) به مقایسه‌کننده پس خورانیده(feed back) می‌شود. در مقایسه‌گر ، متغیر کنترل شونده با مقدار مطلوب(مقدار مقرر) مقایسه می‌شود و اگر اختلافی بین مقدار متغیر اندازه‌گیری شده و مقدار مطلوب موجود باشد توسط مقایسه‌گر، خطا (error) ایجاد می‌شود و به کنترلر (Controller) فرستاده می‌شود. حال کنترلر با توجه به خطای ورودی تنظیمات لازم را برای شیر کنترل( عنصر کنترل نهایی) ارسال می‌کند. حال دوباره اندازه‌گیر( مثلاً دماسنج) با اندازه‌گیری‌هایی که از سیستم به عمل می‌آورد برای مقایسه‌کننده مشخص می‌کند که آیا به مقدار مطلوب رسیده‌ایم یا خیر و پس از آن مجموعه مراحل فوق دوباره تکرار می‌شود.



شـکل 17-6- مجموعـه مراحل یک سیستم کنترلی برای کنترل فرآیند از اتاق کنترل تا سر شیرکنترل

## برخی مفاهیم اساسی در بحث کنترل:

- **متغیرهای کنترلی:** در بحث کنترل فرایند، متغیرهای کنترلی عبارتند از 1-دما 2-فشار 3- جریان 4- سطح

- **اندازه‌گیری**: عمل اندازه‌گیری توسط عنصر اندازه‌گیرِ متغیرهای کنترلی در یک فرایند( 4 مورد فوق) صورت می‌گیرد. چگونگی اندازه‌گیری و دستگاههای مربوطه در ابزار دقیق به طور مفصل مورد بحث قرار گرفته‌اند.

- **مقایسه**: مقایسه توسط دستگاه مقایسه‌کننده صورت می‌گیرد. این مقایسه بین مقدار مطلوب(Set point) و کمیت اندازه‌گیری شده توسط عنصر اندازه‌گیر انجام می‌گیرد. قلم‌های ثبات در کنترل کننده‌های قدیمی این عمل را انجام می‌دهند و نتیجه را به صورت فاصله عقربه از مقدار مقرر برای کنترلر ارسال می‌کنند.

- **کنترلر**: با توجه به خطای (error) فرستاده شده از مقایسه‌گر فرمان مقتضی را برای شیر کنترل ارسال می‌کند. مثلاً در مرسوم‌ترین نوع کنترلر که کنترلر PID(Proportional Integral Differential)می‌باشد فرمان ارسال شده به صورت سیگنالهای الکتریکی یا بادی می‌باشد.

- **فرمان(Signal)**: پس از اندازه‌گیری تغییرات مشاهده شده در فرایند باید این تغییرات را به طریقی به سایر قسمتها منتقل کرد. در یک مدار کنترل از یکی از فرمانهای زیر استفاده می‌شود.

1- ***فرمان برقی:*** فرمان برقی بیشتر برای مسافت‌های دور مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثلاً برای فرستادن فرمان از اتاق کنترل تا سر شیرکنترل یا از وسایل اندازه‌گیری تا اتاق کنترل.

2- ***فرمان بادی:*** در فواصل کوتاه برای انتقال تغییر روند از فرمان هوایی استفاده می‌گردد. در بعضی شرایط بجای هوا ازگازها و یا مایعات (هیدرولیکی) نیز استفاده می‌گردد. به علت سرعت بالای تغییرات در شیر کنترل از فرمان بادی به صورت هوای فشرده استفاده می‌گردد. بدین ترتیب از اتاق کنترل تا سر شیر کنترل فرمان به صورت الکتریکی و برای سرعت بخشیدن به دینامیک سیستم از هوای فشرده جهت باز و بسته شدن اکثر شیرهای کنترلی استفاده می‌شود. البته گاهی اوقات شیر کنترل با موتور الکتریکی به حرکت در می‌آید که همانطور که گفته شد سرعت پایینی دارد.

