

## مخلوط‌کن‌ها و دستگاه‌های کاهش اندازه

- هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود بتواند:
- ۱- طرز کار انواع مخلوط‌کن‌ها و دستگاه‌های کاهش اندازه مواد را شرح دهد.
  - ۲- محدوده کاربرد هریک از این دستگاه‌ها را توضیح دهد.

همزدن عبارت است از ایجاد حرکت و آشفتگی در مایع یا جامد. یکی از اهداف همزدن، اختلاط دو یا چند ماده است. اختلاط می‌تواند به منظور انجام یک تغییر فیزیکی یا شیمیایی انجام شود. در اکثر صنایع شیمیایی و در بسیاری از صنایع دیگر از عملیات اختلاط استفاده می‌شود. در صنایع غذایی، دارویی، کاغذ، لاستیک، پلاستیک و حتی نفت و گاز و پتروشیمی این عملیات کاربرد دارد. در اغلب واکنش‌های شیمیایی، به خصوص واکنش‌های چند فاز، نحوه، شدت و مدت زمان اختلاط مواد در بازده واکنش تأثیر چشمگیر دارد. اگر اختلاط به شکل مطلوب انجام نشود، برخورد میان مولکول‌های مواد واکنش‌دهنده به نحو مطلوب انجام نمی‌شود و در نتیجه یا واکنش انجام نخواهد شد یا بازده آن کم‌تر از حد انتظار خواهد بود.

نکته مهم آن است که در بسیاری از موارد همزدن شدید یا طولانی، علاوه بر اتلاف انرژی، بر کیفیت محصول نیز اثر نامطلوب می‌گذارد. برای مثال در فرآیند تشکیل کریستال<sup>۱</sup> یا بعضی فرآیندهای بیولوژیکی، افزایش توان همزن باعث شکسته شدن دانه‌های کریستال یا صدمه دیدن میکروارگانیسم‌ها و در نهایت کاهش کیفیت محصول می‌شود. همچنین در بسیاری از واکنش‌های شیمیایی اگر زمان اختلاط بیش از حد طولانی شود، محصول شروع به تجزیه شدن می‌نماید و به مواد ناخواسته تبدیل می‌گردد. بدین ترتیب بازده واکنش کاهش می‌یابد.

### ۱۰-۱- انواع اختلاط

عملیات اختلاط را می‌توان بدون توجه به ماهیت صنعتی که این عملیات در آن انجام می‌شود،

<sup>۱</sup> - Crystallization

به شش گروه تقسیم بندی کرد :

– اختلاط دو یا چند مایع محلول (یک فاز)

– اختلاط دو یا چند مایع نامحلول (دو یا چند فاز)

– تعلیق جامد در مایع

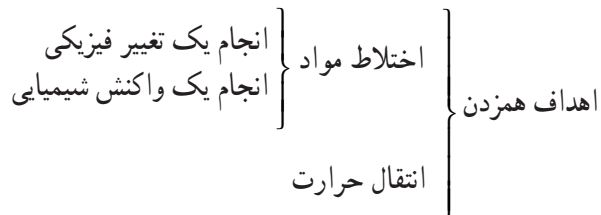
– پخش گاز در مایع

– اختلاط سه فاز (جامد – مایع – گاز)

– اختلاط جامدات

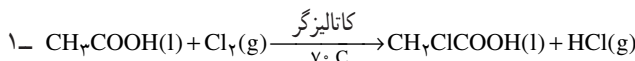
باید توجه داشت که هریک از عملیات فوق می تواند صرفاً جنبه فیزیکی داشته باشد، برای مثال در بسیاری از فرآیندها، هدف از اختلاط، انحلال یک جامد در مایع یا تولید امولسیون یا تولید سوسپانسیون یا ... می باشد. هم چنین عملیات اختلاط می تواند به منظور انجام یک واکنش شیمیایی انجام شود. برای مثال در واکنش کلردار کردن استیک اسید به منظور تولید منوکلرواستیک اسید، چگونگی پخش گاز کلر در داخل استیک اسید تأثیر عمده بر بازده واکنش دارد<sup>۱</sup>.

نکته قابل توجه آن که همواره همزدن به منظور اختلاط دو یا چند ماده انجام نمی شود بلکه ممکن است با هدف بهبود وضعیت انتقال حرارت انجام گیرد. برای مثال : به هنگام پختن آش در یک دیگ بزرگ، همزدن دائم محتویات داخل دیگ الزامی است زیرا موادی که با جداره و به خصوص کف ظرف در تماس هستند حرارت بیشتری دیده، مواد واقع در قسمت های میانی حرارت کمتری می بینند. با همزدن آش، انتقال حرارت به کلیه مواد داخل دیگ، یکسان انجام خواهد شد. با این توضیحات می توان اهداف همزدن را در نمودار زیر خلاصه نمود :



جهت آشنایی بیشتر با ۶ نوع اختلاط مواد، لازم است در خصوص هریک توضیح مختصر داده شود :

۱-۱-۱- اختلاط دو یا چند مایع محلول (یک فاز): در بسیاری از فرآیندها لازم



است چند مایع را که به طور کامل در یکدیگر محلول هستند، با یکدیگر مخلوط کنیم تا محصولی کاملاً یک‌نواخت به دست آید. در صنعت به این عمل «بلندینگ»<sup>۱</sup> می‌گویند. در این عمل هیچ‌گونه واکنش شیمیایی انجام نمی‌شود. در آخرین مراحل تولید محصولات نفتی نظیر نفت سفید، بنزین، گازوئیل و روغن‌های موتور لازم است مواد مختلف با محصول مورد نظر مخلوط شود تا آماده عرضه به بازار گردد. کاربرد دیگر این نوع اختلاط هنگامی است که وقتی دو یا چند مایع در یکدیگر حل می‌شوند، واکنش شیمیایی نیز انجام می‌دهند. در این حالت اختلاط باید به نحوی انجام شود که برخورد کافی در سطح مولکول‌های مواد واکنش دهنده پدید آید.

۱-۱-۲- اختلاط دو یا چند مایع نامحلول (دو یا چند فاز): هنگامی که دو فاز مایع نامحلول همزده می‌شوند، معمولاً مایعی که حجم کمتری دارد به صورت ذرات معلق در می‌آید و در داخل مایعی که حجم بیشتری دارد و به شکل یک فاز پیوسته است پراکنده می‌شود. در صورت توقف عمل اختلاط، دو فاز از یکدیگر جدا می‌شوند. هدف از این نوع اختلاط سرعت بخشیدن به نفوذ مولکول‌های مایعات در یکدیگر است. این عملیات در فرآیند استخراج توسط حلال کاربرد دارد. هم‌چنین در تهیه امولسیون‌های<sup>۲</sup> غذایی و دارویی از این نوع اختلاط استفاده می‌شود. در ساخت این نوع امولسیون‌ها سعی می‌شود با استفاده از مواد مختلف مخلوط نسبتاً پایداری که زمان جدا شدن فازهای آن تا حد ممکن طولانی است تهیه شود.

۱-۱-۳- تعلیق جامد در مایع: این نوع اختلاط در فرآیندهایی نظیر تشکیل کریستال، واکنش میان جامد و مایع، واکنش در فاز مایع به کمک کاتالیزگر جامد، انحلال جامد در مایع و ... به کار می‌رود. در این عملیات باید ذرات جامد در داخل مایع به خوبی پراکنده شوند و از ته نشین شدن ذرات سنگین یا به سطح آمدن ذرات سبک جلوگیری شود. بدین ترتیب تماس لازم میان مولکول‌های جامد و مایع و نفوذ مولکول‌های جامد در فاز مایع به منظور انحلال جامد یا انجام واکنش شیمیایی به نحو مطلوب انجام می‌شود. هم‌چنین این نوع اختلاط جهت پراکنده کردن ذرات بسیار ریز جامد در داخل فاز مایعی که گرانروی بالایی دارد به کار می‌رود. برای مثال در ساخت لاستیک اتومبیل باید ذرات ریز کربن در داخل لاستیک مذاب پخش شوند. به عبارت دیگر در این فرآیند نوعی سوسپانسیون پایدار ساخته می‌شود.

۱-۱-۴- پخش گاز در مایع: فرآیندهای صنعتی مهم نظیر اکسایش، هیدروژن‌دار کردن (در غیاب کاتالیزگر جامد) و تخمیر بیولوژیکی از طریق تماس گاز با مایع انجام می‌شود. مهم‌ترین عامل در این نوع فرآیندها، اختلاط گاز و مایع است به نحوی که حباب‌های گاز در فاز مایع کاملاً پراکنده شوند. هرچه اندازه حباب‌های گاز کوچک‌تر و مدت زمان بیشتری در فاز مایع اقامت داشته

باشند، نفوذ مولکول‌های گاز در فاز مایع بهتر انجام می‌شود و بازده واکنش افزایش می‌یابد. اگر عمل همزدن متوقف شود، فاز گاز به سرعت از فاز مایع جدا می‌گردد. بنابراین در واکنش‌های گاز-مایع نقش عملیات اختلاط بسیار حایز اهمیت است.

۱۰-۱-۵- تماس سه فاز: در بعضی از فرآیندها نظیر هیدروژن‌دار کردن (در حضور کاتالیزگر جامد) و تشکیل کریستال به روش تبخیر، سه فاز جامد، مایع و گاز با یکدیگر در تماس می‌باشند. طراحی این نوع دستگاه‌ها بسیار مشکل است زیرا اختلاط باید به گونه‌ای انجام شود که مولکول‌های مایع و گاز همزمان در سطح جامد حضور داشته باشند. برای این منظور فاز گاز باید به حباب‌های ریز تقسیم شوند و زمان اقامت این حباب‌ها داخل فاز مایع کافی باشد، ضمناً ذرات جامد نباید در کف ظرف ته‌نشین شوند.

۱۰-۱-۶- اختلاط جامدات: در انواع عملیات اختلاط که تا این جا بیان شد، فاز مایع حضور داشت. در بسیاری از فرآیندهای صنعتی نیاز است تا در غیاب فاز مایع، دو یا چند جامد (غالباً به شکل پودر) مخلوط شوند. یکی از مشکلات اختلاط جامدات آن است که ذرات جامد تمایل به از هم جدا شدن دارند. با وجود مایع، عمل جدا شدن فازها هنگامی اتفاق می‌افتد که همزدن متوقف شود؛ در حالی که در اختلاط جامدات عمل جدا شدن فازها به هنگام همزدن رخ می‌دهد. عوامل مؤثر در جدا شدن دو فاز جامد از یکدیگر دانسته و اندازه ذرات جامد است. مخلوط‌کن‌های فاز جامد باید به گونه‌ای طراحی شوند که تا حد ممکن از پدیده جدا شدن فازهای جامد ممانعت به عمل آید.

## ۱۰-۲- انواع مخلوط‌کن‌ها

مخلوط‌کن‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی نمود:

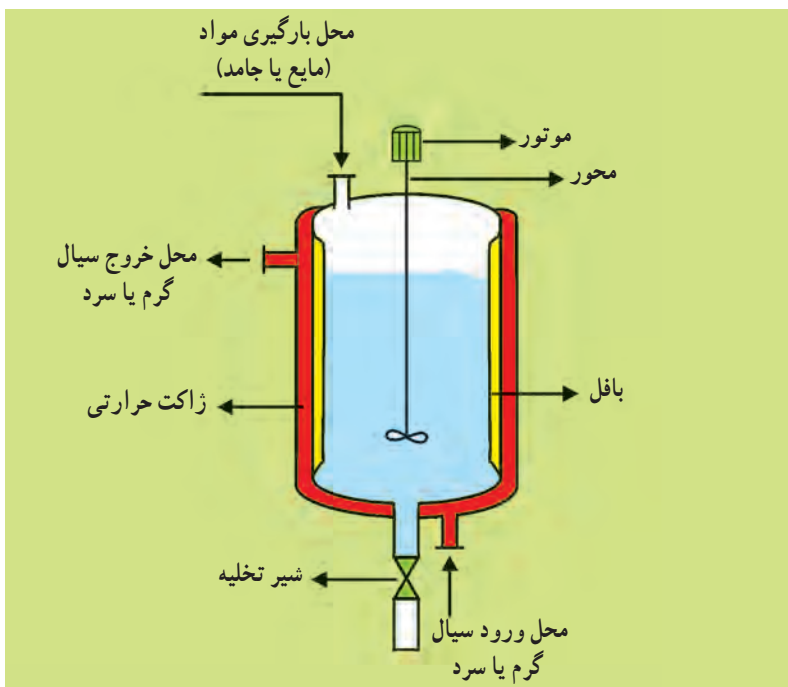
مخلوط‌کن‌های فاز مایع که در آن‌ها حداقل یک فاز مایع وجود دارد.

مخلوط‌کن‌های فاز جامد که در آن‌ها فاز مایع یا گاز وجود ندارد.

۱۰-۲-۱- مخلوط‌کن‌های فاز مایع: در این نوع دستگاه‌ها حداقل یک فاز مایع وجود دارد و در کنار آن فازهای دیگر نیز می‌توانند حضور داشته باشند. دستگاه‌های گوناگونی جهت انجام اشکال مختلف اختلاط در فاز مایع وجود دارد، اما مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها مخزن مجهز به همزن مکانیکی<sup>۱</sup> است. شکل ۱۰-۱ یک نمونه از این نوع دستگاه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در فصل قبل (شکل ۹-۳) بیان شد، اگر در این دستگاه‌ها واکنش شیمیایی انجام شود، به آن‌ها راکتور ناپیوسته<sup>۲</sup> گویند.

۱- Mechanically - Agitated Vessel

۲- Batch Reactor



شکل ۱۰-۱- یک نمونه از مخزن مجهز به همزن مکانیکی جهت اختلاط مایع - مایع یا جامد - مایع

مخزن معمولاً به شکل استوانه است و قسمت بالای آن می‌تواند باز یا بسته باشد. کف مخزن را به شکل محدب (غیر مسطح) می‌سازند تا به هنگام تخلیه، تمامی مواد داخل مخزن به آسانی خارج شود. هم‌چنین شکل محدب کمک می‌کند تا از پدید آمدن سیال ساکن در گوشه‌ها جلوگیری شود. غالباً  $\frac{2}{3}$  حجم مخزن را از مایع پر می‌کنند و عمق مایع معمولاً برابر قطر تانک است. در مورد اختلاط گاز - مایع ممکن است عمق مایع حتی تا سه برابر قطر مخزن طراحی شود تا گاز به مدت کافی در داخل مایع اقامت نماید (شکل ۱۰-۲). برای آن‌که فاز گاز به شکل حباب‌های ریز وارد مایع شود از یک توزیع کننده گاز<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. توزیع کننده گاز می‌تواند یک لوله ساده یا شبکه‌ای از لوله‌ها به اشکال مختلف باشد که سوراخ‌های ریزی بر روی آن‌ها ایجاد شده است. به کمک توزیع کننده، گاز به صورت حباب‌های کوچک در زیر پره تزریق می‌گردد. با چرخش پره<sup>۲</sup> حباب‌های گاز در داخل مایع پخش می‌شوند. در چنین حالتی، جهت اختلاط بیشتر مواد از چند پره بر روی یک محور<sup>۳</sup> استفاده می‌شود.

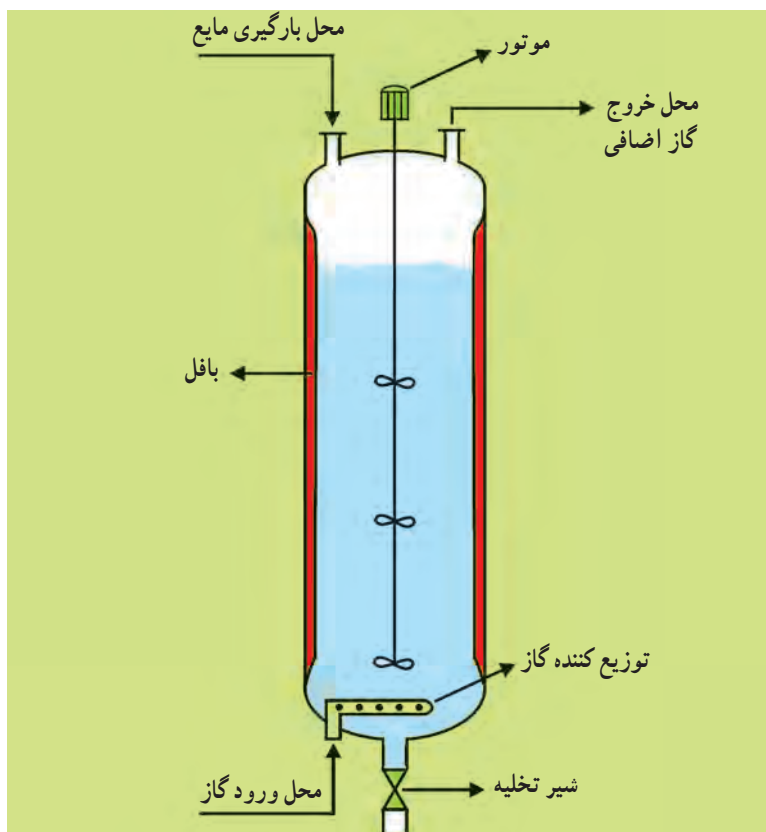
بسته به نوع اختلاط و نیاز عملیات، بعضی تجهیزات جانبی برای مخزن مجهز به همزن مکانیکی در نظر می‌گیرند. موتور که عامل دوران محور و پره متصل به آن است می‌تواند به جعبه‌دنده<sup>۴</sup> دور متغیر متصل باشد تا بتوان سرعت دوران پره را به دلخواه تنظیم کرد. ژاکت حرارتی در همه مخازن

۱- Sparger

۲- Impeller

۳- Shaft

۴- Gearbox



شکل ۱۰-۲. یک نمونه از مخزن مجهز به همزن مکانیکی جهت اختلاط گاز مایع

پیش‌بینی نمی‌شود و فقط هنگامی در طراحی و ساخت مورد توجه قرار می‌گیرد که ضمن انجام عملیات اختلاط نیاز باشد تا محتویات مخزن گرم یا سرد شوند. هم‌چنین نصب دماسنج و فشارسنج بستگی به شرایط عملیات دارد. غالباً جهت ایجاد آشفتگی بیشتر در مایع و جلوگیری از حرکت دورانی و یک‌نواختی آن، ۴ عدد تیغه به نام بافل (مانع) در جداره داخلی مخزن نصب می‌شود. در مواردی که گرانیوی سیال زیاد است و مایع حالت خمیری دارد به بافل نیاز نیست زیرا چرخش همزمان توده سیال رخ نخواهد داد.

انواع پره‌ها با اشکال مختلف جهت همزدن مایعات به کار برده می‌شوند. پره‌های ملخی<sup>۱</sup>، توربینی<sup>۲</sup> و پارویی<sup>۳</sup> از مهم‌ترین انواع پره‌ها هستند که برای همزدن مایعات با گرانیوی پایین به کار می‌روند. این نوع همزن‌ها با سرعت زیاد دوران می‌کنند. پره‌های لنگری<sup>۴</sup> و حلزونی<sup>۵</sup> برای همزدن مایعات با گرانیوی زیاد به کار می‌روند. این دو نوع همزن با سرعت کم دوران می‌کنند. شکل‌های ۱-۳ انواع این پره‌ها را نشان می‌دهد.