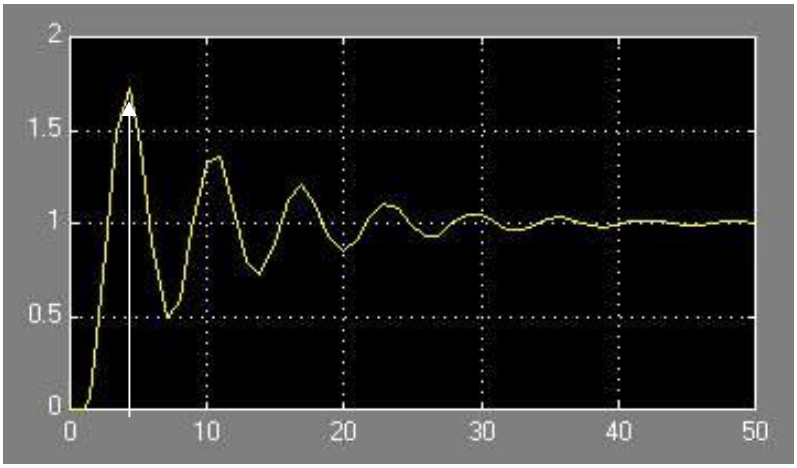
3- ***فرمان مکانیکی:*** این نوع فرمان در داخل ابزار دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد و در مدار کنترل استفاده نمی‌شود.

- **فرایند:** دستگاه یا مجموعه دستگاه‌هایی که باید در حد شرایط مورد نظر کنترل شوند را فرایند گویند.
- **پس‌خور:** اغلب راهکار تنظیم یک فرایند به صورت پس‌خور می‌باشد یعنی پس از آنکه تغییرات توسط کنترلر به سیستم اعمال شد، به صورت مستمر متغیرهای سیستم(فرایند) اندازه‌گیری می‌شوند و به مقایسه‌گر پس‌خورانیده می‌شوند تا آنکه خطا صفر شود.
- **حالت یکنواخت:** یک فرایند را هنگامی می‌توان در حالت یکنواخت نامید که هیچ‌یک از متغیرها با گذشت زمان تغییر نکند. در اکثر فرایندهای صنعتی تمامی دستگاهها باید حول یک نقطه ثابت که طراحی شده‌اند کار کنند که نقطه یکنواخت نامیده می‌شود.
- **اغتشاش و بار:** معمولاً فرایندها همیشه در یک نقطه مشخص که طراحی شده‌اند عمل نمی‌کنند. این موضوع به علت نویزها می‌باشد. به عنوان مثال غلظت یا دبی خوراک ورودی به یک واحد ممکن است همواره تغییر کند. اگر اغتشاش ورودی به فرایند قابل اندازه‌گیری باشد و به نوعی بتوان آنرا مدل کرد آنرا بار (load)می‌نامند. راهکارهای زیادی جهت مبارزه با نویزها و بارها وجود دارد.
- **تاخیر زمانی(Lag):** در اکثر فرایندهای صنایع شیمیایی همواره یک تاخیر زمانی بین ورودی و خروجی وجود دارد. در ساده‌ترین مورد هنگامی که یک سیال از لوله عبور می‌کند هیچگاه به محض ورود به لوله از سوی دیگر خارج نمی‌شود. یعنی مدت زمانی به اندازه زمانیکه لازم است تا لوله با سیال ورودی پر شود لازم است تا اثر ورود سیال در خروجی ظاهر شود. این پدیده را تاخیر زمانی یا Lag می‌گوییم. به عنوان مثال اثر تغییر در شرایط خوراک ورودی به یک دستگاه تقطیر ممکن است دهها دقیقه به طول بیانجامد تا تاثیر آن در محصول تقطیر شده خروجی از بالای برج مشخص گردد.

## 17-3- طراحی کنترلر

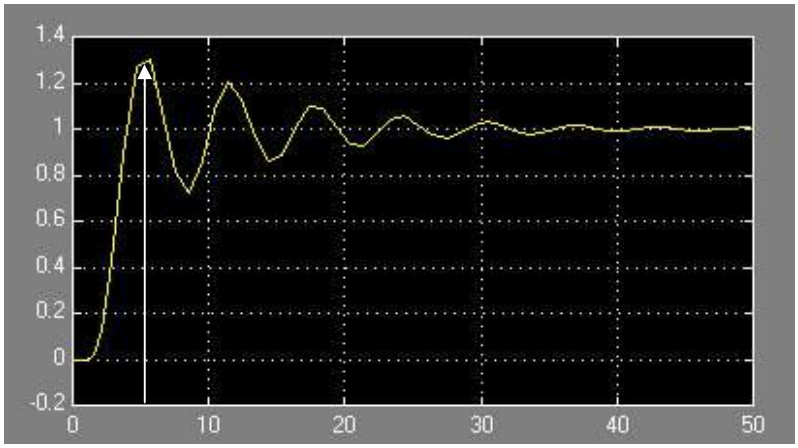
در حالت کلی به سه منظور کنترلر طراحی می‌گردد:

1- اگر سیستم خیلی تند باشد و بخواهیم سرعت آنرا تعدیل کنیم. به عنوان مثال در مواردی سیستم بسیار حساس است و با یک تغییر کوچک عکس‌العمل‌های شدیدی ممکن است به شیر کنترل وارد کند که باعث استهلاک آن می‌گردد. در نتیجه بایدکنترلری طراحی شود تا مانع از عکس‌العمل‌های شدیدِ شیرکنترل شود. در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم یک دینامیک در سیستم وارد کرده‌ایم.




الف

2- گاهی سیستم مورد نظر بسیار کند است و می‌خواهیم سیستم سریعتر به جواب برسد. در اینحالت باید مدار کنترلی بخشی از دینامیک فرایند را خنثی سازد. این کار با مدلسازی فرایند و حذف دینامیک سیستم تا جای ممکن عملی می‌شود.




ب

شکل 17-7- الف. یک سیستم درجهٔ دوکه خروجی شدیدی دارد.
ب. پس از قراردادن یک دینامیک در سیستم پاسخ تعدیل شده است.

3- سیستم ناپایدار است و باید پایدار شود. بحث پایداری مهمترین بحث طراحی کنترلر می‌باشد و تمامی سیستمها باید به دقت مورد مطالعه واقع شوند تا ببینیم سیستم پایدار است یا خیر. در صورت پایداری باید با الگوریتم‌های موجود آنرا پیاده‌سازی کنیم. حتی اگر سیستم پایدار باشد باید مواظب باشیم تا پس از بستن مدار و طراحی کنترلر سیستم ناپایدار نگردد. در هنگام طراحی از این عامل به عنوان یکی از پارامترهای طراحی استفاده می کنیم.

## 17-4- تنظیم کنترلر

در تنظیم کنترلر همواره دو عامل در نظر گرفته می‌شود:

### 17-4-1- پایداری

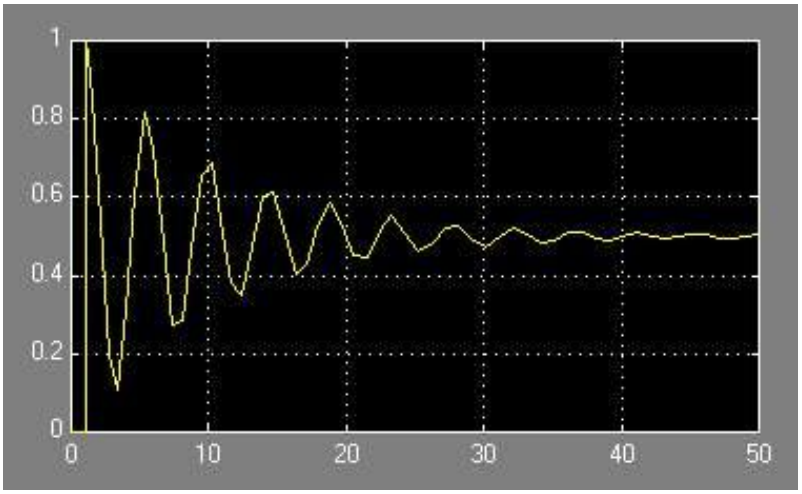
در بحث طراحی کنترلر یکی از مهمترین قسمت‌ها بررسی پایداری سیستم می‌باشد. یک سیستم هنگامی پایدار است که اگر یک ورودی محدود به سیستم وارد شود پس از مدت زمان معینی خروجی محدود بماند. به عنوان مثال اگر یک تغییر در دما یا دبی ورودی راکتور به وجود بیاید پس از یک مدت زمان معین انتظار آنست که شرایط عملیاتی راکتور و کیفیت محصول خارج شده مقدار معینی باشد نه آنکه پس از مدتی راکتور از کنترل خارج شود و مثلاً منفجر گردد. هنگام تنظیم کردن؟"tune"کنترلر باید متوجه موضوع پایداری بود.

### 17-4-2- عملکرد کنترلر

در بحث عملکرد کنترلر معمولاً چند عامل در نظر گرفته می‌شوند و سعی طراح بر آن است که کنترلر را طوری تنظیم کند که به بهترین جواب برسد. برخی از مهمترین پارامترهایی که در تنظیم
عملکرد کنترلر در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از :

- *سرعت رسیدن به جواب نهایی*
- *آفست یا خطای ماندگار* در برخی از سیستم‌ها به وجود می‌آید و باعث می‌شود که سیستم هیچگاه به جواب نهایی نرسد و تنها در حدود جواب نهایی قرار گیرد. معمولاً در طراحی‌ها سعی می‌شود مقدار انحراف به حداقل برسد.
- *اورشوت*: در برخی سیستمها به وجود می‌آید. در این حالت سیستم در لحظه‌ای که ورودی به آن وارد می‌شود عکس‌العمل شدیدی نشان می‌دهد. این موضوع باعث بالا رفتن سرعت رسیدن به جواب نهایی می‌شود. اما از طرف دیگر باعث استهلاک کنترلر و خراب شدن محصولات نیز می گردد. میزان اورشوت باید بهینه باشد(شکل 17-7-الف).
- *انتگرال خطا:* سطح زیر نمودار می‌باشد. مشخص است که هرچه این سطح کوچکتر باشد کنترلر عملکرد بهتری دارد.

عموماً در طراحی دو عامل پایداری و عملکرد با هم در تقابل می‌باشند. بدین معنا که غالباً به خاطر پایداری باید مقداری از کیفیت عملکرد سیستم بکاهیم. به عنوان مثال برای اینکه سیستم معیار پایداری بهتری داشته باشد خصوصاً در مقابل خطای مدلسازی مقاومت نشان دهد و اصطلاحاً "Robust" باشد مجبوریم از سرعت دینامیکی سیستم بکاهیم و به نوعی مانع از ورودی‌های شدید به سیستم شویم . در تنظیم کنترلر معمولاً از روشها و جداول استاندارد استفاده می‌شود. یکی از مهمترین این روشها تنظیم کنترلر با روش زیگلر-نیکولز می‌باشد که با رجوع به جداول مربوطه می‌توان کنترلرهای PID را تنظیم کرد.




شکل 17-8- نمودار خطا بر حسب زمان (برای سیستم شکل 6.) هر قدر سطح زیرنمودار کمتر باشد، سیستم بهتر عمل می‌کند

## 17-5- روش‌های مهم در طراحی کنترلر

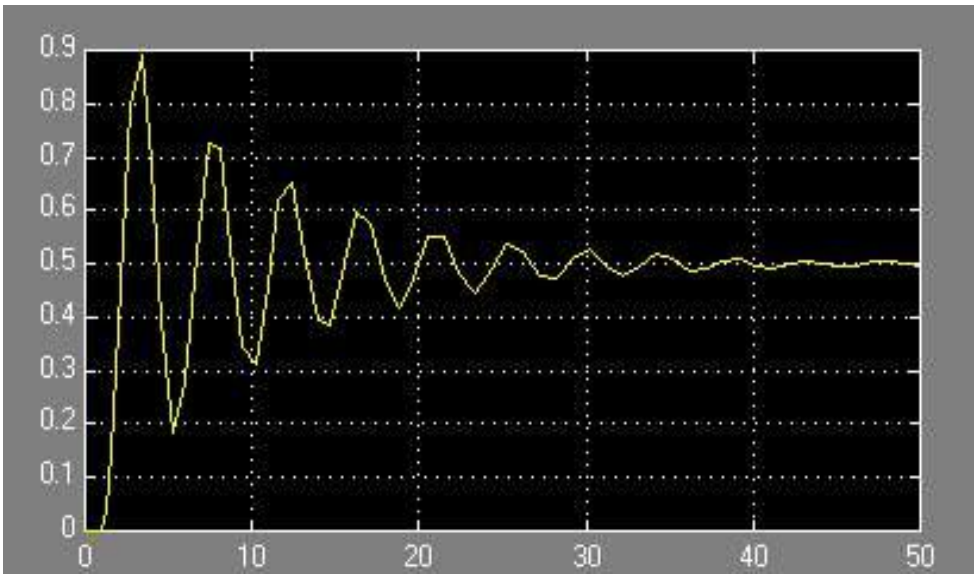
### 17-5-1- سیستم مدار بسته (Closed loop system)

این روش طراحی، مهمترین روش کنترل کردن سیستمهای کنترلی می‌باشد. در مورد این روش در ابتدای این بخش توضیحات کافی داده شده است. به طور کلی مبنای این روش استفاده از اطلاعات فرایند و مقایسه آن با مقدار مطلوب می‌باشد. سپس بر اساس دوری و نزدیکی از مقدار مطلوب (set point) کنترلر عکس‌العمل‌های مقتضی را صادر می‌کند(رجوع شود به شکل 17-5).