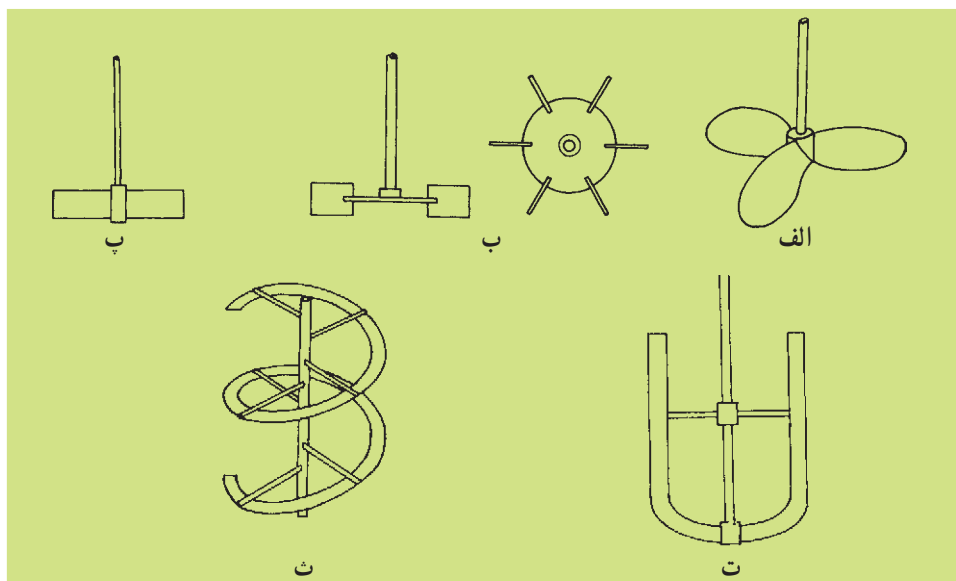
۱- Propeller

۲- Turbine

۳- Paddle

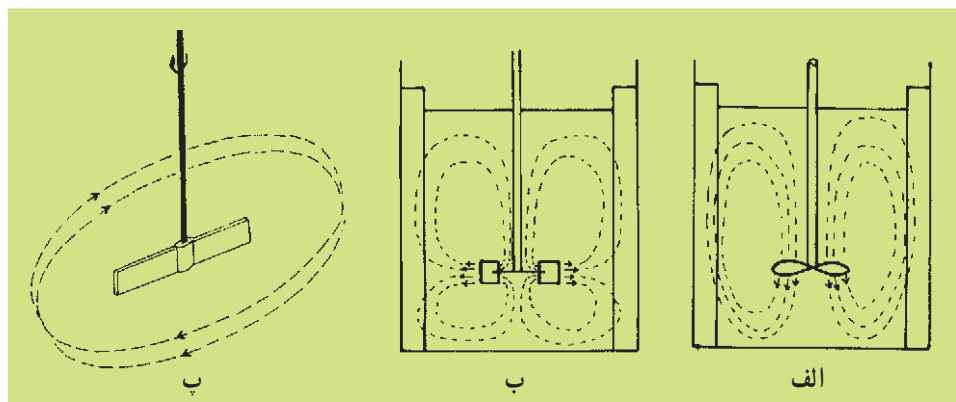
۴- Anchor

۵- Helical



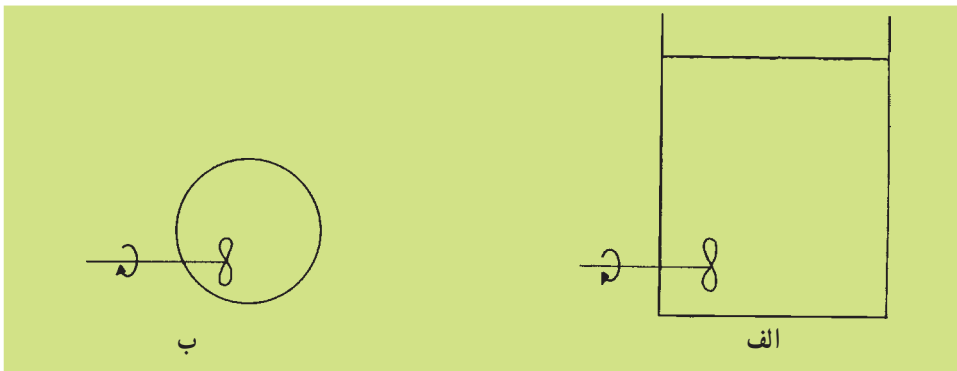
شکل ۱-۳- انواع پره‌ها. الف - ملخی ب - توربینی (نمای پهلو و بالا) پ - پارویی ت - لنگری ث - حلزونی

شکل ۱-۴- الف مسیر جریان سیال را به هنگام دوران یک پره ملخی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود این نوع پره سیال را در امتداد محور به جریان می‌اندازد به همین دلیل به این نوع پره «جریان محوری» گویند. بسته به جهت نصب پره ملخی، جهت جریان محوری می‌تواند به سمت پایین (همانند شکل ۱-۴) یا به سمت بالا باشد. برای مخازن بسیار بزرگ، جهت انجام

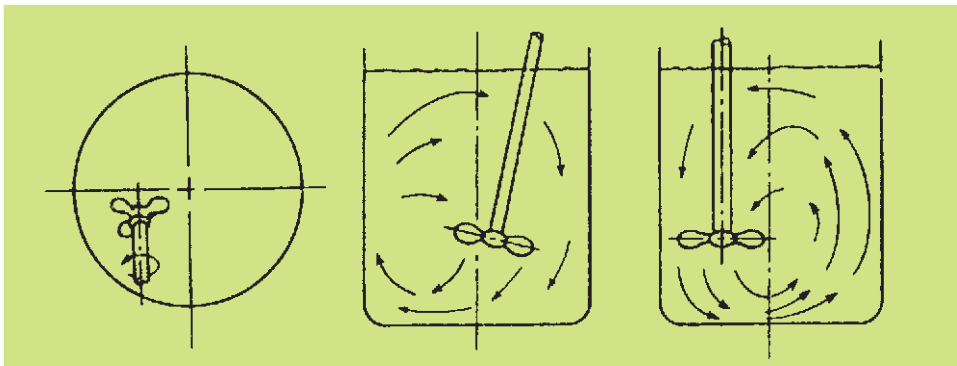


شکل ۱-۴- انواع جریان‌های سیالات به هنگام همزدن. الف - جریان محوری در پره ملخی  
ب - جریان شعاعی در پره توربینی پ - جریان مماسی در پره پارویی

عملیات بلندینگ این نوع همزن را به صورت افقی از کنار مخزن وارد می کنند (شکل ۱-۵). بدین ترتیب به کمک فقط یک پره، که طول محور آن نیز زیاد بلند نخواهد بود مایعات داخل مخزن را مخلوط می کنند. در مواردی جهت افزایش آسفنگی در داخل مخازن و از بین بردن نقاط ساکن در گوشه های مخازن، همزن را خارج از مرکز استوانه قرار می دهند. شکل ۱-۵ طرز قرار گرفتن همزن ملخی در چنین حالتی را نشان می دهد.



شکل ۱-۵ - طرز قرار گرفتن همزن ملخی به صورت افقی. الف - نمای پهلو ب - نمای بالا



شکل ۱-۶ - همزن های خارج از مرکز

همان طور که قبلاً بیان شد، سرعت دوران پره های ملخی زیاد است. بسته به ابعاد این نوع پره ها، حداکثر سرعت دوران آن ها جهت انجام اختلاط به نحو مطلوب حدود  $800^\circ$  تا  $1000^\circ$  دور در دقیقه<sup>۱</sup> است. قطر پره های ملخی بین  $25^\circ$  تا  $50^\circ$  درصد قطر داخلی ظرف است.

پره های توربینی: شکل ۱-۴ ب نشان می دهد که چگونه یک پره توربینی سیال را به جریان می اندازد. همان طور که مشاهده می شود با حرکت این پره، سیال در امتداد شعاع ظرف (عمود بر محور) حرکت می کند. به همین دلیل به این نوع پره «جریان شعاعی<sup>۲</sup>» گویند. پره های توربینی در

۱- rpm = revolution per minute

۲- Radial Flow

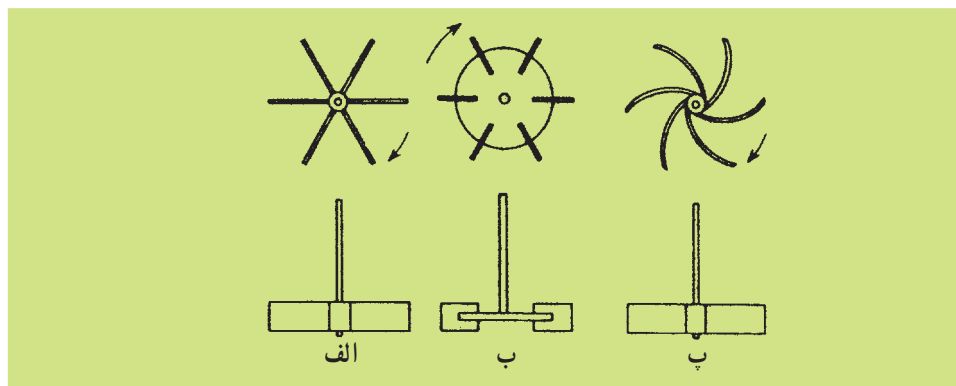


محدوده گسترده‌ای از سیالات با گرانروی‌های مختلف کاربرد دارد. در صنایع شیمیایی، به خصوص برای اختلاط گاز در مایع، این نوع پره مناسب‌ترین انتخاب است. شکل ۱-۷ انواع پره‌های توربینی را نشان می‌دهد. در این شکل زاویه صفحات با سطح افقی  $90^\circ$  است، به همین دلیل به این نوع پره‌ها «عمودی» گویند.

در بعضی از انواع پره‌های توربینی صفحات با سطح افق زاویه  $45^\circ$  می‌سازند. ضمناً تعداد صفحات می‌تواند ۴، ۶ یا ۸ عدد باشد. قطر پره‌های توربینی معمولاً بین  $3^\circ$  تا  $5^\circ$  درصد قطر داخلی ظرف است. بسته به ابعاد، از این نوع پره‌ها حداکثر با سرعت  $800$  تا  $1000$  دور در دقیقه استفاده می‌کنند.

پره‌های پارویی: شکل ۱-۴- پ چگونگی حرکت سیال به هنگام چرخش پره پارویی را نشان می‌دهد. این پره سیال را مماس بر دایره مسیر به جریان می‌اندازد. به همین دلیل به این نوع پره «جریان مماسی» گویند. این نوع پره تمام مایع داخل ظرف را همزمان و یک‌نواخت به شکل یک جریان گردابی حرکت می‌دهد. لذا جهت ایجاد آشفتنگی و انجام عمل اختلاط به نحو مطلوب نیاز است که حتماً از بافل استفاده شود.

ساخت این نوع پره بسیار ساده است زیرا از یک صفحه صاف متصل به محور تشکیل شده است. پره پارویی با دو یا چهار صفحه نیز متداول است. معمولاً صفحات بر سطح افق عمود است اما برای آن‌که این نوع پره‌ها سیال را به شکل محوری نیز به جریان بیاندازد، آن‌ها را زاویه‌دار می‌سازند. طول پره‌های پارویی نوعاً بین  $5^\circ$  تا  $8^\circ$  درصد قطر داخلی ظرف است. پهنای پره‌های پارویی  $\frac{1}{6}$  تا  $\frac{1}{4}$  طول آن است.



شکل ۱-۷- سه نوع پره توربینی عمودی. الف- صفحات صاف متصل به محور  
ب- صفحات صاف متصل به دیسک پ- صفحات منحنی متصل به محور

پره‌های لنگری و حلزونی: این دو نوع پره برای همزدن مایعات با گرانیوی زیاد و حتی خمیرها به کار می‌روند. فاصله این پره‌ها با دیواره ظرف نسبتاً کم است بدین ترتیب با چرخش خود از چسبیدن سیال به دیواره‌های ظرف جلوگیری می‌شود. سرعت دوران این نوع همزن‌ها نسبتاً پایین است و معمولاً نیاز به استفاده از بافل ندارند.

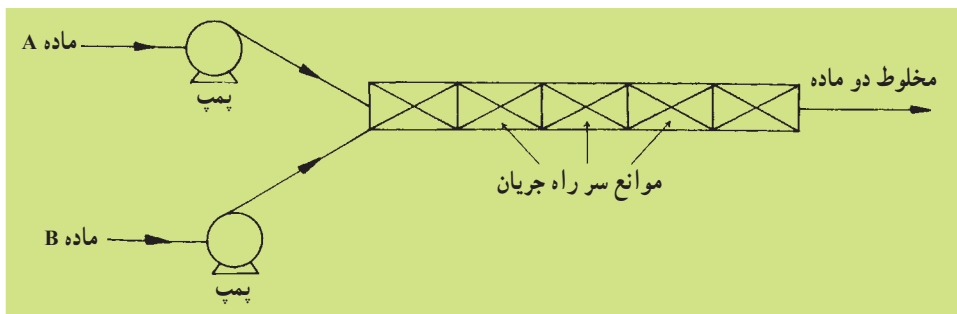
جدول ۱-۱۰ کاربردهای انواع پره‌ها را خلاصه نموده است.

جدول ۱-۱۰ کاربردهای انواع پره‌ها

نوع پره	موارد کاربرد
ملخی توربینی پارویی	انحلال مایعات با گرانیوی کم - پخش گاز در داخل مایع با گرانیوی کم - اختلاط دو فاز مایع نامحلول - تعلیق جامد در مایع با گرانیوی کم
لنگری حلزونی	اختلاط مایعات با گرانیوی زیاد

افزایش گرانیوی سیال ↓  
 افزایش سرعت پره ↑

**نکته مهم:** علاوه بر مخزن مجهز به همزن مکانیکی، دستگاه‌های دیگری نیز برای اختلاط فاز مایع وجود دارد. یکی از جدیدترین دستگاه‌ها، مخلوط‌کن‌های ساکن<sup>۱</sup> می‌باشند که برای اختلاط دو فاز مایع یا پخش گاز در مایع به صورت پیوسته<sup>۲</sup> به کار می‌رود. در این روش مواد به داخل یک لوله که در داخل آن موانعی جهت اختلاط بهتر پیش‌بینی شده است وارد و با حرکت به سمت انتهای لوله به تدریج مخلوط می‌شوند. (شکل ۱-۸)



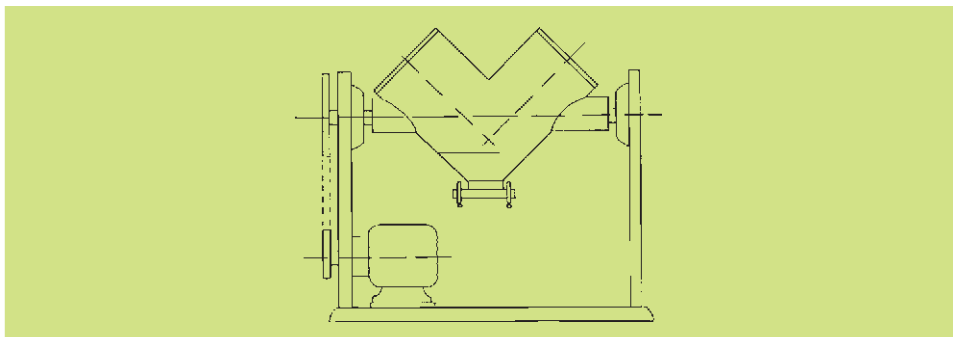
شکل ۱-۸ - نحوه کار یک مخلوط‌کن ساکن

۱-۲-۲- مخلوط‌کن‌های فاز جامد: جهت اختلاط جامدات دستگاه‌های گوناگونی ساخته شده است با این وجود روش‌های اختلاط در این دستگاه‌ها را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد:

۱- Static Mixers

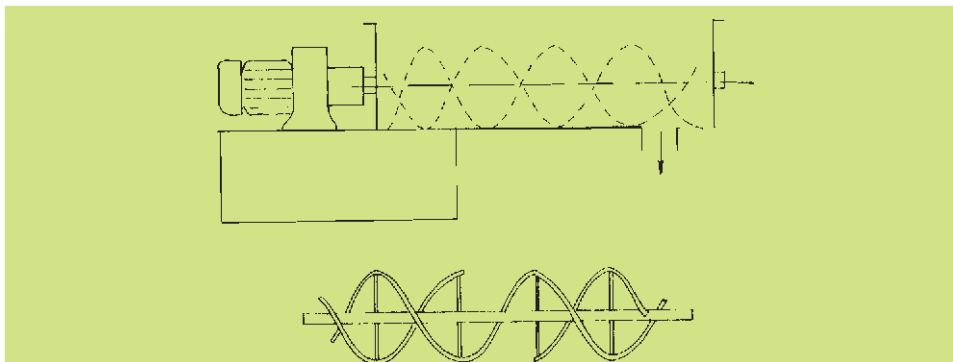
۲- Continous

**الف - اختلاط به روش نفوذ:** در این نوع دستگاه‌ها ضمن انجام یک حرکت دورانی، ذرات جامد در یکدیگر نفوذ می‌کنند و کاملاً مخلوط می‌شوند. یک نمونه از این دستگاه‌ها مخلوط‌کن «V» می‌باشد که در شکل ۹-۱۰ نشان داده شده است. این دستگاه یک ظرف بسته به شکل «V» یا گاهی به شکل «Y» می‌باشد که پودر دو یا چند نوع جامد در داخل آن ریخته می‌شود و سپس ظرف دوران می‌کند. این نوع دستگاه‌ها را حتی تا ظرفیت ۵۰ متر مکعب نیز ساخته‌اند. سرعت دوران ظرف معمولاً حدود نصف سرعت بحرانی مخلوط است. منظور از سرعت بحرانی سرعتی است که نیروی گریز از مرکز با نیروی جاذبه وارد بر ذرات برابر شود. در سرعت بحرانی ذرات پودر به جداره ظرف می‌چسبند و عمل اختلاط انجام نمی‌شود. در بخش بعد با محاسبات مربوط به تعیین سرعت بحرانی در آسیاب‌ها آشنا می‌شوید.



شکل ۹-۱۰- مخلوط‌کن «V»

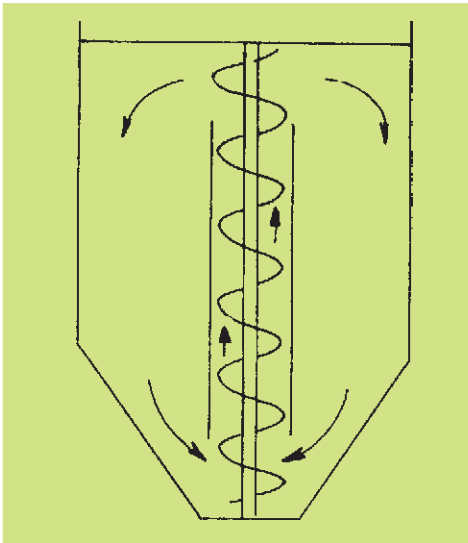
**ب - اختلاط به روش جابه‌جایی:** در این دستگاه‌ها با حرکت انتقالی پودر انواع جامدات عمل اختلاط انجام می‌شود. در شکل ۱۰-۱۱ یک نوع از این مخلوط‌کن‌ها به نام مخلوط‌کن روبانی<sup>۱</sup> نشان داده شده است. با حرکت دورانی تیغه که به صورت افقی قرار گرفته است، ذرات جامد ضمن حرکت به جلو با یکدیگر مخلوط می‌شوند.