یکی از اثرات مهم سیستم مدار بسته کاهش حساسیت می‌باشد اما با عدم قطعیت سیستم به خوبی مقابله می‌کند. نکته مهم آنکه در اکثر الگوریتم‌های کنترلی در نهایت پس از انجام همه مراحل سیستم را مدار بسته نیز می‌کنند. در روش کنترل پیش‌خور بیشتر راجع به این موضوع بحث خواهیم نمود.

## 17-5-2- کنترل پیش‌خور (Feed Forward)

جهت مقابله با اثرات بار( Load یا اغتشاشات قابل اندازه‌گیری) از این روش استفاده می‌شود. مبنای این روش رساندن اطلاعات مربوط به اغتشاش ورودی در همان لحظات اولیه به کنترلر می‌باشد تا کنترلر اثر بار ورودی را در همان ابتدا خنثی سازد.



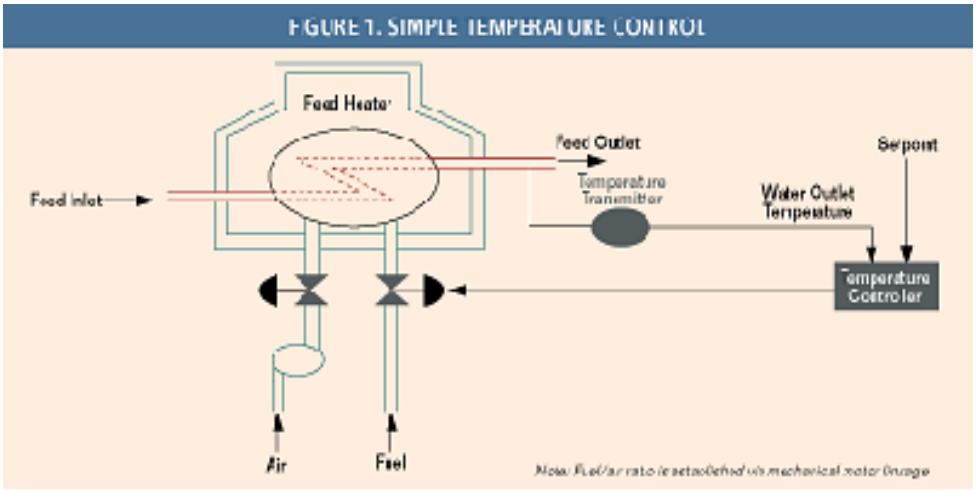

شکل 17-9- پاسخ مدار بستهٔ سیستم (شکل 7) . پس از بستن مدار و ورودی پله در خروجی 50٪ آفست داریم که نشان میدهد کنترلر باید بهتر تنظیم شود.

جهت روشن شدن موضوع یک گرم‌کنندهٔ‌خوراک را مطابق شکل زیر در نظر بگیرید.در این فرآیند می‌خواهیم دمای خروجی جریان خوراک از گرمکن را توسط تغییر در شدت جریان سوخت ورودی به گرمکن کنترل کنیم. یک مدارکنترل پس‌خور ساده نمی‌تواند به طور مناسب عمل کنترل را انجام دهد، زیرا جریان خوراک عملاً دارای نوسانات فشار و دبی می‌باشد.