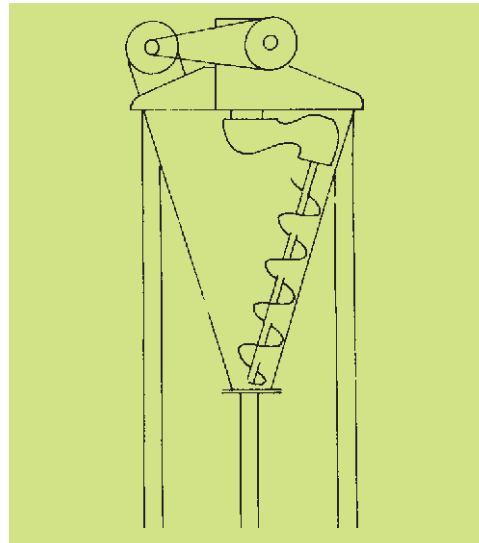
شکل ۱۰-۱۱- مخلوط‌کن روبانی

۱- Ribbon mixer

نوع دیگر این نوع مخلوط‌کن‌ها در شکل ۱۰-۱۱ نشان داده شده است<sup>۱</sup>. در این دستگاه تیغه ماریچ<sup>۲</sup> ضمن حرکت دورانی به دور محور خود، حرکت انتقالی آرامی نیز به موازات جداره داخلی ظرف دارد. بدین ترتیب که با دوران تیغه ماریچ به دور محور خود، ذرات جامد از کف ظرف به سمت بالا جابه‌جا می‌شوند و با حرکت انتقالی تیغه این جابه‌جایی در تمام نقاط ظرف یکسان انجام می‌گردد. شکل ۱۰-۱۲ نوع دیگری از این دستگاه‌ها را که «مخلوط‌کن ماریچ عمودی»<sup>۳</sup> نام دارد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تیغه ماریچ به شکل عمودی و ثابت در مرکز ظرف و در داخل یک لوله که دو سر آن باز است قرار گرفته است. با دوران تیغه ذرات پودر در داخل لوله به سمت بالا هدایت می‌شوند. بدین ترتیب در نواحی خارج لوله، حرکت ذرات پودر از بالا به پایین خواهد بود. این جابه‌جایی ذرات سبب اختلاط کامل آن‌ها می‌شود.



شکل ۱۰-۱۲- مخلوط‌کن ماریچ عمودی



شکل ۱۰-۱۱- مخلوط‌کن Nautamix

پ- اختلاط با کمک ایجاد سیالیت<sup>۴</sup> در پودر جامدات: اگر مقداری جامد را به صورت پودر در یک ظرف استوانه‌ای بریزیم و از داخل آن گاز عبور دهیم به تدریج با افزایش سرعت عبور گاز و بسته به سنگینی پودر ذرات جامد کم‌کم از جای خود بلند می‌شوند و حالت سیالیت پیدا می‌کنند. البته ممکن است سرعت گاز به حدی زیاد شود که ذرات جامد را همراه با خود از ظرف خارج سازد.

۱- نام این نوع مخلوط‌کن‌ها Nautamix می‌باشد که معادل فارسی مناسب ندارد.

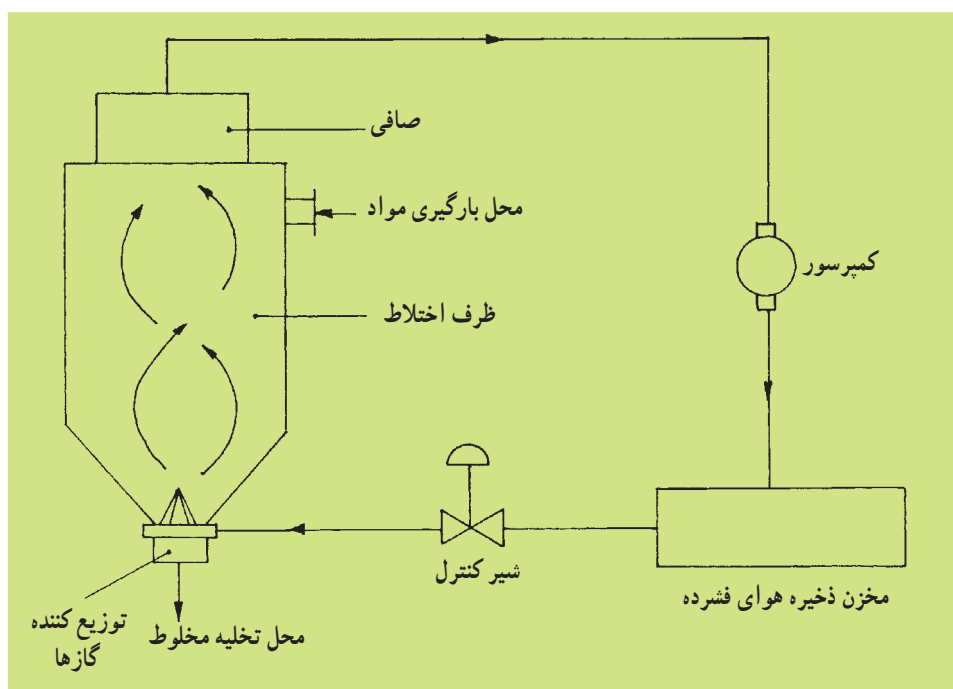
۲- Screw

۳- Vertical Screw Mixer

۴- Fluidity

شکل ۱۰-۱۳ یک مخلوط‌کن هوایی<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد که بر اساس سیالیت ذرات جامد کار می‌کند. با عبور گاز هوا از داخل بستر ذرات جامد، این ذرات از جای خود تکان می‌خورند و به حرکت درمی‌آیند به عبارت بهتر پودر حالت سیالیت پیدا می‌کند. البته در این حالت سرعت گاز به حدی زیاد است که می‌تواند در داخل ذرات جامد آشفته‌گی و اختلاط لازم را پدید آورد، اما قادر نیست که ذرات پودر را با خود از ظرف خارج کند.

این نوع مخلوط‌کن نیاز به تجهیزات جانبی نسبتاً گران‌قیمت دارد. هوا یا گاز مورد نظر توسط کمپرسور به فشار مورد نیاز می‌رسد. مقدار گاز ورودی به «ظرف اختلاط<sup>۲</sup>»، توسط یک «شیر کنترل<sup>۳</sup>»، تنظیم می‌شود. گاز توسط توزیع کننده در داخل ظرف پخش می‌شود و با حرکت چرخشی به سمت بالا حرکت می‌کند و ضمن حرکت پودرها را به خوبی مخلوط می‌نماید. گاز به هنگام خروج از ظرف اختلاط از یک صافی<sup>۴</sup> عبور می‌کند تا ذرات جامدی را که احتمالاً با خود دارد، جدا شوند. این دستگاه به صورت ناپیوسته کار می‌کند بدین ترتیب که در ابتدای عملیات مواد جامد به شکل پودر از بالای ظرف ریخته می‌شوند و بعد از پایان عملیات مخلوط نهایی از پایین ظرف تخلیه می‌گردد.



شکل ۱۰-۱۳- مخلوط‌کن هوایی (مخلوط‌کن بستر سیال)

۱- Airmix (Fluidized Mixer)

۲- Mixing Chamber

۳- Control Valve

۴- Filter

## دستگاه‌های کاهش اندازه مواد

اصطلاح کاهش اندازه به روش‌هایی اطلاق می‌شود که به وسیله آن قطعات بزرگ جامد به قطعات کوچک شکسته شود. در عملیات مختلف صنعتی جامدات را با روش‌های مختلف و برای اهداف متنوع خرد و کوچک می‌کنند. مثلاً مواد مختلف شیمیایی را آسیاب می‌کنند، قطعات بزرگ سنگ معدن را به اندازه‌های مورد نظر درمی‌آورند، صفحات پلاستیک را به شکل مکعب مستطیل یا شکل‌های دیگری می‌برند، اجزای نامطلوب را به طریق مکانیکی جدا می‌کنند و انتقال مواد را از طریق خرد کردن آسان می‌سازند. اصولاً جامدات به صورت پودر در عملیات فیزیکی نظیر انحلال و واکنش‌های شیمیایی بهتر شرکت می‌کنند.

### ۱۰-۳- اصول کار دستگاه‌های کاهش اندازه

روش‌های مختلفی برای کاهش اندازه جامدات وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها چهار روش اصلی زیر است:

- کاهش اندازه به روش متراکم کردن مانند استفاده از فندق‌شکن
  - کاهش اندازه به روش ضربه‌زدن، مانند استفاده از پتک یا چکش
  - کاهش اندازه به روش سایش، مانند سوهان
  - کاهش اندازه به روش قطع کردن یا بُردن مانند تیغه یا چاقو.
- به‌طور کلی از روش تراکم برای کاهش اندازه قطعات سخت و ایجاد قطعات ریزتر، از روش ضربه‌زدن برای تولید محصولات متوسط و ریز، از روش سایش برای تولید محصولات خیلی ریز و نرم از مواد نرم اولیه و از روش قطع کردن یا بردن برای تولید ذراتی با اندازه و شکل معین استفاده می‌شود.
- یک دستگاه کاهش اندازه باید دارای خواص زیر باشد:
  - دارای ظرفیت بالا باشد.
  - به ازای تولید هر واحد محصول، انرژی کمی مصرف کند.
  - اندازه ذرات محصول تولید شده تا حد ممکن یک‌سان باشد.
- بازده این دستگاه‌ها نسبتاً پایین است. به عبارت دیگر اختلاف بین عملکرد واقعی دستگاه‌ها با عملکرد ایده‌آل آن‌ها بسیار زیاد است. در حالت ایده‌آل فرض بر آن است که محصول خروجی از دستگاه دارای اندازه ذرات کاملاً یکسان باشد. اما در عمل طیف وسیعی از خرده‌هایی از اندازه‌های بزرگ تا اندازه‌های خیلی کوچک میکروسکوپی تولید می‌شود.

بعضی از دستگاه‌های کاهش اندازه طوری طراحی می‌شوند که اندازه قطعات بزرگ خروجی از آن‌ها قابل کنترل باشد ولی در این دستگاه‌ها اندازه ذرات ریزتر قابل کنترل نیستند. در بعضی از دستگاه‌های کاهش اندازه می‌توان تولید دانه‌های خیلی ریز را به حداقل رساند ولی به هیچ‌وجه نمی‌توان آن‌ها را از بین برد.

## ۱۰-۴- دستگاه‌های کاهش اندازه مواد

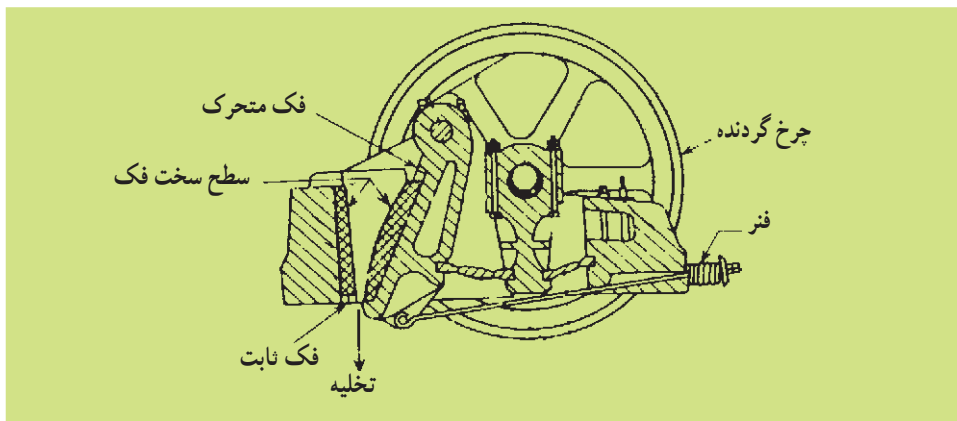
این دستگاه‌ها را به سه دسته اصلی تقسیم می‌کنند:

- خردکن‌ها<sup>۱</sup>
- آسیاب‌ها<sup>۲</sup>
- دستگاه‌های برنده<sup>۳</sup>

خردکن‌ها معمولاً قطعات بزرگ‌تر را به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌کنند. از بیشتر خردکن‌ها، برای تبدیل قطعاتی که از معدن استخراج می‌شوند به قطعات کوچک‌تر، استفاده می‌شود. محصولات خروجی از خردکن‌ها معمولاً به صورت پودر است. بعضی از آسیاب‌ها می‌توانند پودرهایی از ۱ تا ۵۰ میکرون تولید نمایند. این نوع آسیاب‌ها را «آسیاب‌های تولید مواد بسیار ریز» می‌نامند. اندازه مواد ورودی به این نوع آسیاب‌ها نباید از حدود ۵/۰ تا ۱ سانتی‌متر بزرگ‌تر باشد. از دستگاه‌های برنده معمولاً برای تولید محصولات به اندازه معین، از ۱/۰ تا ۱ سانتی‌متر استفاده می‌شود.

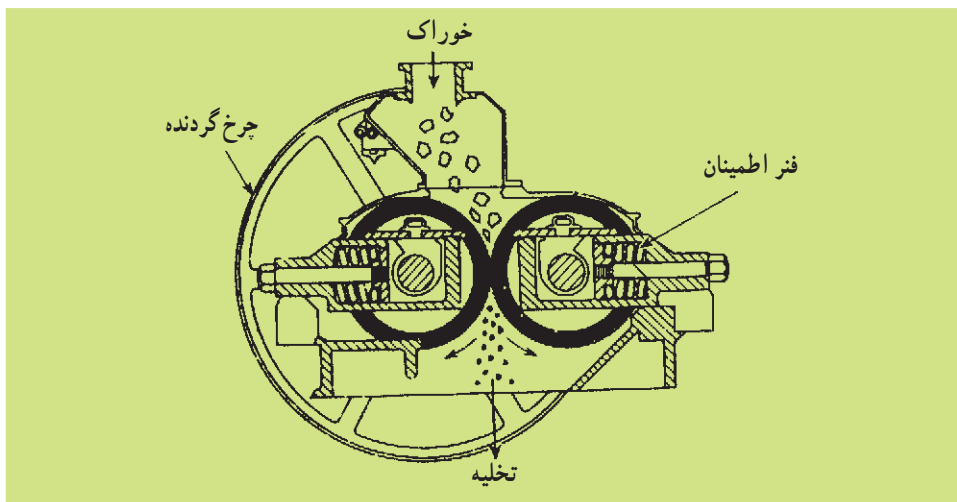
۱۰-۴-۱- خردکن‌ها: خردکن‌ها دستگاه‌هایی هستند که برای خرد کردن مقادیر زیاد مواد جامد به کار می‌روند. از این دستگاه‌ها اغلب برای خرد کردن مواد سخت از قبیل سنگ معدن استفاده می‌شود. در زیر درباره دو نوع از معمول‌ترین خردکن‌ها توضیح داده می‌شود.

**خردکن فکی:** در شکل ۱۰-۱۴ یک نمونه خردکن فکی نشان داده شده است. در این خردکن، ماده اولیه بین دو فک قرار داده می‌شود. این دو فک به صورت «V» قرار گرفته‌اند. یکی از فک‌ها ثابت و دیگری متحرک است. این دو فک زاویه‌ای در حدود ۲۰ تا ۳۰ با یکدیگر ایجاد می‌کنند. فک متحرک نیروی فشاری زیادی به قطعات بین فک‌ها وارد می‌کند. سطح فک‌ها معمولاً صاف و گاهی برآمده است و ممکن است دارای شیارهای کم عمق افقی نیز باشند. قطعات بزرگی که در قسمت بالای دو فک قرار می‌گیرند خرد می‌شوند و در فضای تنگ‌تر پایین می‌ریزند و برای بار دوم که فک بسته می‌شود دوباره خرد می‌شوند و پس از آنکه به اندازه کافی خرد شدند از انتهای دستگاه به بیرون می‌ریزند. فک‌ها در حدود ۲۵° تا ۴۰° دور در دقیقه باز و بسته می‌شوند. اختلاف خردکن‌های فکی معمولاً در چگونگی حرکت فک متحرک آن‌ها است.



شکل ۱۰-۱۴- خردکن فکی

خردکن غلتکی: قسمت‌های اصلی این خردکن از دو غلتک فلزی سنگین که روی دو محور افقی موازی می‌چرخند تشکیل شده است. شکل ۱۰-۱۵ نشان دهنده این نوع خردکن‌ها است. قطعات بزرگ‌تر وارد غلتک می‌شوند و پس از خرد شدن از پایین خارج می‌شوند. دو غلتک معمولاً به طرف یکدیگر و با سرعت مساوی می‌چرخند.



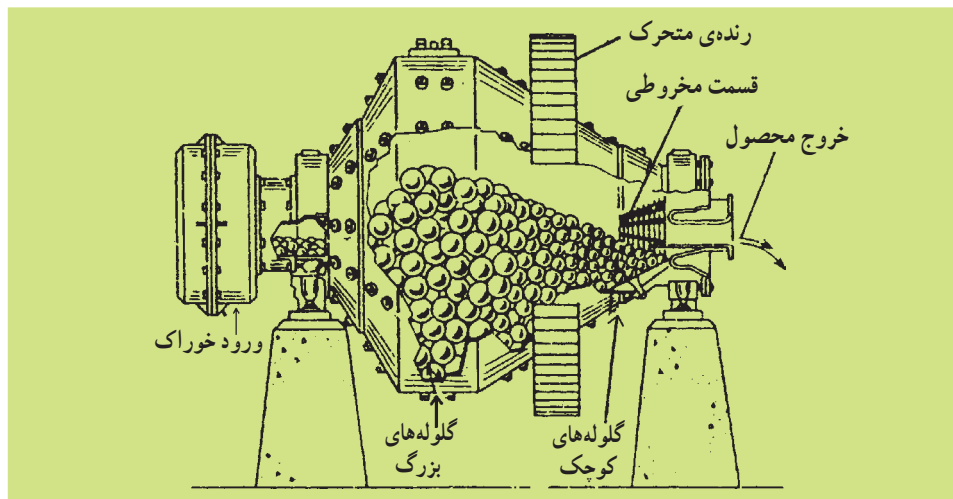
شکل ۱۰-۱۵- خردکن غلتکی

قطر غلتک‌ها را معمولاً زیاد و فاصله بین آن‌ها را کم در نظر می‌گیرند به طوری که این نوع خردکن‌ها قادرند که قطعات نسبتاً بزرگ را به قطعات کوچک‌تر تبدیل کنند. قطر این نوع غلتک‌ها از ۶۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند و معمولاً با سرعت ۵۰ تا ۳۰۰ دور در دقیقه می‌چرخند. طبیعی است که اندازه خرده‌های محصول بستگی به فاصله بین غلتک‌ها دارد. در این نوع



خردکن‌ها مقدار کمی محصول نرم، به صورت پودر نیز تولید می‌شود. در خردکن‌های مذکور نیروی اعمال شده از طرف غلتک‌ها بسیار بالاست و معمولاً بین ۵۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ پوند نیرو بر هر اینچ از عرض غلتک است. وقتی مواد غیر قابل خرد شدن وارد این دستگاه بشوند برای جلوگیری از صدمات وارده به غلتک‌ها معمولاً حداقل یکی از غلتک‌ها را به فتر متصل می‌کنند.

۱-۴-۲- آسیاب‌ها: محصولات خروجی خردکن‌ها معمولاً خوراک ورودی به آسیاب‌ها را تشکیل می‌دهد و هدف آسیاب‌ها در واقع خردکردن ذرات متوسط و تولید ذرات ریزتر است. در این جا تنها به تشریح نمونه مرسوم آسیاب‌ها که بیشتر در صنایع شیمیایی کاربرد دارد می‌پردازیم. آسیاب دوار: شکل ۱۰-۱۶ طرح یک آسیاب دوار را نشان می‌دهد. این آسیاب از یک استوانه دوار تشکیل شده است که در حالت ساکن، حدود نیمی از حجم داخل آن را با مواد ساییده پر می‌کنند. جنس این استوانه معمولاً از فولاد است که برای جلوگیری از سایش، سطح داخلی آن را از ورقه‌های فولاد سخت، چینی، سیلیس و یا حتی لاستیک می‌پوشانند. این استوانه با سرعت کم حول محور افقی خود می‌چرخد. مواد ساییده آسیاب دوار می‌تواند به صورت میله یا ساچمه از جنس‌های فلزی، لاستیکی و یا چرمی باشد. حتی گاهی از سنگ‌های چخماق و یا گلوله‌هایی از جنس چینی به عنوان مواد ساییده استفاده می‌کنند.



شکل ۱۰-۱۶- آسیاب دوار

آسیاب‌های دوار می‌توانند هم به صورت پیوسته<sup>۱</sup> و هم به صورت ناپیوسته<sup>۲</sup> کار کنند. در آسیاب‌های ناپیوسته مقدار معینی از جسم را از دهانه استوانه به داخل آن می‌ریزند، سپس دهانه

۱- Continous

۲- Batch

استوانه را می‌بندند و آسیاب را برای مدتی طولانی می‌چرخانند. سپس آسیاب را متوقف می‌کنند و محصولات آن را خارج می‌کنند. در آسیاب‌های پیوسته، اجسام با حرکت مستمر و یک‌نواخت از مسیر مشخصی وارد و پس از آسیاب شدن از مسیر دیگری خارج می‌شوند. اساس کار آسیاب‌های دوار بدین صورت است که در اثر حرکت چرخشی استوانه مواد ساینده از کنار استوانه تا نزدیک سقف استوانه بالا می‌آیند و در آنجا در اثر نیروی ثقل روی ذراتی که در کف استوانه است فرو می‌افتند. در بعضی آسیاب‌های دوار به جای گلوله از میله به‌عنوان عامل ساینده استفاده می‌شود. در آسیاب‌های میله‌ای دوار، قسمت اعظم خرد شدن در اثر فشار و سایش در هنگام غلتیدن میله‌ها روی یکدیگر انجام می‌گیرد ولی در آسیاب‌های ساجمه‌ای دوار یا قلوه‌سنگی دوار قسمت اعظم خرد شدن در اثر برخورد در هنگام ریزش قلوه سنگ‌ها یا گلوله‌ها از بالای استوانه صورت می‌گیرد. در آسیاب‌های گلوله‌ای معمولاً قطر استوانه را حدود ۳ متر و طول آن‌ها را حدود ۳/۵ متر در نظر می‌گیرند. قطر گلوله‌ها بین ۲/۵ تا ۱۲/۵ سانتی‌متر تغییر می‌کند.

همان‌طور که بیان شد، تعداد گلوله‌ها و یا میله‌ها در آسیاب‌های دوار باید طوری باشد که در حالت سکون بیش از نیمی از حجم استوانه را اشغال کند. گلوله‌ها در اثر حرکت استوانه به‌طرف بالا حمل می‌شوند و هرچه آسیاب با سرعت بیشتری بچرخد گلوله‌ها تا ارتفاع زیادتری بالا می‌روند و هرچه گلوله‌ها از ارتفاع بیشتری سقوط کنند طبیعتاً شدت اصابت با کف آسیاب افزایش می‌یابد و بازده آسیاب کردن بالاتر می‌رود. باید به این نکته توجه کرد که اگر سرعت آسیاب کردن از حدی بگذرد دیگر گلوله‌ها ریزش نمی‌کنند و در استوانه فقط از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل می‌شوند. در این حالت در آسیاب نیروی گریز از مرکز بر نیروی جاذبه غالب می‌شود. سرعت این مرحله را سرعت بحرانی می‌گویند. در حالت بحرانی تقریباً عمل خرد شدن انجام نمی‌گیرد لذا سرعت آسیاب در شرایط عملیاتی همواره باید کم‌تر از سرعت بحرانی باشد.

## مطالعه آزاد

شکل ۱۷-۱° وضعیت یک گلوله در نقطه A و نیروهای مؤثر بر آن را که عبارت‌اند از: نیروی جاذبه و نیروی گریز از مرکز، نشان می‌دهد. اگر نیروی گریز از مرکز  $\mu^2(R-r)$  از مؤلفه شعاعی نیروی جاذبه یعنی  $mg \cos \alpha$  بیشتر باشد گلوله از بدنه استوانه جدا نمی‌شود. هنگامی که این دو نیرو با هم برابر شوند، گلوله در معرض سقوط قرار می‌گیرد:

$$mg \cos \alpha = \frac{m \cdot u^2}{(R-r)} \quad (17-1)$$

$m$  = جرم گلوله  
 $g$  = شتاب جاذبه  
 $u$  = سرعت خطی مرکز گلوله  
 $R$  = شعاع استوانه  
 $r$  = شعاع گلوله

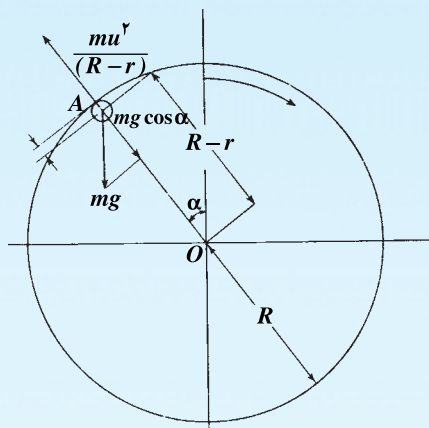
در نتیجه خواهیم داشت :

$$\cos \alpha = \frac{u^2}{(R-r)g} \quad (2-1)$$

رابطه بین سرعت خطی گلوله و سرعت دورانی به قرار زیر است :

$$u = 2\pi(R-r)n \quad (3-1)$$

$n$  = سرعت دورانی استوانه



شکل ۱۷-۱-۱- نمایش نیروهای وارد بر یک گلوله

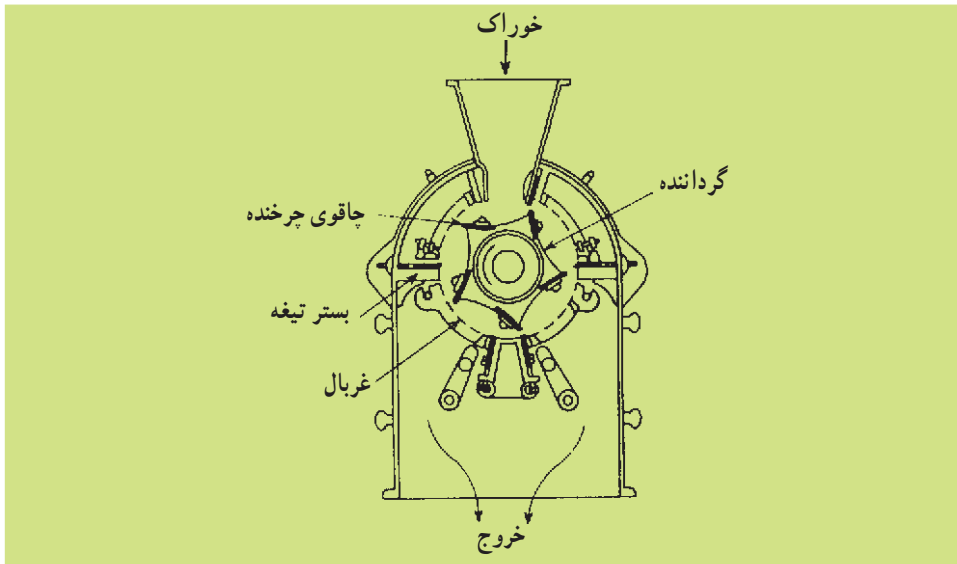
در نتیجه رابطه ۳-۱ را در رابطه ۲-۱ خواهیم داشت

$$\cos \alpha = \frac{4\pi^2 n^2 (R-r)}{g} \quad (4-1)$$

در حالت بحرانی که  $\alpha = 0$  و  $\cos \alpha = 1$  است، سرعت بحرانی را  $n_c$  می‌نامیم  
 (  $n = n_c$  ). اگر سرعت بحرانی بر حسب دور بر دقیقه (rpm) و  $R$  و  $r$  بر حسب ft و  $g$   
 بر حسب  $\text{ft}/\text{min}^2$  قرار دهیم، سرعت بحرانی از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$n_c = 54 / 2 \sqrt{\frac{1}{R-r}} \quad (5-1)$$

۱۰-۴-۳- دستگاه‌های بُرنده: در بعضی از مواقع قطعات ماده اولیه به قدری محکم و یا قابل ارتجاع هستند که شکستن و خرد کردن آن‌ها به کمک عامل فشار، ضربه یا سایش امکان‌پذیر نیست ولی به هر حال لازم است که این قطعات به قطعات ریزتر با ابعاد مشخص تبدیل شوند. در این مواقع از دستگاه‌هایی که عمل بریدن و یا پاره و تکه کردن قطعات را انجام می‌دهند، استفاده می‌شود. شکل ۱۰-۱۸ یک نوع دستگاه برنده با تیغه‌های گردان را نشان می‌دهد. این دستگاه دارای چرخاننده‌ای است که با سرعت ۲۰۰ تا ۹۰۰ دور در دقیقه در یک محفظه استوانه‌ای می‌چرخد. روی چرخاننده ۲ تا ۱۲ تیغه چاقو وجود دارد که لبه هریک از آن‌ها از فولاد سخت و آبدیده ساخته شده است. این تیغه‌ها با فاصله‌های کمی از روی تیغه‌های ثابت می‌گذرند. مواد اولیه از بالا وارد دستگاه می‌شود و پس از بریده شدن از پایین خارج و وارد غربال با قطر سوراخ مناسب می‌شود.



شکل ۱۰-۱۸- دستگاه برنده

### ۱۰-۵- عملکرد دستگاه‌های کاهش اندازه

هزینه خرد کردن و آسیاب کردن قطعات نسبتاً بالاست. بنابراین عواملی که به نحوی این هزینه‌ها را کنترل می‌کنند، اهمیت دارند و باید شناسایی و مورد بررسی قرار گیرند. در انتخاب مناسب و اقتصادی دستگاه‌های کاهش اندازه قطعات باید به جزئیات بسیاری از مواد و قسمت‌های کمکی این دستگاه‌ها توجه کرد تا عملکرد این دستگاه‌ها مطلوب باشد، به عنوان مثال:

- مواد اولیه باید اندازه مشخصی داشته باشند و با سرعت یک‌نواختی وارد شوند.
- به محض این‌که محصولات به اندازه تعیین شده درآمدند، از انتهای دستگاه خارج شوند.

– قطعات نشکن از پایین خارج می‌شوند.

در مواردی که اجسام خرد شونده نسبت به حرارت حساس باشند، باید حرارت ایجاد شده در این دستگاه‌ها به نحوی خارج شود.

– گرم‌کن‌ها و سردکن‌ها، غربال‌ها، پمپ‌ها، دمنده‌ها و تغذیه‌کننده‌ها از قسمت‌های فرعی مهم دستگاه‌های کاهش اندازه قطعات هستند که عملکرد آن‌ها نقش مستقیمی در عملکرد این دستگاه‌ها دارند.

## خودآزمایی

۱– هدف از همزدن مواد چیست؟ توضیح دهید.

۲– انواع اختلاط را نام ببرید.

۳– عمل جدا شدن فازها در اختلاط مایعات و اختلاط جامدات چه تفاوتی دارد؟

۴– برای پخش گاز در مایع از چه نوع پره‌ای استفاده می‌شود؟ این نوع پره چه نوع جریانی

(محوری، شعاعی، مماسی) ایجاد می‌کند؟

۵– دو نوع پره که برای همزدن مایعات با گرانروی بالا به کار می‌روند، نام ببرید. سرعت دوران

آن‌ها چگونه است؟

۶– نحوه کار مخلوط‌کن‌های ساکن را توضیح دهید.

۷– سه روش اصلی در اختلاط جامدات را نام ببرید و در هر مورد طرز کار یک دستگاه را

شرح دهید.

۸– طرز کار یک خردکن غلتکی و یک آسیاب ساچمه‌ای را توضیح دهید.

۹– پنج مورد که در انتخاب مناسب و اقتصادی دستگاه‌های کاهش اندازه مؤثر می‌باشند نام

ببرید.

۱۰– در آسیاب‌های دوار، گلوله‌ها یا میله‌ها حداکثر چه حجم از مخزن را می‌توانند اشغال

کنند؟ چرا؟

### برج های تقطیر و استخراج

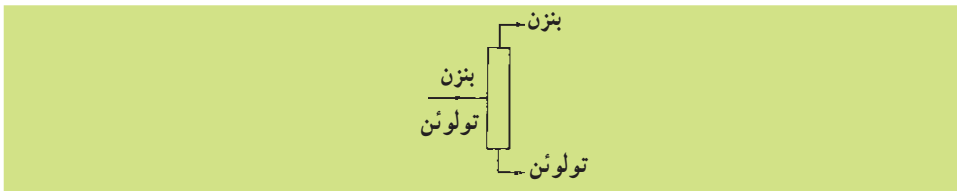
هدف های رفتاری: پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می رود بتواند:

- ۱- اصول تقطیر را توضیح دهد.
- ۲- انواع تقطیر را شرح دهد.
- ۳- اصول استخراج مایع از مایع را توضیح دهد.
- ۴- کاربرد انواع برج های تقطیر را توضیح دهد.
- ۵- کاربرد انواع برج های استخراج را توضیح دهد.

#### تقطیر<sup>۱</sup>

جداسازی مخلوط مایعات به چند جزء یکی از مهم ترین فرآیندهای مورد استفاده در صنایع شیمیایی و صنایع نفت است و تقطیر یکی از روش های بسیار متداولی است که برای این منظور به کار می رود. این روش در مورد جداسازی اکثر مخلوط مایعات یک نواخت (هموژن) به کار می رود نظیر آب، الکل، بنزین و تولوئن و ...

در محدوده کاربرد تقطیر در صنایع شیمیایی، ستون های تقطیر با ظرفیت های بسیار بالاتری نسبت به هرگونه تجهیزات دیگر، طراحی و ساخته می شوند. مانند ستون های تقطیر که از ۳/۰ تا ۱۰ متر قطر و از ۳ تا ۷۵ متر ارتفاع دارند<sup>۲</sup>. به طور کلی نتیجه می شود که در مواردی امکان استفاده از عمل تقطیر وجود دارد که محصولات عمل تقطیر به صورت خالص بوده و نیاز به تفکیک مجدد ندارند و بدین جهت می توان ادعا کرد که تقطیر متداول ترین و مهم ترین عمل در میان عملیات جداسازی است.



شکل ۱۱-۱- جداسازی یک مخلوط دو جزئی

<sup>۱</sup> - Distillation

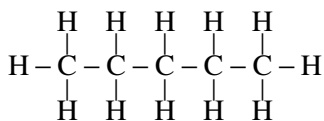
<sup>۲</sup> - اعداد و ارقام این فصل فقط جنبه آگاهی دارد و نباید حفظ شوند.

## ۱۱-۱- اصول تقطیر

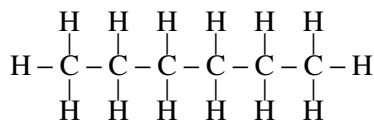
تقطیر یک روش جداسازی است که بر اساس عمل تبخیر و میعان صورت می‌پذیرد و مواد به دلیل اختلاف نقطه جوش از هم جدا می‌شوند. مایعاتی که دارای فشار بخار کم‌تر هستند دارای نقطه جوش بالاتر و مایعاتی که دارای فشار بخار بیشتری هستند نقطه جوش پایین‌تری دارند. در اصطلاح به موادی که دارای فشار بخار کم‌تر هستند مواد سنگین‌تر و موادی که دارای فشار بخار بالاتر هستند، سبک‌تر (فرآتر) گفته می‌شود.

بنابراین مایعی که از مولکول‌های کوچک تشکیل شده است و به آسانی به بخار تبدیل می‌شود جزء سبک و مایعی که از مولکول‌های بزرگ تشکیل یافته است و به سختی به بخار تبدیل می‌شود جزء سنگین نامیده می‌شود.

قابلیت تبخیر (فراریت<sup>۱</sup>) اصطلاحی است که مبین کیفیت تبخیر یک مایع می‌باشد. مایعاتی که به آسانی تبدیل به بخار می‌شوند دارای قابلیت تبخیر زیاد و مایعاتی که به سادگی تبدیل به بخار نمی‌شوند قابلیت تبخیر کم دارند. وقتی نقطه جوش مایعی پایین باشد فشار بخار آن زیاد و قابلیت تبخیرش زیاد است و برعکس مایعاتی که دارای فشار بخار کم هستند غیر فرارند و دارای قابلیت تبخیر کم هستند. دو مایع الف و ب را در نظر می‌گیریم. مایع الف دارای مولکول‌های سبک، قابلیت تبخیر بیشتر، فشار بخار بالاتر و نقطه جوش پایین‌تر از مایع ب است. به فرمول‌های گسترده زیر توجه کنید.



پنتان مولکول کوچک‌تر (مایع الف)



هگزان مولکول بزرگ‌تر (مایع ب)

به عنوان مثال اگر مخلوط مایعی از دو جزء پنتان و هگزان به مقدار مساوی از هر کدام داشته باشیم و آن را حرارت بدهیم و قسمتی از آن را تبخیر کنیم، مشاهده خواهیم کرد که مقدار پنتان در فاز بخار بیشتر از هگزان خواهد بود و برعکس، در فاز مایع، باقی مانده مقدار هگزان بیشتر از پنتان است. دلیل این امر قابلیت تبخیر بالاتر پنتان نسبت به هگزان است. البته اگر تمام مخلوط تبخیر شود و بخار حاصل به مایع تبدیل شود، همان درصد ترکیب‌ها و همان میزان از جسم سبک و سنگین در بخار مایع شده موجود خواهد بود.

## ۱۱-۲- انواع تقطیر

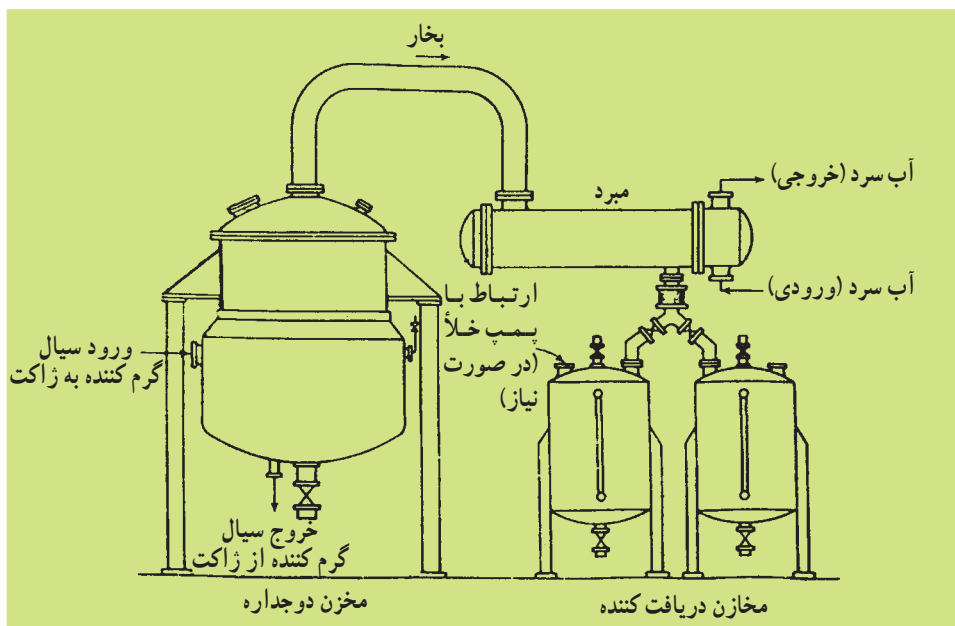
در عمل، چند روش اصلی برای تقطیر وجود دارد:

۱- تقطیر ساده<sup>۱</sup> (یا یک مرحله‌ای): } پیوسته  
 ناپیوسته

۲- تبخیر ناگهانی<sup>۲</sup> (پیوسته)

۳- تقطیر چندمرحله‌ای یا جزء به جزء<sup>۳</sup>: } پیوسته<sup>۴</sup>  
 ناپیوسته<sup>۵</sup>

۱۱-۲-۱- تقطیر ساده: یکی از ساده‌ترین روش‌های جداسازی، تقطیر ساده است. در این روش، در ابتدا دیگ را از مخلوط مورد نظر پر می‌کنیم و تحت حرارت ثابت و یک‌نواخت قرار می‌دهیم. در این فرآیند، در اثر جوشیدن قسمتی از مایع بخار می‌شود و از بالای دیگ وارد یک مبرد<sup>۶</sup> و مجدداً مایع می‌شود. این بخار مایع شده نسبت به مایع باقی‌مانده در دیگ از جسم سبک غنی‌تر است و به همان میزان مایع باقی‌مانده، از جسم سبک‌تر و از جسم سنگین‌تر غنی‌تر است. به این ترتیب خوراک به دو محصول سبک‌تر و سنگین‌تر تبدیل شده است. در این روش فقط در صورتی که اختلاف فراریت مواد نسبت به هم خیلی زیاد باشد، امکان تولید محصولات به صورت خالص وجود دارد. این تقطیر ممکن است به دو صورت پیوسته یا ناپیوسته انجام شود. (شکل ۱۱-۲)