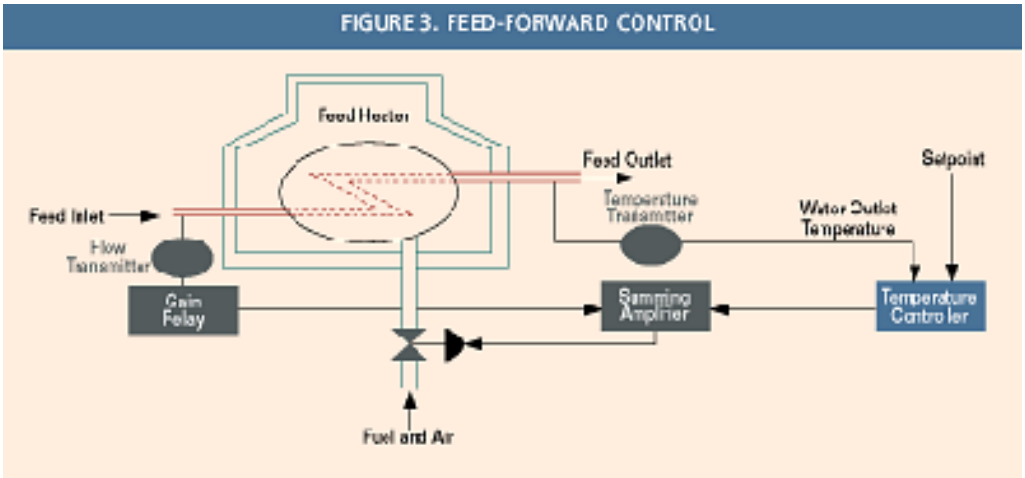
با قراردادن یک اندازه‌گیرِجریان روی وروردی خوراک (بار) می‌توان (شکل 17-11) عملکرد سیستم را به‌طور قابل توجهی بهبود داد.دقت شو دکه تمام عملیات تنها با یک شیر کنترل، تنظیم می‌شود.

## 17-5-3- کنترلر"Feed Forward/Feed Back"

همانطور که گفته شد پس از طراحی کنترلرها عموماً سیستم را مدار بسته می‌کنند. یعنی پس از اینکه سعی شد اثر بار ورودی با پیش‌خور خنثی شود سپس با مدار پس‌خور فرایند کنترل می‌شود تا مشخص شود سیستم به جواب مورد نظر رسیده یا نه(شکل فوق). علت این موضوع آنست که ما در مدلسازی سیستمهای فرایندی همواره با خطا روبرو هستیم که با سیستم مدار بسته این اثرات را خنثی می‌کنیم. البته شاید این سوال پیش بیاید




شکل 17-10- فرآیند گرم‌کنندهٔ خوراک. با یک کنترل پس‌خور به‌تنهایی نمی‌توان دمای خروجی را به طور مناسب کنترل کرد




شکل 17-11- با اندازه گیری load (جریان خوراک) می‌توان سرعت وعملکرد سیستم را بهبود داد.

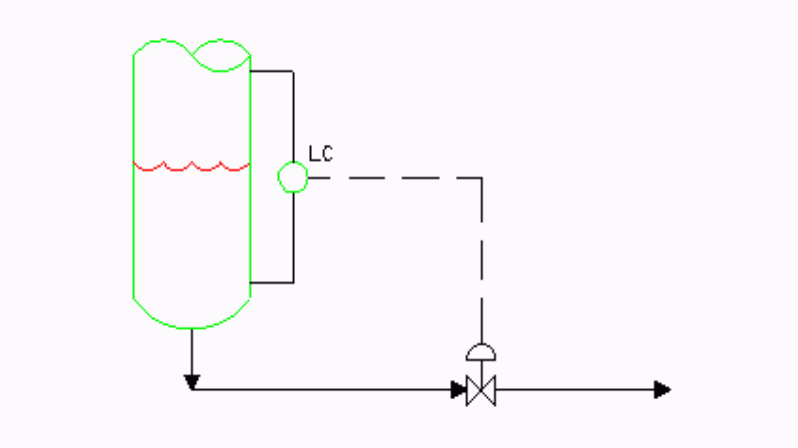
که پس حالا که از مدار پس، دیگر چه نیازی به مدار پیش‌خور است. جواب این سوال آنست که با مدار پیش‌خور تا حد بسیار خوبی می‌توان عملکرد سیستم را بهبود بخشید و با اثرات load مقابله کرده و از طرفی با استفاده از مدار پس‌خور، سیستم را مقاوم (Robust) کرد تا کنترلر با اثرات خطای مدلسازی مقابله کند. در نتیجه سیستم کنترلی خیلی بهتر عمل خواهد کرد.

## 17-5-4- کنترل زنجیره‌ای (Cascade)

برای مقابله با اثر نویز(noise) در اغتشاشاتی که به سیستم وارد می‌شود و کثیرالاتفاق می‌باشند از این روش کنترلی استفاده می‌شود.