شکل ۱۱-۲- تقطیرکننده ساده

۱- Simple Distillation

۲- Flash Vaporization

۳- Fractional Distillation

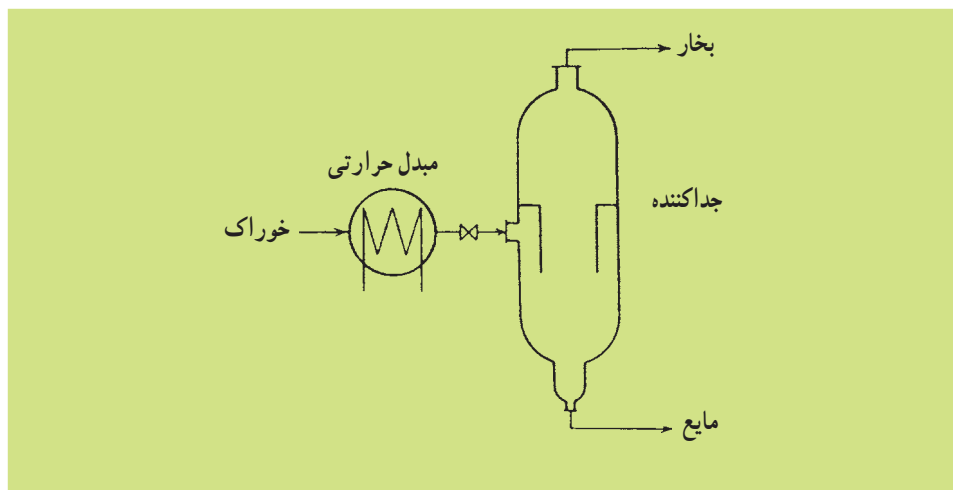
۴- Continuous

۵- Batch

۶- Cooler (condenser)

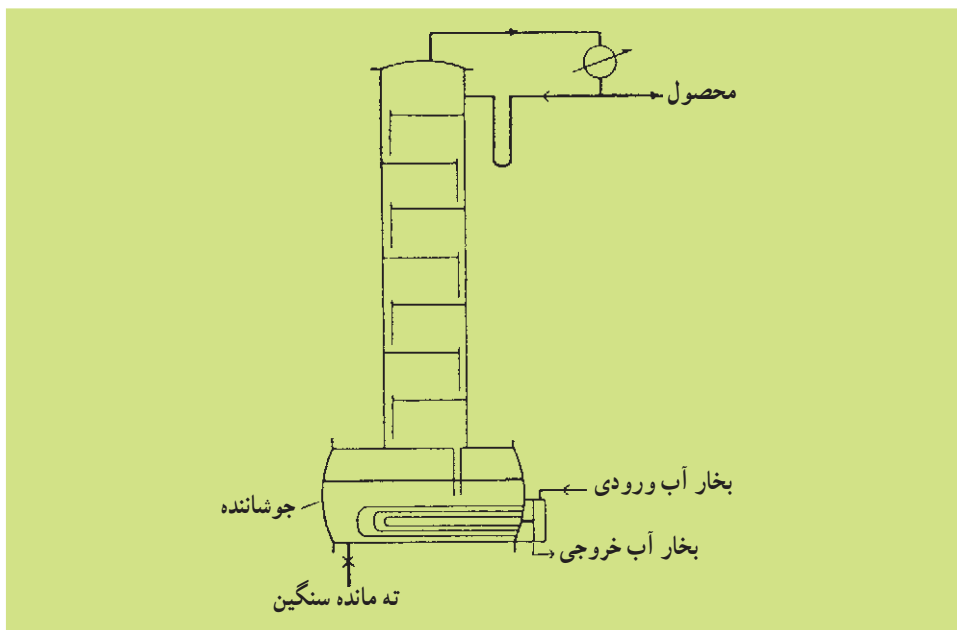


۱۱-۲-۲- تبخیر ناگهانی: این روش غالباً به صورت پیوسته انجام می‌گیرد. (شکل ۱۱-۳) بدین منظور با کاهش فشار و افزایش درجه حرارت خوراک، آن را به دو فاز مایع و بخار تبدیل می‌کنند و سپس آن را وارد یک ظرف جداکننده می‌کنند. در این ظرف فاز بخار که قسمت‌های سبک خوراک است از بالای ظرف خارج می‌شود و فاز مایع که سنگین‌تر است از پایین ظرف خارج می‌شود. از این روش در صنعت نفت به‌طور گسترده استفاده می‌شود. به عنوان مثال نفت خام با دمای  $44^{\circ}\text{K}$  و فشار  $90^{\circ}\text{kPa}$  وارد یک مخزن لوله‌ای می‌شود و در دمای  $52^{\circ}\text{K}$  و فشار  $40^{\circ}\text{kPa}$  آن را ترک می‌کند که تقریباً ۱۵٪ خوراک که حاوی مواد سبک است تبخیر می‌شود. نکته مهم این است که با یک بار عمل تقطیر، با تبخیر ناگهانی یا تقطیر ساده، نمی‌توان به خالص‌سازی ماده مورد نظر تا درجه دلخواه رسید، بنابراین برای خالص‌تر کردن خوراک باید متوسل به روش‌های دیگر تقطیر شد.



شکل ۱۱-۳- تبخیر کننده ناگهانی

۱۱-۲-۳- تقطیر جزء به جزء (ناپیوسته): در تقطیر ناپیوسته بیشتر اجزای سبک‌تر از مخزن (دیگ) تبخیر می‌شود. در نتیجه به تدریج و در طول زمان عملیات، مخزن از اجزای سنگین‌تر غنی‌تر می‌شود. تقطیر تا وقتی ادامه پیدا می‌کند که میزان اجزای سبک (فرار) در داخل مخزن به میزان مورد نظر برسد. تقطیر ناپیوسته به‌عنوان یک فرآیند آسان در بسیاری از صنایع شیمیایی به کار می‌رود. در این حالت تمام خوراک در شروع عملیات در دیگ ریخته و حرارت داده می‌شود. سپس بخارها از درون یک ستون جداکننده (برج تقطیر) عبور می‌کنند. ترکیب محصولات بالای برج، بستگی به ترکیب خوراک، ارتفاع برج و میزان تماس مایع و بخار در داخل برج دارد. (شکل ۱۱-۴)



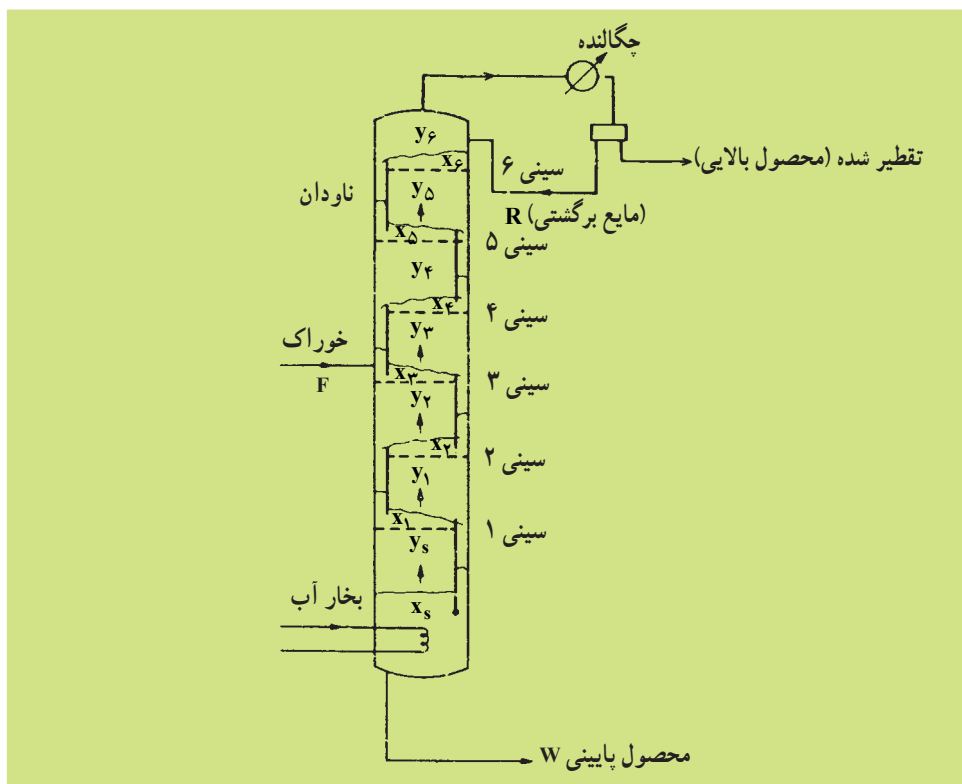
شکل ۱۱-۴- ستون برای برج تقطیر ناپیوسته

در شروع عملیات، محصول بالای برج، بیشترین درصد از ماده سبک را خواهد داشت. پرسش: به شکل ۱۱-۴ توجه کنید. چرا بخشی از محصول به برج برگشت داده می‌شود؟ چرا این جریان برگشتی به شکل U است؟ در هنگام عملیات محصول بالای برج، نسبت به مایع باقی مانده در ظرف همواره از اجزای سبک‌تر، غنی‌تر است با ادامه کار برج، خلوص محصول بالای برج، به تدریج کاهش پیدا می‌کند زیرا ترکیبات سنگین نیز تبخیر می‌شوند. بنابراین در تقطیر ناپیوسته مدت زمانی که عملیات ادامه می‌یابد، نقش مهمی در خلوص محصول دارد.

۱۱-۲-۴- تقطیر جزء به جزء (پیوسته): عملیات یک ستون تقطیر پیوسته مطابق شکل ۱۱-۵ است. یک ستون، شامل یک بدنه فلزی استوانه‌ای است که توسط سینی‌های سوراخ‌دار به چندین بخش تقسیم شده است. این سینی‌ها قابلیت عبور بخار را به سمت بالا و گذراندن مایع را به سمت پایین دارند. بخاری که به طرف بالا می‌رود از آخرین سینی بالای برج عبور می‌کند، به یک چگالنده<sup>۱</sup> می‌رود و به مایع تبدیل می‌شود. قسمتی از مایع تولیدی به عنوان محصول گرفته می‌شود و قسمتی دیگر به بالاترین سینی داخل برج برگردانده می‌شود. مایع برگشتی<sup>۲</sup> از بالای برج، از روی هر

۱- به مبردی که بخار را به مایع تبدیل می‌کند، چگالنده (Condenser) می‌گویند.

۲- Reflux



شکل ۱۱-۵ - ستون تقطیر پیوسته

سینی که عبور می‌کند از سرریز و ناودان به سینی پایینی می‌ریزد. مایع در پایین برج در داخل جوشاننده توسط بخار آب و یا یک جریان روغن داغ گرم می‌شود و قسمتی از آن به بخار تبدیل می‌شود و مایع باقی‌مانده به عنوان محصول از پایین برج خارج می‌شود. بخارهای حاصله از پایین برج با عبور از سوراخ‌های سینی‌های برج به طرف بالا می‌رود. روی هر سینی مایع و بخار ورودی به آن در تماس با هم قرار می‌گیرند و اجزای سبک‌تر به داخل فاز بخار و اجزای سنگین‌تر به داخل فاز مایع می‌روند. بدین ترتیب نقش هر سینی در داخل برج تقطیر، ایجاد تماس بین مایع و بخار، سبک‌تر کردن بخار و سنگین‌تر کردن مایع خواهد بود. در نتیجه بخار به تدریج که به طرف بالای برج حرکت می‌کند سبک‌تر می‌شود. به عکس مایع برگشتی از بالای برج به تدریج با پایین آمدن سنگین‌تر می‌شود.

جریان خوراک در برج به جایی وارد می‌شود که جریان مایع یا بخار داخل برج تقریباً دارای همان ترکیب خوراک باشد. قسمتی از برج که بالای نقطه خوراک است به عنوان بخش تصفیه<sup>۱</sup> و قسمت پایین به عنوان قسمت عاری‌سازی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. با توجه به این مطالب خوراک ورودی

۱- Rectifying Section

۲- Stripping Section

به برج در اثر تماس‌های متوالی مایع و بخار روی سینی‌های داخل برج به دو محصول سبک (خروجی از بالای برج) و سنگین (خروجی از پایین برج) تبدیل می‌شود. با این روش، می‌توان به‌طور پیوسته، محصولاتی با خلوص بالا تولید کرد. به دلیل ثابت بودن وضعیت عملیاتی، تقطیر غیر پیوسته ارجح است.

### ۱۱-۳- فشار برج‌های تقطیر

معمولاً سعی می‌شود که به‌منظور راحتی و کاهش هزینه‌ها، تقطیر تحت فشار اتمسفریک انجام شود. در مواردی که خوراک ورودی به برج بسیار سنگین باشد، به دلیل بالا بودن نقطه جوش، احتمال تجزیه مواد قبل از رسیدن به نقطه جوش، ممکن است تقطیر زیر فشار اتمسفریک (تحت خلأ) انجام گیرد. مثلاً در پالایشگاه نفت برای جدا کردن برش روغن از نفت خام جهت جلوگیری از تجزیه خوراک از برج تقطیر تحت خلأ استفاده می‌شود. در ضمن در مواردی نیز که خوراک بسیار سبک است نقطه جوش خوراک تحت فشار اتمسفریک در زیر درجه حرارت محیط است در چنین شرایطی انجام عملیات تقطیر تحت فشار اتمسفریک پرهزینه است و لازم است که با افزایش فشار عملیات نقطه جوش محصولات را به درجه حرارت محیط رساند. در این حالت، عملیات تقطیر تحت فشار انجام خواهد شد؛ به عنوان مثال جهت جدا کردن پروپان از بوتان با توجه به این‌که نقطه جوش این مواد تحت فشار اتمسفریک زیر صفر درجه سانتی‌گراد است از برج تقطیر تحت فشار حدود ۱۰ اتمسفر استفاده می‌شود.

### مثال‌های عملی

مثال ۱: مخلوط ۵۵٪ مولی اتانل، ۴۵٪ مولی آب در داخل دیگ یک برج تقطیر غیر پیوسته تحت فشار اتمسفریک ریخته می‌شود و عملیات تقطیر تا وقتی که درصد الکل در داخل دیگ به ۱۰/۵٪ مولی برسد ادامه یابد. نتایج زیر به دست خواهد آمد:

درصد مولی اتانل در اولین قطره محصول بالای برج ۷۸٪

درصد مولی اتانل در آخرین قطره محصول بالای برج ۷۴٪

درصد مولی متوسط اتانل در محصول بالای برج ۷۷٪

به ازای هر صد کیلو مول ورودی مقدار محصول بالای برج ۶۶/۷ کیلومول

مثال ۲: جهت جدا کردن یک کیلوگرم در ثانیه محلول ۳۰٪ وزنی آمونیاک در آب از یک برج

تقطیر پیوسته استفاده می‌شود. نتایج حاصل از عملیات به شرح زیر است:

درصد آمونیاک در محصول بالای برج ۹۹/۵٪

درصد آب موجود در محصول بالای برج ۰/۵٪

درصد آمونیاک در محصول پایین برج ۱°  
 درصد آب در محصول پایین برج ۹°

مقدار محصول بالای برج ۲۲° / کیلوگرم  
 ثانیه

مقدار محصول پایین برج ۷۸° / کیلوگرم در ثانیه  
 تعداد سینی‌های لازم ۹ سینی

## استخراج<sup>۱</sup>

### ۱۱-۴- استخراج مایع از مایع

عمل استخراج فرآیندی است که به آن استخراج یا حلال نیز می‌گویند. در آن اجزای یک محلول مایع را از طریق تماس با حلالی که اجزای محلول را به نسبت متفاوت در خود حل می‌کند و باعث تشکیل دو فاز مایع نامحلول در هم می‌شود جدا می‌کند. اگر موادی که جزئی از محلول اولیه هستند به مقداری متفاوت در دو فاز مایع پخش شوند جداسازی نسبی حاصل می‌شود. وقتی فشار بخار دو ماده خیلی به هم نزدیک باشد یا وقتی که در اثر حرارت دادن یکی از مواد، طبیعت و خاصیت خود را از دست دهد روش تقطیر کاربرد نداشته، از استخراج مایع - مایع<sup>۲</sup> استفاده می‌کنیم.

مثال: اگر محلولی از استیک اسید در آب را که با روش تقطیر از هم قابل تفکیک نیستند با مایعی مثل اتیل استات مخلوط کنیم مقداری اسید و مقدار خیلی کم آب وارد فاز استر می‌شوند و مابقی اسید و آب در فاز آب باقی می‌ماند چون در حال تعادل، دانسیته فاز آبی و استری با هم متفاوت هستند بعد از آن که همزدن متوقف شود، از هم جدا می‌شوند و می‌توان به وسیله عمل سرریز کردن، آن دو را از هم جدا کرد. در این حالت چون نسبت اسید به آب در لایه استری با محلول اولیه و محلول آبی باقی مانده متفاوت است عمل جداسازی تا حدودی انجام شده است. این حالت مثالی از یک مرحله عملیات استخراج است. مایع آبی باقی مانده را می‌توان برای کاهش مقدار اسید دوباره با استر مجاور ساخت.

۱- Extraction

۲- Liquid - Liquid Extraction

## ۱۱-۵- عملیات استخراج (فرآیند استخراج)

در تمام عملیات استخراج، محلولی که استخراج از آن انجام می‌شود «خوراک» و مایعی که خوراک با آن مجاور می‌شود «حلال<sup>۱</sup>» نامیده می‌شود. محلولی که از حلال غنی است «استخراج شده<sup>۲</sup>» و مایع باقی مانده که از آن جدا شده است «پس مانده<sup>۳</sup>» نامیده می‌شود.

فرض کنید محلول دو جزئی A و B را داریم و می‌خواهیم ماده A را از ماده B جدا کنیم و چون فراریت این دو ماده نزدیک به یکدیگر است، استفاده از عمل تقطیر امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل از عملیات استخراج به کمک حلال «S» استفاده می‌کنیم. ابتدا حلال S را با خوراک (محلول A و B) به خوبی مخلوط می‌کنیم تا جزء A در حلال حل شود. محلول «استخراج شده» که شامل S، A و مقدار کمی B است با «محلول پس مانده» که شامل B و مقدار کمی A است دو فاز را تشکیل می‌دهد و اگر زمان کافی به آن‌ها داده شود از یکدیگر جدا می‌شوند. این دو عملیات یعنی «اختلاط خوراک و حلال» و «جداسازی محلول استخراج شده و محلول پس مانده» یک مرحله از عملیات استخراج را تشکیل می‌دهند. در کلیه دستگاه‌های استخراج (پیوسته یا ناپیوسته) عملیات استخراج در چند مرحله انجام می‌شود تا جداسازی به نحو مطلوب انجام شود.

در فرآیندهای پیچیده‌تر استخراج، ممکن است برای جداسازی اجزای یک خوراک از دو حلال استفاده شود.

مثال: مخلوطی از اسید «ارتو» و «پارا» نیتروبنزویک را می‌توان با پخش آن‌ها بین دو مایع نامحلول آب و کلروفرم جدا کرد. بدین ترتیب کلروفرم ایزومر «پارا» را بهتر حل می‌کند و آب ایزومر «ارتو» را بهتر حل می‌کند. این عمل، استخراج دو حلالی یا جزئی نامیده می‌شود.

## ۱۱-۶- انتخاب حلال

معمولاً حلال‌های فراوانی برای عملیات استخراج قابل استفاده هستند؛ اما در هریک از آن‌ها باید مشخصات زیر را برای حلال در نظر گرفت.

- ۱- حلال نباید سمی و قابل اشتعال باشد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد.
- ۲- حلال باید از نظر شیمیایی پایدار بوده و با اجزای سیستم وارد واکنش‌های شیمیایی نگردد.
- ۳- مؤثر بودن حلال برای جداسازی با پارامتری به نام ضریب‌گزیش<sup>۵</sup> سنجیده می‌شود. این پارامتر که بسیار شبیه به قدرت فراریت در تقطیر است مقایسه‌ای است بین میزان مواد موجود در فاز استخراج شده به میزان مواد موجود در فاز پس مانده، در حالت تعادل.

۱- Feed

۲- Solvent

۳- Extract

۴- Raffinate

۵- Selectivity

۴- هر قدر حلال مصرفی در یکی از اجزای خوراک نامحلول تر باشد محدوده دو فازی وسیع‌تری را ایجاد می‌کند و با مقدار کمتری از حلال امکان جداسازی میسر می‌شود.

۵- حلال باید به آسانی بازیابی شود، یعنی به راحتی از موادی که در خود حل کرده است جدا شود. در بیشتر فرآیندها برای بازیابی حلال از عملیات تبخیر یا تقطیر استفاده می‌شود.

۶- تفاوت دانسیته بین فازهای استخراج شده و پس مانده هم در سیستم ناپیوسته و هم در سیستم پیوسته، شرط مهمی برای جداسازی فازها است و هرچه این تفاوت بیشتر باشد بهتر است.

۷- هرچقدر کشش سطحی بین دو فاز تشکیل شده بیشتر باشد پیوستگی ذرات امولسیون راحت‌تر ولی پراکندگی یک مایع در دیگری مشکل‌تر می‌شود. به هم پیوستن ذرات معمولاً از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا این امر باعث می‌شود که زمان جداسازی فازها کوتاه‌تر شود و در نتیجه کشش بین سطوح باید زیاد باشد.

## ۱۱-۷- برج‌های تقطیر

جهت انجام فرآیند تقطیر جزء به جزء در صنعت، از برج‌هایی استفاده می‌کنند که با توجه به ساختمان داخلی شان به دو دسته سینی‌دار<sup>۱</sup> و آکنده<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. به دلیل اهمیت این برج‌ها و کاربرد وسیع آن‌ها در صنایع مختلف به خصوص صنایع پالایش و پتروشیمی، لازم است با ساختمان و عملکرد آن‌ها آشنا شوید.

۱۱-۷-۱- برج‌های سینی‌دار: همان‌طور که قبلاً گفته شد در برج‌های سینی‌دار تماس بین فازهای مایع و بخار (گاز) روی سینی‌ها انجام می‌شود. این گونه برج‌ها اغلب فلزی و استوانه‌ای شکل هستند. یک طرح عمومی از برج‌های سینی‌دار در شکل ۱۱-۶ آمده است.

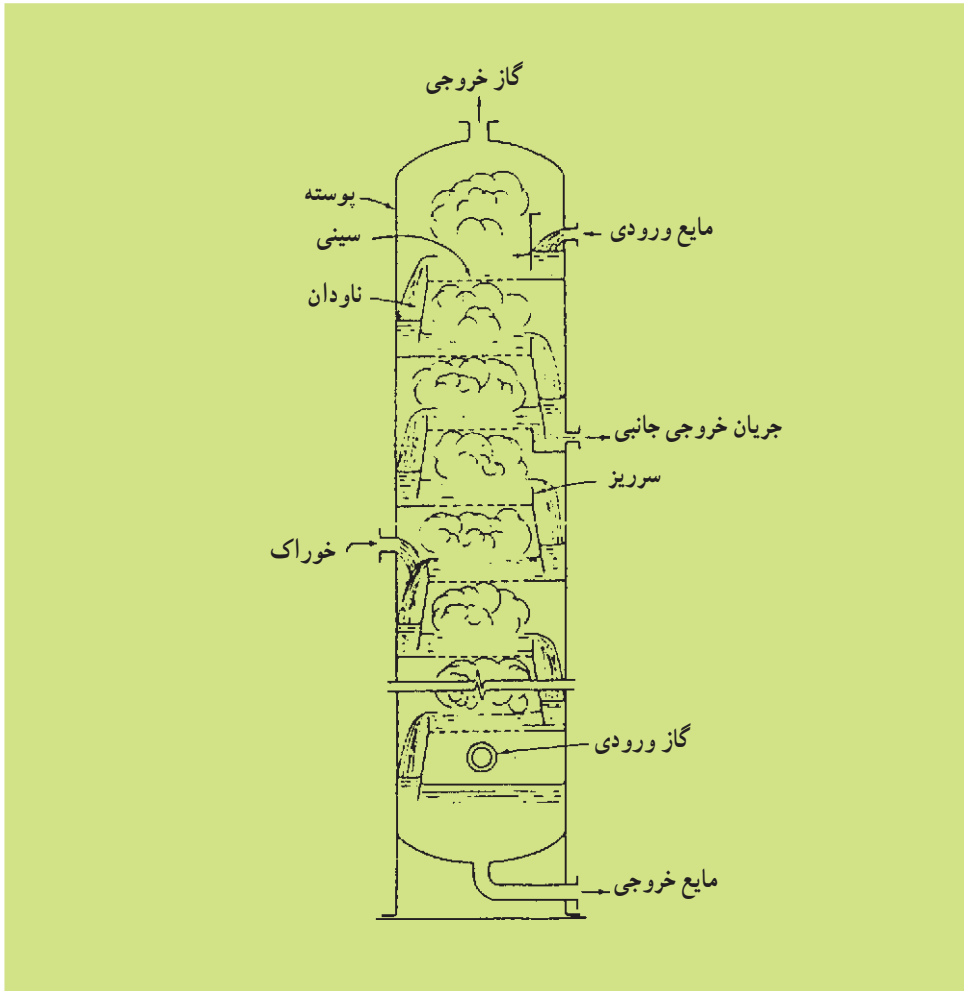
در این برج‌ها مایع از بالای برج از روی سینی‌ها عبور کرده و از طریق ناودان<sup>۳</sup> به طرف پایین حرکت می‌کند. بخار نیز از پایین از طریق منافذ سینی‌ها به طرف بالا حرکت می‌کند و بدین ترتیب در روی هر سینی مایع و بخار با هم مخلوط می‌شوند و امکان انتقال جرم این دو فاز میسر می‌شود. حرکت بخار از طریق منافذ به طرف بالا مانع عبور مایع از داخل سوراخ‌ها به طرف پایین می‌شود.

به منظور نگاه داشتن ارتفاع مناسبی از مایع بر روی هر سینی، از سرریز استفاده می‌شود و وقتی که ارتفاع مایع بالاتر از ارتفاع سرریز شد از طریق ناودان به سینی پایینی می‌ریزد. مایعی که سرریز شده است به صورت مخلوطی از مایع و بخار است و بخار همراه مایع، در طول ناودان از آن جدا می‌شود و مجدداً به طرف بالا حرکت می‌کند و بدین ترتیب مایع عاری از بخار، به سینی پایینی می‌ریزد. برای

۱- Tray Towers

۲- Packed Towers

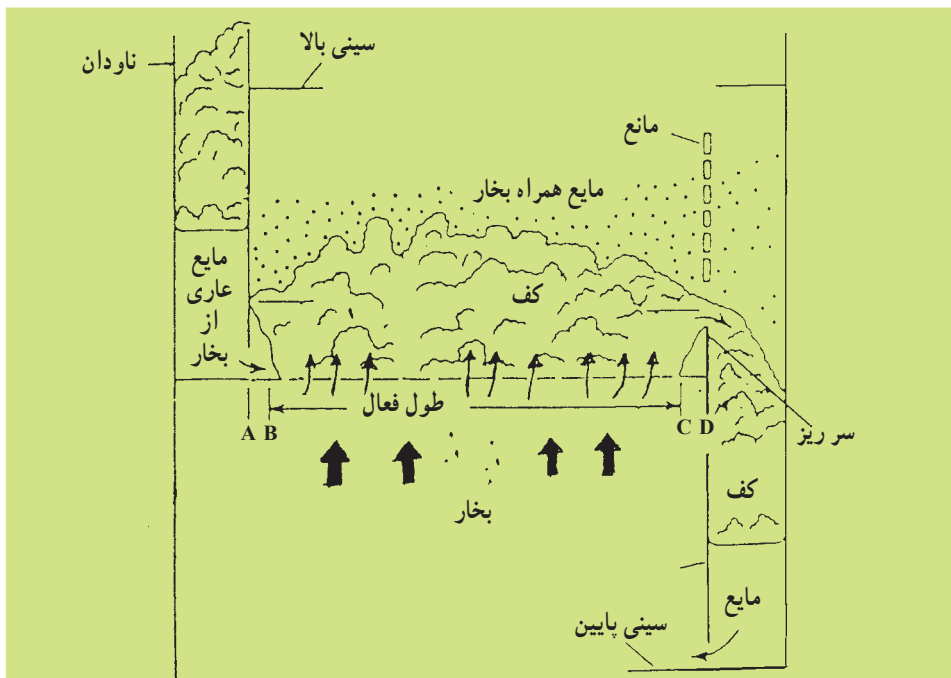
۳- Downcomers



شکل ۱۱-۶- طرح عمومی برج‌های سینی‌دار

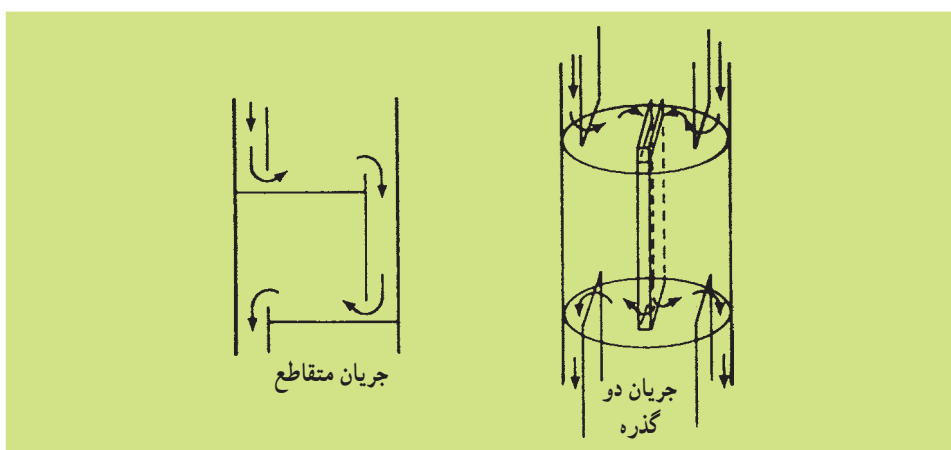
این‌که زمان لازم برای جدا شدن مایع از بخاری که به طرف بالا حرکت می‌کند وجود داشته باشد باید فاصله سینی‌ها به اندازه کافی باشد تا از بردن مایع توسط بخار به سینی بالایی جلوگیری شود. شکل ۱۱-۷ طرح ساده‌ای از این‌گونه پدیده‌ها را بر روی یک سینی نشان می‌دهد. فاصله بین سینی‌ها از حدود ۲ اینچ (۵ سانتی‌متر) تا حدود ۴ اینچ (۱۰ سانتی‌متر) تغییر می‌کند و هرچه قطر برج بزرگ‌تر باشد این فاصله نیز بیشتر می‌شود.





شکل ۱۱-۷- طرح ساده‌ای از نحوه جریان مایع و بخار بر روی یک سینی

نحوه جریان مایع بر روی سینی: نحوه جریان مایع بر روی سینی، بستگی زیادی به نسبت میزان جریان مایع به میزان جریان بخار دارد. دو نوع جریان متداول بر روی سینی‌ها عبارت‌اند از: جریان متقاطع<sup>۱</sup> و جریان دو یا چند گذره<sup>۲</sup> که شکل کلی از این دو نوع جریان در شکل ۱۱-۸ نشان داده شده است.

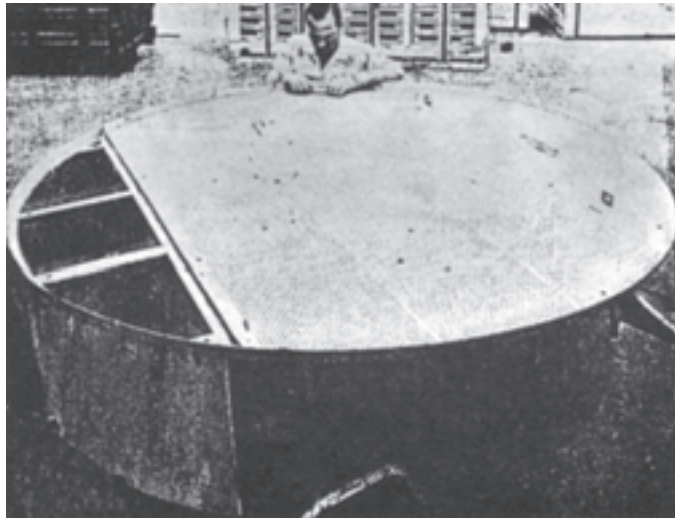


شکل ۱۱-۸- نحوه جریان مایع بر روی سینی

جریان متقاطع یکی از متداول‌ترین نوع جریان بر روی سینی است و معمولاً برای میزان جریان‌های متوسط مایعات و گازها مورد استفاده است. جریان‌های دو یا چند گذره برای برج‌های با قطر بزرگ و با میزان جریان بالای مایع، مورد استفاده‌اند. در جریان‌های دو گذره جریان مایع به منظور کاهش بار ناودان به دو قسمت تقسیم می‌شود.

۱۱-۷-۲- انواع سینی‌ها: مهم‌ترین انواع سینی‌های برج‌های تقطیر عبارت‌اند از: سینی‌های غربالی<sup>۱</sup>، سینی‌های درجه‌ای<sup>۲</sup> و سینی‌های کلاهکی<sup>۳</sup>.

**سینی‌های غربالی:** یک شمای کلی از سینی‌های غربالی در شکل ۱۱-۹ آمده است. این سینی‌ها بر اساس ایجاد منافذی (سوراخ‌هایی) به کمک مته بر روی یک صفحه فلزی ساخته می‌شوند. در نتیجه ساخت این سینی‌ها ساده و ارزان است. اطلاعات مربوط به طراحی این گونه سینی‌ها به راحتی در منابع مختلف موجود است. کارایی این سینی‌ها در شرایطی که میزان جریان مایع و بخار همواره ثابت باشد خوب است ولی استفاده از آن در واحدهایی که میزان جریان مایع یا بخار متغیر است توصیه نمی‌شود. سینی‌های غربالی در مواردی که مایعات، قابلیت رسوب‌دهی داشته باشند و یا دارای ذرات جامد معلق باشند نیز به خوبی قابل استفاده است. زیرا این گونه سینی‌ها در برابر گرفتگی مقاومند و می‌توانند دارای سوراخ‌های بزرگ باشند و در ضمن به راحتی قابل تمیز کردن هستند. قطر سوراخ‌ها بین  $\frac{1}{8}$  تا  $\frac{1}{4}$  اینچ ( $\frac{3}{8}$  تا  $\frac{2}{54}$  سانتی‌متر) متغیر است و اکثراً این اندازه بین  $\frac{1}{4}$  تا  $\frac{1}{8}$  اینچ



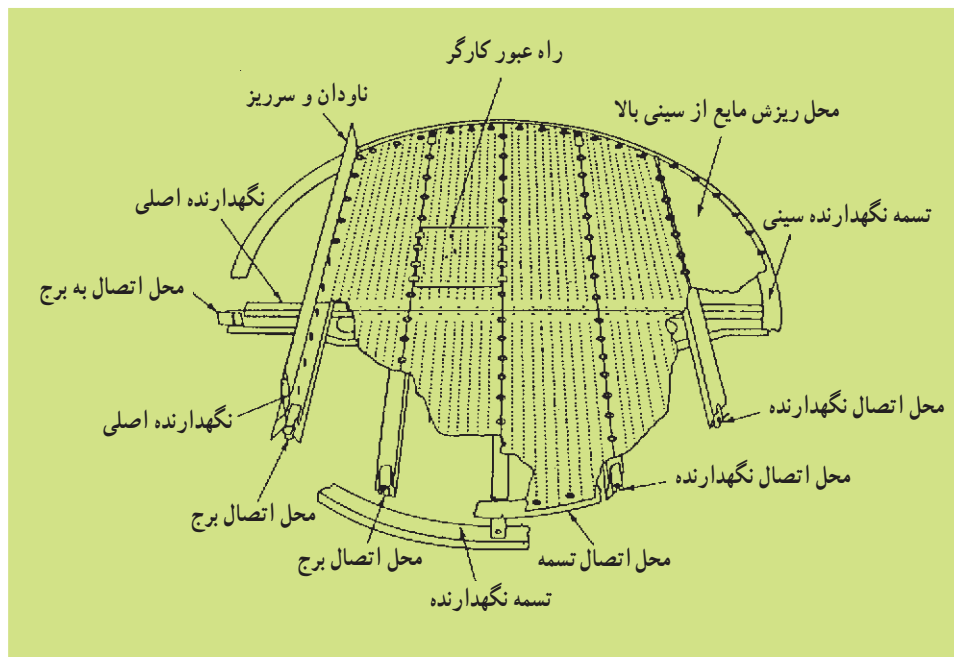
شکل ۱۱-۹- طرح یک سینی غربالی با ناودان

۱- Sieve Trays

۲- Volve Trays

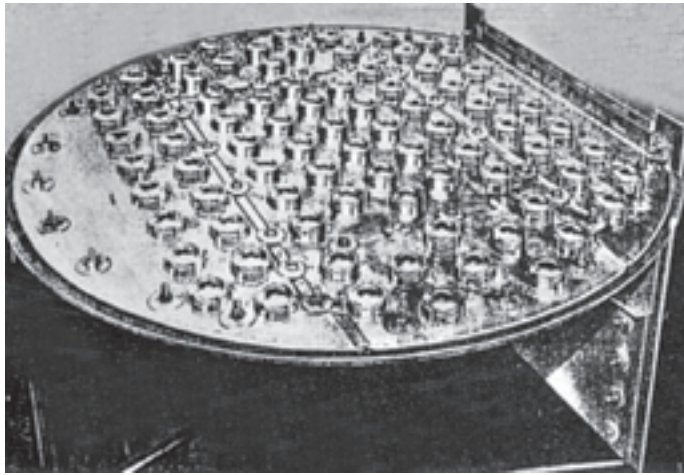
۳- Bubble - Cap Trays

(۶/۰ تا ۲۷/۱ سانتی‌متر) است. فاصله بین سوراخ‌ها معمولاً بین ۵/۲ تا ۵ اینچ (۳۵/۶ تا ۷/۱۲ سانتی‌متر) در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۱۱-۱۰ اجزای تشکیل‌دهنده یک سینی غربالی را نشان می‌دهد.