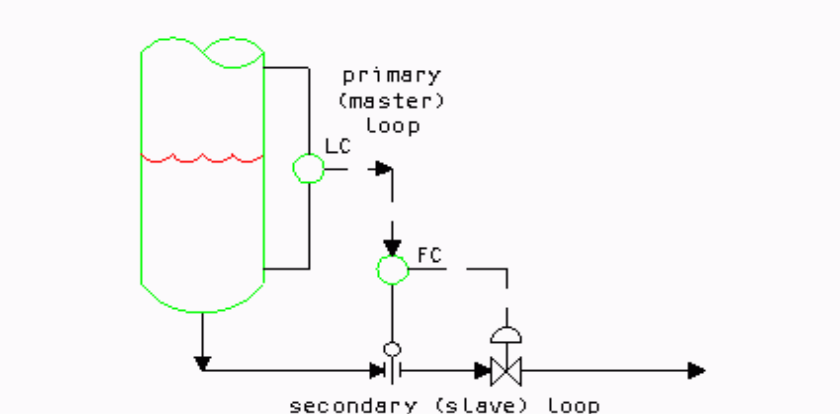
در این حالت یک وسیله اندازه‌گیری در قسمتی که اغتشاش وارد می‌شود قرار می‌دهیم و سعی می‌کنیم عمل کنترل سیستم را تنها با یک شیر کنترل انجام دهیم. با مثال زیر علت گذاشتن کنترل Cascade مشخص می‌شود.

در یک ستون تقطیر عموماً جهت تنظیم سطح در ته برج از این روش استفاده می‌شود. در شکل 17-12 کنترل سطح با یک مدار پس خور ساده نشان داده شده است. به‌علت تغییرات ارتفاع(فشار)جریان خروجی از لولهٔ پایین آورنده دارای اغتشاش زیادی می‌باشد که برکاهش عملکرد شیرکنترل تاثیر زیادی می‌گذارد و باعث می‌شود زمان زیادی طول بکشد تا کنترلر بتواند با هر تغییر روی سیستم مقابله کند.



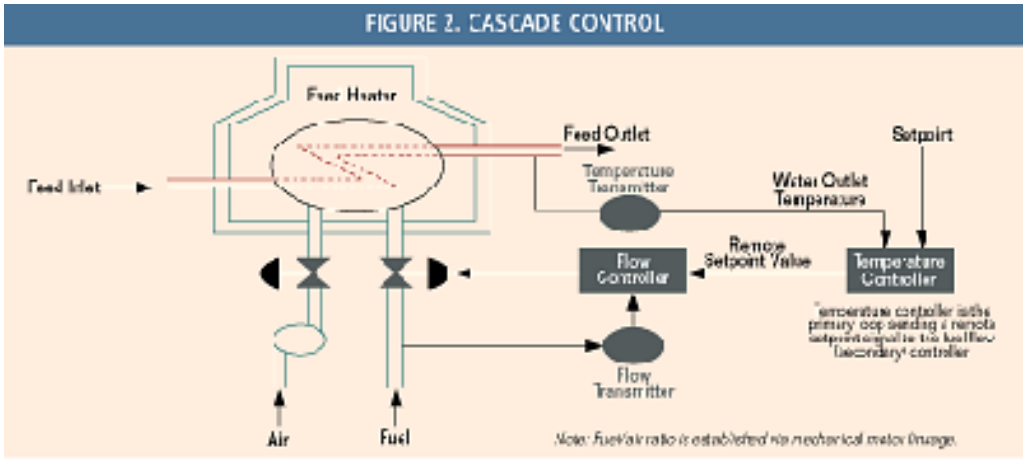

شکل 17-12- کنترل پس‌خورِ سطح یک ستون تقطیرتنها با استفاده ه از اندازه‌گیری

برای بهبود سرعت عملیات کنترل باید از یک کنترل cascade استفاده کرد(شکل 17-12). در این صورت با قرار دادن یک اندازه‌گیرِ جریان، سرعت کنترل پنج برابر افزایش می‌یابد. مدار LC را حلقهٔ اولیه یا ارباب(master) و مدار FC راحلقهٔ ثانویه یا بَرده(slave) گویند.




شکل 17-13- کنترلcascade سطح یک ستون تقطیر با استفاده ه از اندازه‌گیری سطح که با اندازه‌گیرِ جریان کوپل شده است.