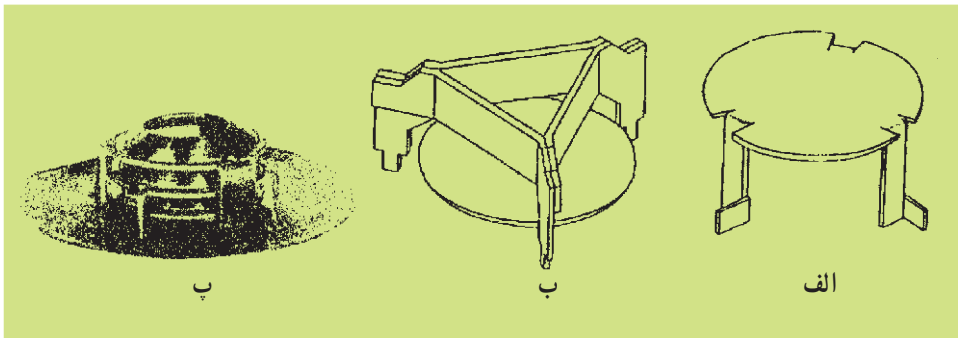
شکل ۱۱-۱۰ اجزای تشکیل‌دهنده یک سینی غربالی

سینی‌های دریچه‌ای: شکل ۱۱-۱۱ شمای کلی سینی‌های دریچه‌ای را نشان می‌دهد. با تغییر میزان جریان‌های مایع و بخار داخل برج، سینی‌های دریچه‌ای نسبت به سینی‌های غربالی کارایی بهتری دارند. در نتیجه، با تغییر میزان جریان خوراک، قابلیت انعطاف بیشتری خواهند داشت. قطر سوراخ‌های این گونه سینی‌ها نسبت به سینی‌های غربالی بزرگ‌تر است و توسط دریچه‌ای یک‌طرفه و متحرک که با تغییر فشار مایع و بخار از روی سطح سینی بالا می‌رود، پوشانده شده است. هر دریچه دارای پایه‌ای است که فقط حرکت آن را به طرف بالا محدود می‌کند. در حالتی که میزان جریان بخار زیاد است، دریچه کاملاً باز می‌شود و بیشترین فضا را جهت عبور گاز از مجاری پایه تأمین می‌کند. وقتی که میزان جریان گاز کاهش پیدا می‌کند دریچه‌ها پایین‌تر می‌روند و مجاری عبور گاز کوچک‌تر می‌شود و بدین ترتیب سرعت عبور گاز از داخل مجاری پایه، تقریباً ثابت باقی می‌ماند و کارایی سینی با تغییر جریان گاز عملاً تغییر نمی‌کند. از معایب سینی‌های دریچه‌ای گران‌تر بودن آن نسبت به سینی‌های غربالی (حدود ۲۰٪) و قابلیت بسته شدن منافذ توسط مایعات جرم‌زا است.



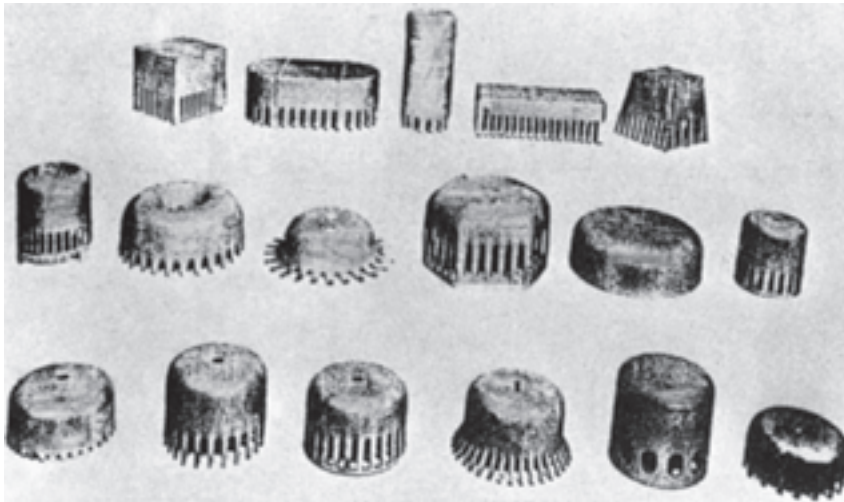
شکل ۱۱-۱۱- شمای کلی سینی‌های دریچه‌ای

قطر سوراخ‌ها معمولاً حدود  $1/5$  اینچ ( $3/81$  سانتی‌متر) است ولی قطرهای بزرگ‌تر تا  $6$  اینچ ( $15/24$  سانتی‌متر) نیز گاهی اوقات به کار می‌رود. فاصله بین سوراخ‌ها  $3$  تا  $6$  اینچ ( $7/62$  تا  $15/24$  سانتی‌متر) است. سه نوع مختلف دریچه‌های این‌گونه سینی‌ها در شکل ۱۱-۱۲ آمده است.



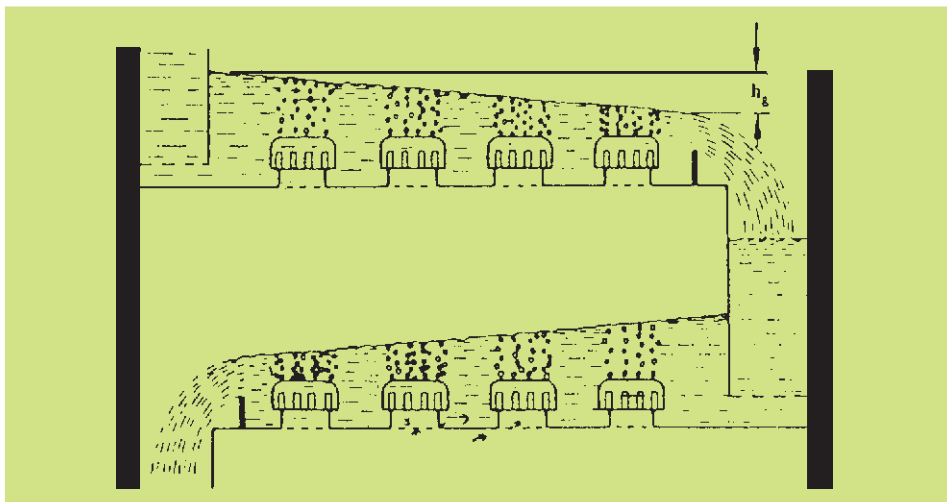
شکل ۱۱-۱۲- چند نمونه از انواع سینی‌های دریچه‌ای  
الف - پایه متصل به دریچه ب و پ - پایه متصل به کف سینی

**سینی‌های کلاهکی:** انواع کلاهک‌ها در شکل ۱۱-۱۳ نشان داده شده است. در یک سینی کلاهکی، اطراف هر سوراخ روی سطح سینی یک پایه ثابت نصب شده است و کلاهکی دارای منافذ روی پایه قرار می‌گیرد و در نتیجه بخار با عبور از پایه و گذشتن از منافذ کلاهک، به داخل فاز مایع وارد می‌شود و با آن در تماس قرار می‌گیرد. این نوع سینی‌ها می‌توانند در مواردی که میزان جریان مایع خیلی کم یا خیلی زیاد باشد مورد استفاده قرار گیرند.

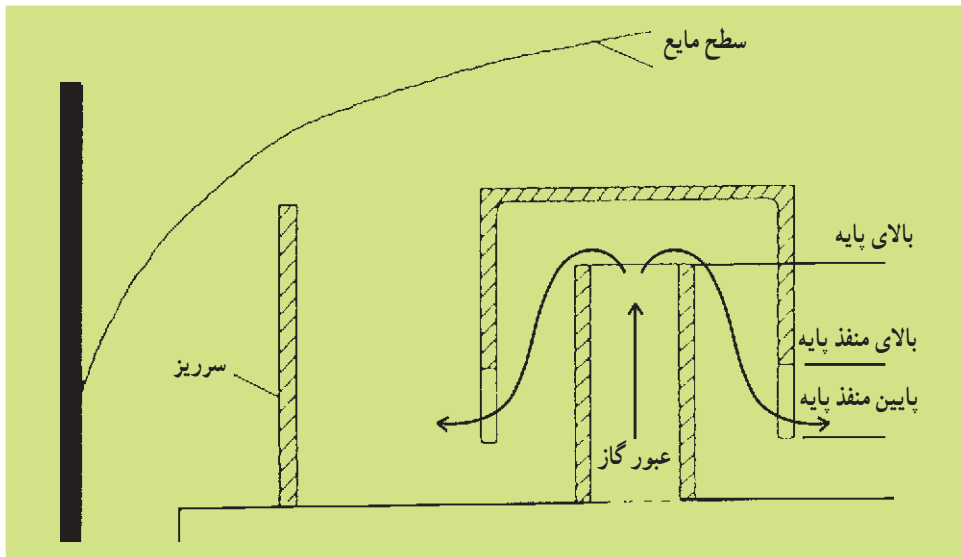


شکل ۱۱-۱۳- چند نمونه کلاهک

شکل ۱۱-۱۴ نحوه عبور گاز از داخل مایع را در یک سینی کلاهکی و شکل ۱۱-۱۵ شکل ساده کلاهک را نشان می‌دهد. در سینی‌های کلاهکی میزان مایعی که همراه بخار به طرف بالا می‌رود حدود ۳ برابر سینی‌های غربالی است کارایی این گونه سینی‌ها معمولاً مشابه یا کمتر از سینی‌های غربالی است و قابلیت انعطاف آن در برابر تغییر میزان جریان خوراک ورودی بسیار کم است. در این گونه سینی‌ها مشکلات تشکیل کک تشکیل پلیمر یا جرم گرفتگی وجود دارد. سینی‌های کلاهکی تقریباً ۴ برابر گران‌تر از سینی‌های دریچه‌ای هستند. بدین ترتیب در واحدهای جدید صنعتی عملاً استفاده از این گونه سینی‌ها منسوخ شده است.



شکل ۱۱-۱۴- نحوه عبور گاز از داخل فاز مایع روی سینی



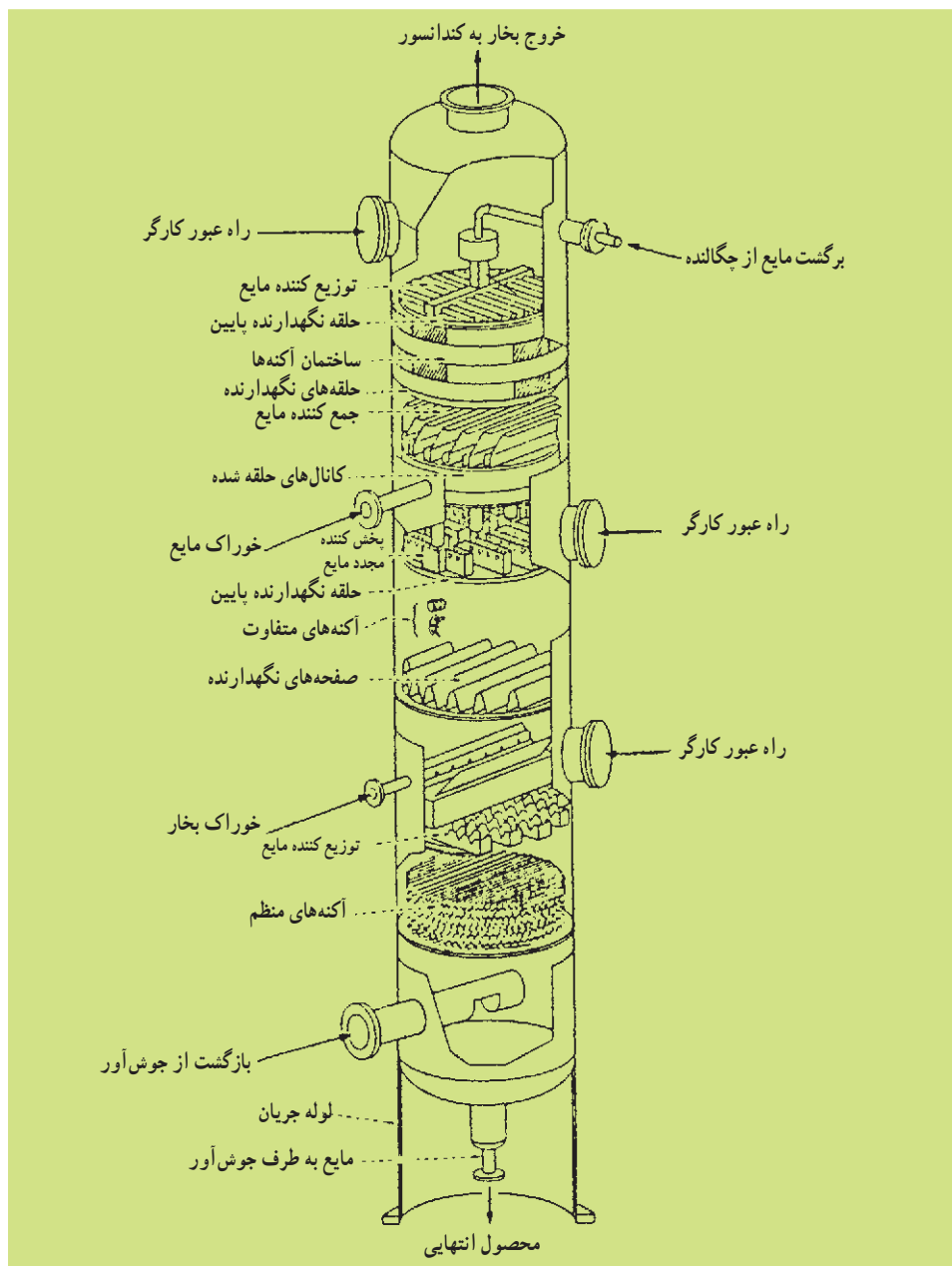
شکل ۱۱-۱۵- شکل ساده کلاهک روی سینی

۱۱-۷-۳- برج‌های آکنده<sup>۱</sup>: برج‌های آکنده جهت تماس بین دو سیال غیر قابل امتزاج گاز و مایع یا دو مایع به‌طور وسیع مورد استفاده است. به‌عنوان مثال: ایجاد تماس بین گاز و مایع در یک فرآیند جذب و یا تماس بین مایع و بخار در واحدهای تقطیر و همچنین تماس بین دو فاز مایع در واحدهای استخراج را می‌توان در یک برج آکنده تأمین کرد. در مواردی که قطر برج کم (معمولاً کم‌تر از ۲ فوت) و یا این‌که افت فشار کم مورد نیاز است (برج‌های تحت خلأ) و یا نیاز به استفاده از موادی مانند سرامیک یا پلاستیک است (به‌عنوان مثال برای جلوگیری از خوردگی). برج‌های آکنده می‌توانند جایگزین برج‌های سینی‌دار شوند. در برج‌های با قطر بزرگ و به‌خصوص در مواردی که میزان جریان مایع کم و جریان بخار زیاد است استفاده از برج‌های آکنده به دلیل مشکل توزیع مناسب مایع روی سطح آکنه توصیه نمی‌شود. شکل ۱۱-۱۶ شمای کلی از اجزای مختلف یک برج آکنده را نشان می‌دهد.

در مواردی که از برج آکنده برای تماس مایع - بخار استفاده می‌شود، مایع روی سطح آکنه به طرف پایین جریان می‌یابد و بخار از فضای خالی داخل آکنه به طرف بالا عبور می‌کند. هدف استفاده از آکنه<sup>۲</sup> تأمین تماس لازم بین مایع و بخار در یک سطح گسترده به منظور انجام بهتر عمل انتقال جرم بین دو فاز است. در عین حال مواد آکنه باید خروج آسان مایع و همچنین افت فشار کم برای جریان بخار را تأمین کنند. برای نگهداری بستر آکنه در داخل برج، از صفحات نگهدارنده

۱- Packed Towers

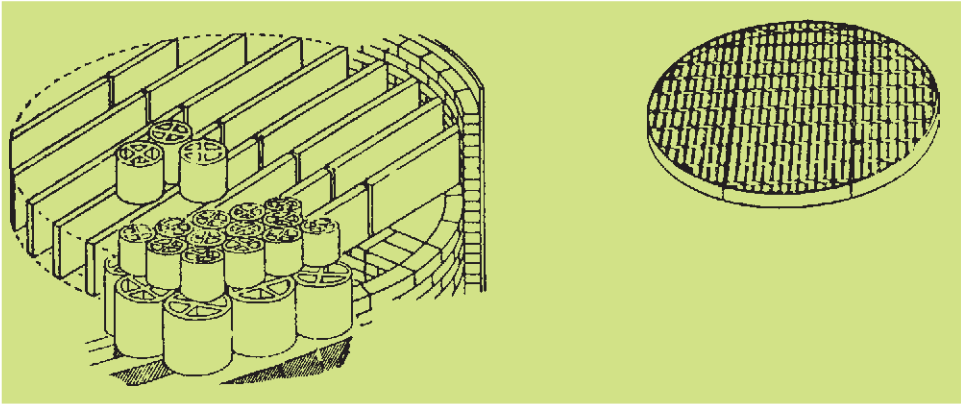
۲- Packing



شکل ۱۱-۱۶- شمای کلی برج آکنده

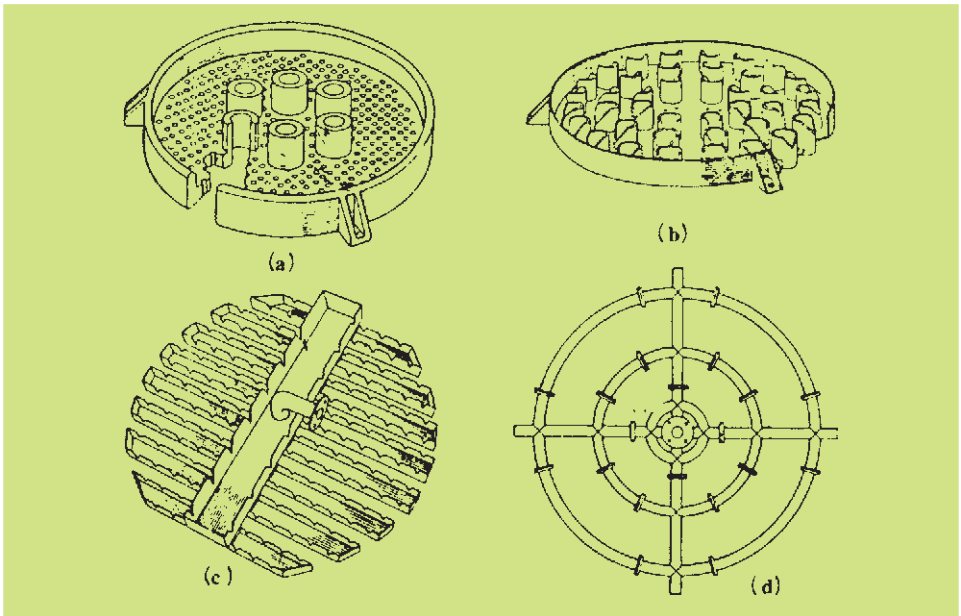
استفاده می‌شود که حداقل باید دارای ۷۵٪ سطح آزاد جهت عبور گاز با حداقل مقاومت در برابر جریان باشد. نمونه‌ای از صفحات نگهدارنده در شکل ۱۱-۱۷ آمده است. در بالای بستر آکنه، از توزیع کننده مایع<sup>۱</sup>، جهت پخش یک نواخت مایع بر روی آکنه استفاده می‌شود.

۱- Liquid Distributer



شکل ۱۱-۱۷- صفحات نگهدارنده آکنه

چند نوع از انواع توزیع کننده‌ها در شکل ۱۱-۱۸ آمده است.

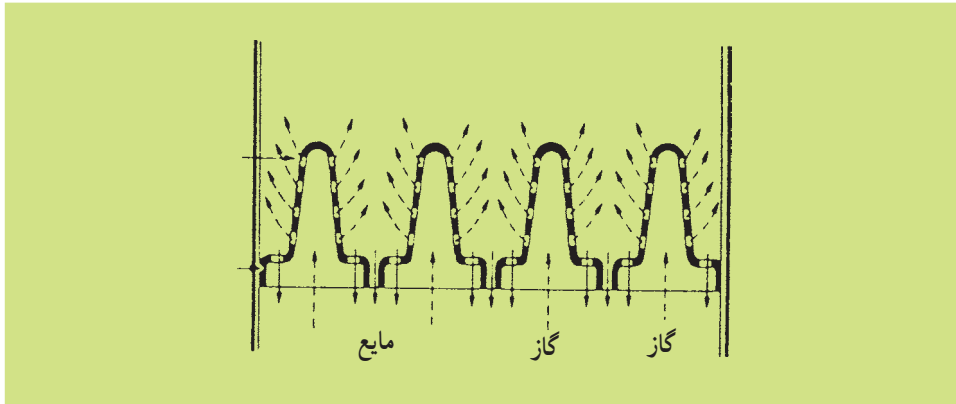


شکل ۱۱-۱۸- چند نوع از انواع توزیع کننده مایع

هنگامی که ارتفاع برج زیاد باشد استفاده از صفحات توزیع کننده میانی در داخل برج ضروری است. فاصله بین دو صفحه متوالی پخش کننده نباید از ۶ متر بیشتر باشد. جهت تزریق گاز از پایین برج و به منظور تأمین مسیرهای متفاوت مایع و گاز در انتهای برج می‌توان از صفحات توزیع گاز که در شکل ۱۱-۱۹ نشان داده شده است استفاده کرد. در این صفحات ورودی گاز در سطحی بالاتر از



سطح خروجی مایع قرار دارد.