برای آشنایی بیشتر با این الگوریتم کنترل، مدار شکل 17-10(گرمکن) را در نظر بگیرید. سوخت ورودی به گرمکن به علت تغییرات فشار دارای اغتشاش زیادی می‌باشد که عملکرد سیستم ر ا به شدت کم می‌کند و حتی ممکن است آنرا ناپایدار کند. برای بالا بردن عملکرد و مخصوصاً سرعت کنترل ا زیک کنترل cascade مطابق شکل 17-14 استفاده می‌شود. در این سیستم با قرار دادن یک سنسور و یک کنترلر دیگر با استفاده ه از




شکل 17-14- کنترلcascade برای مقابله با اثرات اغتشاش در جریان

یک شیر کنترل سیستم ر ا کنترل کرده‌ایم.کنترلر دمای جریان خوراک حلقهٔ اولیه می‌باشد که remote set point ر ا برای حلقهٔ ثانویه می‌فرستد.

به طور کلی یکی از مهمترین موارد کاربرد این نوع کنترلر در کنترل جریاناتی می‌باشد که از واحد utility می‌آید و تغییرات زیادی دارد در این حالت این جریان‌ها یک عامل اغتشاش می‌باشد و میزان ثابتی ندارد. اگر تغییرات این اغتشاش لحاظ نگردد مشکلات زیادی برای کنترل سیستم به وجود می‌آید و حتی ممکن است باعث ناپایداری فرایند گردد. در این حالت بهترین کار آنست که دما یا فشار این جریان‌ها کنترل گردند.

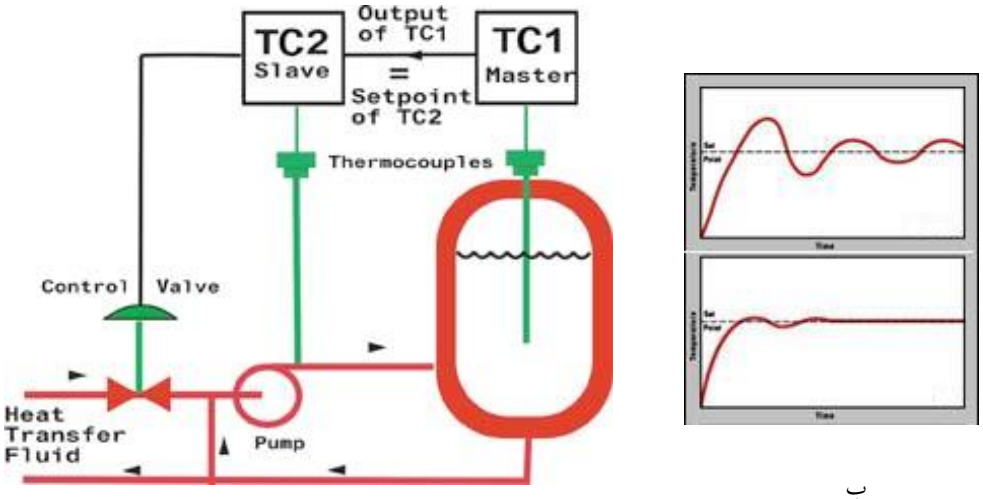
### 17-5-4-1- چند نکته در مورد کنترل زنجیره‌ای

به دلیل اهمیت و کاربرد گسترده این نوع کنترلر به توضیحات زیر لازم است توجه شود:

1- در صنعت اگر متغیر کنترلی، جریان باشد که دارای اغتشاش زیادی می‌باشد آنرا Cascade می‌کنند( معمولاً جریانهایی که از utility می‌آید).

2- این کنترلر در جایی استفاده می‌شود که بیش از یک بار (load) وجود دارد.

3- جهت تنظیم (tune) ابتدا باید کنترلر را روی وضعیت manual قرار داده و حلقه داخلی را تنظیم کرد سپس آنرا remote می‌کنیم و بعد از آن حلقه خارجی را تنظیم می‌کنیم.




الف

ب

شکل 17-15- الف. یک رآکتور با سیستم کنترل زنجیره‌ای(cascade)
ب. پاسخ سیستم به یک ورودی پله‌ای. پاسخ بالایی توسط یک مدارکنترل پس‌خور معمولی
پاسخ پایینی توسط یک مدار کنترل cascade