شکل ۱۱-۱۹- توزیع کننده گاز

۱۱-۷-۴- انواع آکنه‌ها: آکنه‌ها را می‌توان به سه دسته اصلی: ۱- مواد جامد خرد شده، ۲- آکنه‌های شکل داده شده، ۳- آکنه‌های منظم، تقسیم کرد. مواد جامد خرد شده ارزان‌ترین نوع مواد آکنه هستند و از اندازه ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر با توجه به اندازه برج، استفاده می‌شوند. با وجود این که معمولاً این گونه آکنه‌ها مواد مقاوم در برابر خوردگی هستند گاهی به علت عدم تأمین سطح مناسب جهت انتقال جرم و توزیع نامناسب جریان مایع بر روی آکنه، نسبت به انواع دیگر، کم‌تر به کار گرفته می‌شوند.

از انواع متداول آکنه‌های شکل داده شده می‌توان از حلقه‌های راشیگ<sup>۱</sup>، حلقه‌های پال<sup>۲</sup>، حلقه‌های سینگ<sup>۳</sup>، و نوع زین اسبی<sup>۴</sup> نام برد. در ضمن آکنه‌های جدیدتر مانند اینتالوکس<sup>۵</sup>، های‌پک<sup>۶</sup> به علت کارایی بهتر و ایجاد افت فشار کمتر، جایگزین انواع قدیمی‌تر شده‌اند. شکل ۱۱-۲ تعدادی از این گونه آکنه‌ها را نشان می‌دهد. اکثر این آکنه‌ها از مواد مختلف مانند سرامیک، فلز، شیشه، پلاستیک یا لاستیک هستند. آکنه‌های سرامیکی در برابر خوردگی مقاوم و به نسبت ارزان ولی نسبتاً سنگین هستند. اندازه آکنه‌های مورد استفاده روی قطر و ارتفاع برج، افت فشار و هزینه ساخت تأثیر می‌گذارد. به‌طور کلی با افزایش اندازه آکنه هزینه ساخت برج به ازای واحد حجم آکنه و هم‌چنین افت فشار به ازای طول آن کاهش می‌یابد ولی با توجه به کاهش سطح تماس مایع-بخار میزان انتقال جرم نیز کاهش می‌یابد و ارتفاع برج نیز به دنبال آن افزایش خواهد یافت. در هر صورت معمولاً اندازه آکنه‌های مورد استفاده کم‌تر از ۵۰ میلی‌متر است.

۱- Raschig Rings

۲- Pall Rings

۳- Lessing Ring

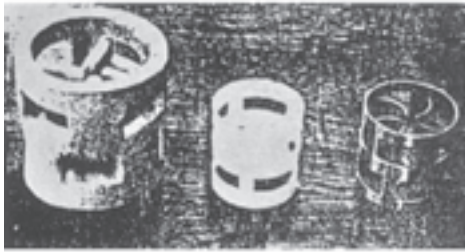
۴- Saddle Type

۵- Intalox

۶- Hy - Pak



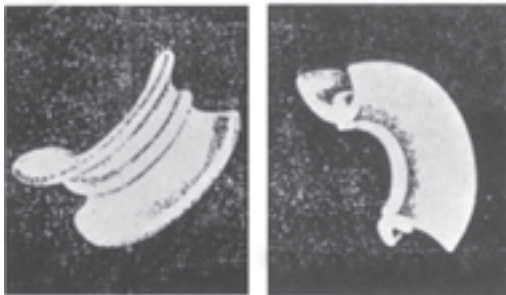
الف - حلقه‌های راشیگ و سینگ سرامیکی و فلزی در اندازه‌های مختلف



پ - حلقه‌های سرامیکی - پلاستیکی و فلزی پال



ب - حلقه‌های یک فلزی



ت - آکنه‌های اینتالوکس زین اسبی سرامیکی  
(Intalox Saddles)



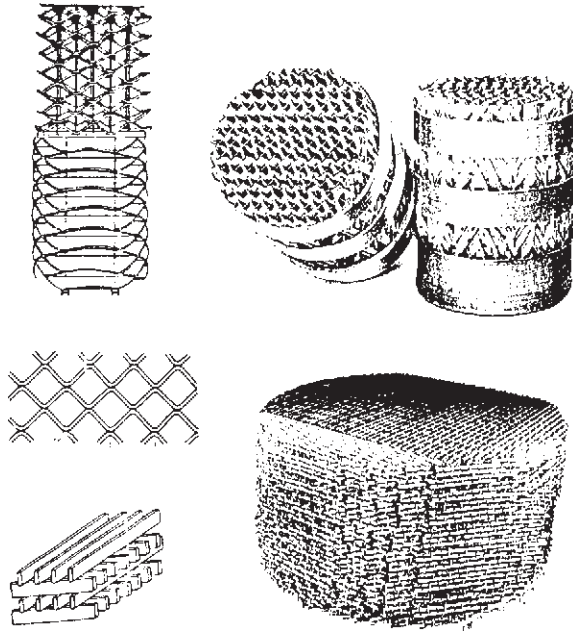
ث - آکنه‌های اینتالوکس پلاستیکی



ج - آکنه زین اسبی

شکل ۱۱-۲۰ - چند نمونه آکنه

معمولاً نحوه چیدن مواد جامد خرد شده و آکنه‌های شکل داده شده در داخل برج به صورت نامنظم است. جهت کاهش افت فشار و افزایش کارایی آکنه‌ها می‌توان از آکنه‌های منظم استفاده کرد. این نوع آکنه‌ها اغلب از چندین لایه حلقه‌های بزرگ توری که به‌طور منظم بر روی هم قرار می‌گیرند تشکیل شده‌اند. شکل ۱۱-۲۱ نمونه‌هایی از آکنه‌های منظم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۲۱- چند نمونه آکنه منظم

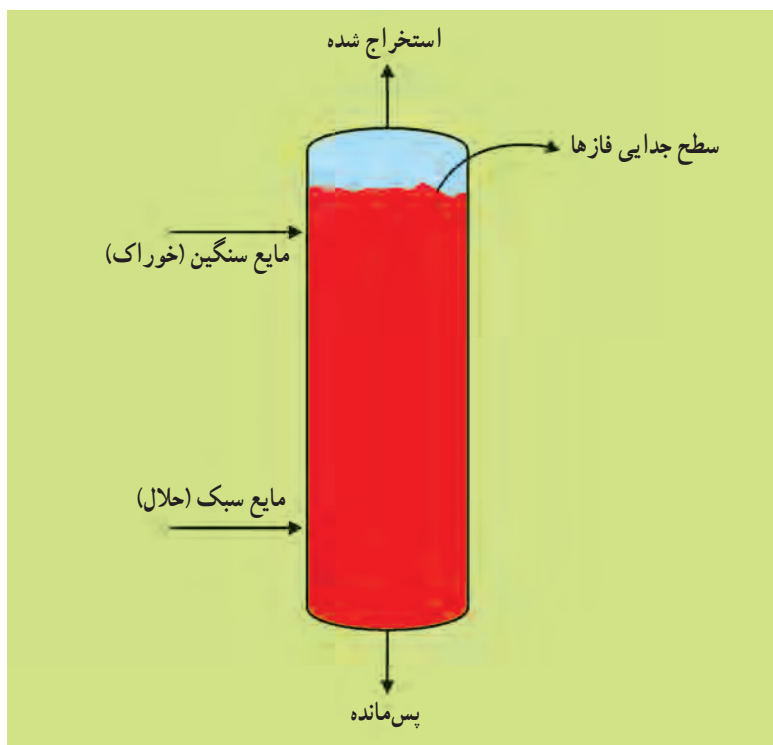
## ۱۱-۸- برج‌های استخراج

در کلیه دستگاه‌های استخراج باید دو عمل «اختلاط خوراک و حلال» و «جدا شدن محلول استخراج شده و محلول باقی‌مانده» که در مجموع یک مرحله از عملیات استخراج را تشکیل می‌دهند، انجام شود. در اغلب برج‌های استخراج بسته به خواص فیزیکی خوراک و حلال (نظیر حلالیت، دانسیته، کشش سطحی) و خلوص مورد نیاز برای محصول، چندین مرحله عملیات استخراج اجرا می‌شود. دستگاه‌های استخراج<sup>۱</sup> بسیار متنوع هستند. در زیر با چند نوع از این دستگاه‌ها آشنا می‌شوید.

۱۱-۸-۱- برج‌های پاششی<sup>۲</sup>: این دستگاه‌ها ساده‌ترین وسیله برای اجرای عملیات استخراج می‌باشند که صرفاً شامل یک محفظه توخالی هستند که در بالا و پایین آن محل‌هایی برای ورود و خروج مایعات پیش‌بینی شده است. در این برج‌ها فقط یک مرحله عملیات استخراج اجرا می‌شود که در آن عمل اختلاط خوراک و حلال به ساده‌ترین و بدترین شکل انجام می‌گردد. محلول استخراج شده و محلول پس‌مانده به دلیل اختلاف دانسیته از یکدیگر جدا، یکی از بالا و دیگری از پایین برج خارج می‌شوند. شکل ۱۱-۲۲ چگونگی عمل این برج‌ها را نشان می‌دهد.

۱- Extractors

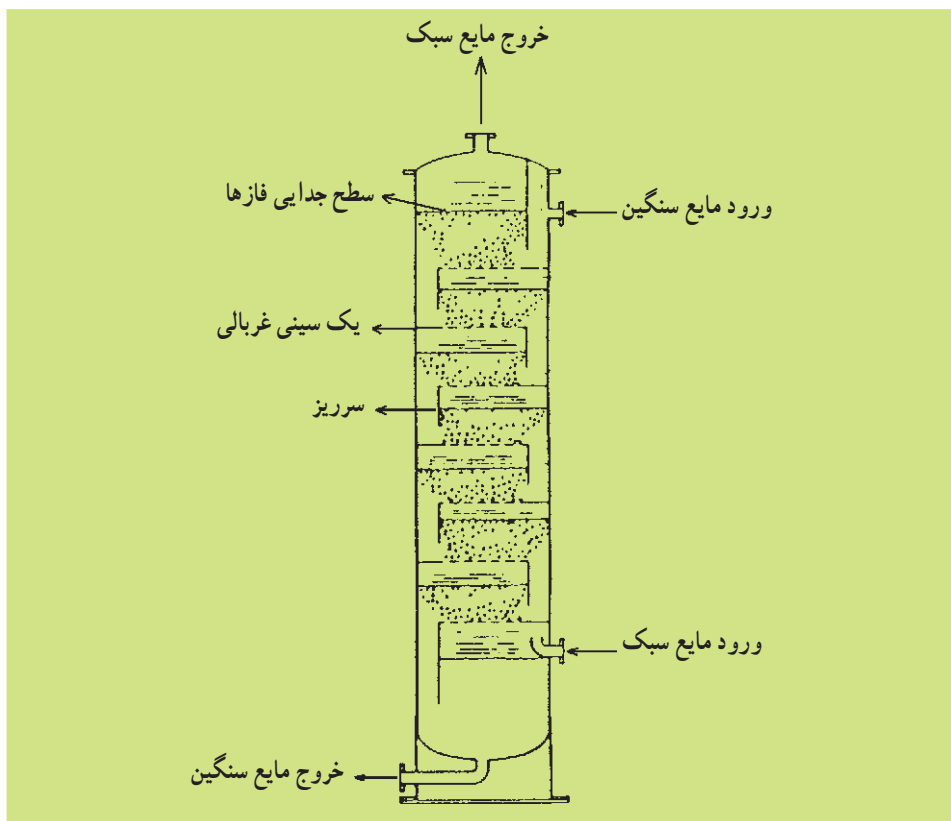
۲- Spray Towers



شکل ۱۱-۲۲- عملیات استخراج تک مرحله‌ای در برج پاششی وقتی خوراک سنگین تر از حلال باشد.

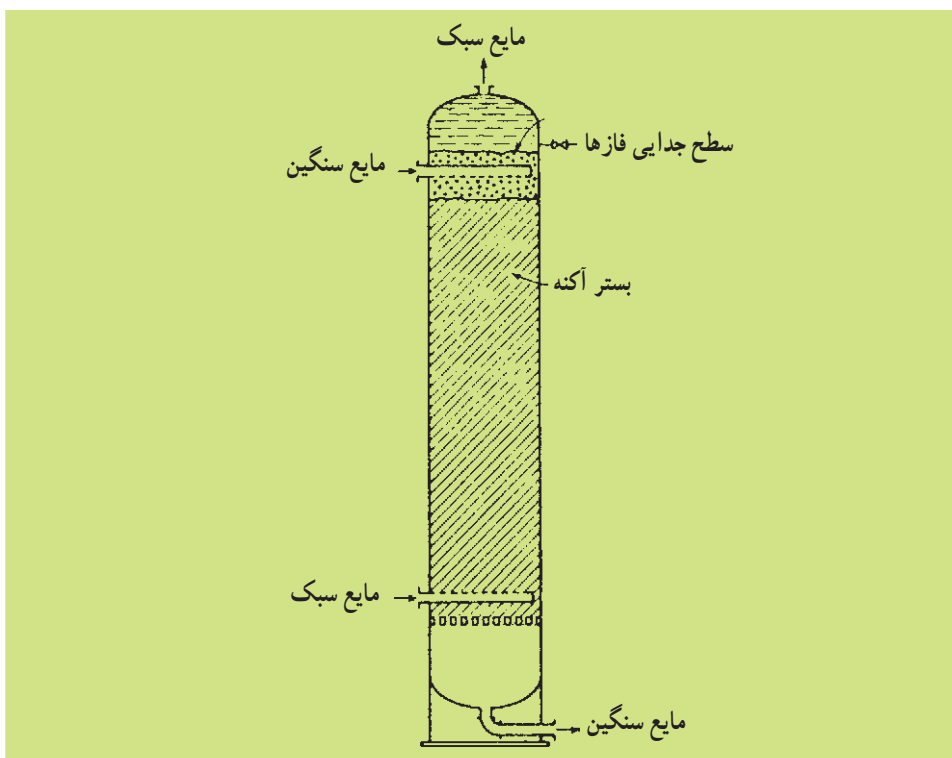
۱۱-۸-۲- برج‌های سینی‌دار: شکل ۱۱-۲۳ یک برج سینی‌دار غربالی را که به منظور اجرای عملیات استخراج مورد استفاده قرار می‌گیرد نشان می‌دهد. مایع سبک از پایین برج وارد می‌شود و به سمت بالا حرکت می‌کند. به هنگام عبور این مایع از سوراخ‌های سینی به صورت قطرات کوچک درآمده در مایع سنگین که روی سینی حرکت می‌کند و از طریق سرریزها به سمت پایین برج جریان دارد، پخش می‌شود. بدین ترتیب عمل اختلاط دو مایع که یکی خوراک و دیگری حلال است انجام می‌شود. قطرات مایع سبک قبل از رسیدن به سینی بالاتر به یکدیگر پیوسته از مایع سنگین جدا می‌شود. بدین ترتیب عمل جداسازی فازها انجام شده و یک مرحله از عملیات استخراج کامل می‌شود. با طراحی صحیح، ارتفاع برج، و تعداد سینی‌ها را به گونه‌ای پیش‌بینی می‌کنند تا تعداد مراحل استخراج به تعداد کافی برسد و محصول (جریان محلول استخراج شده) به خلوص مورد نظر دست یابد. بسته به دانسیته خوراک و حلال، مایع سبک و سنگین تعیین می‌شود.

در سیستم‌هایی که دو فاز به آسانی مخلوط و سپس سریعاً از یکدیگر جدا می‌شوند، از برج‌های استخراج سینی‌دار غربالی استفاده می‌شود. بدیهی است این برج‌ها کارایی بالاتری نسبت به برج‌های استخراج پاششی دارند.



شکل ۱۱-۲۳- برج استخراج با سینی غربالی که برای بخش مایع سبک طراحی شده است.

۱۱-۸-۳- برج‌های آکنده: برج‌های آکنده نیز همانند برج‌های سینی دار در عملیات تقطیر، جذب (تماس گاز-مایع) و استخراج به کار می‌روند. در اجرای عملیات استخراج، این برج‌ها از مواد آکنه به صورت تصادفی پر می‌شوند. شکل ۱۱-۲۴ این نوع برج‌ها را نشان می‌دهد که فاز مایع سبک از پایین برج وارد می‌شود و در داخل فاز سنگین که از بالا وارد شده است پخش می‌گردد. فضای خالی میان آکنه‌ها از مایع سنگین که یک فاز پیوسته را تشکیل داده، پر شده است. قطرات مایع سبک از لابه‌لای آکنه‌ها و از داخل مایع سنگین بالا می‌رود و در نهایت در قسمت بالای بستر آکنه به صورت یک فاز مجتمع می‌گردد. سطح جدایی فازها در بالای بستر آکنه تشکیل می‌شود. جهت اختلاط بهتر، اندازه آکنه‌ها باید به قدر کافی کوچک باشد. در هر حال اندازه هر آکنه نباید از  $\frac{1}{8}$  قطر برج بیشتر باشد. در برج‌های آکنده نیز عملیات استخراج بهتر از برج‌های پاششی انجام می‌شود. در مواردی که حلال یا خوراک خورنده باشد و استفاده از سینی‌های فلزی امکان‌پذیر نباشد، استفاده از برج‌های آکنده با آکنه‌هایی از جنس سرامیک یا پلاستیک بهترین جایگزین است.



شکل ۱۱-۲۴- برج های آکنده برای استخراج (مایع سبک پخش شده است)

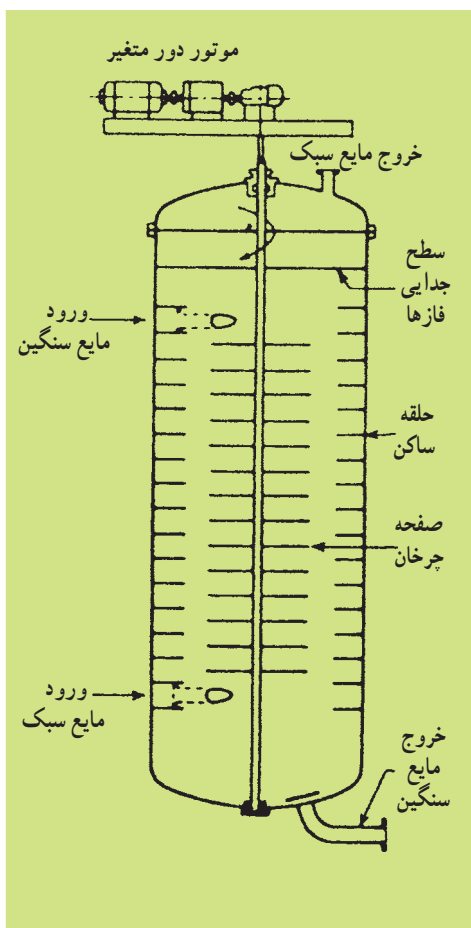
۱۱-۸-۴- استخراج کننده با همزن مکانیکی<sup>۱</sup>: در برج های پاششی، سینی دار غربالی و آکنده وقتی که اختلاف دانسیته خوراک و حلال  $0.1 \text{ g/cm}^3$  یا کم تر می باشد و کشش سطحی آن ها زیاد است، پخش و اختلاط خوراک و حلال در یکدیگر به خوبی انجام نمی شود و در نتیجه عمل استخراج با کیفیت مطلوب انجام نخواهد شد. در چنین شرایطی با استفاده از همزن مکانیکی عمل پخش شدن به خوبی انجام و عمل اختلاط کامل می شود. در نتیجه عملیات استخراج به نحو مطلوب صورت می گیرد انواع مختلف همزن های مکانیکی در داخل برج های استخراج به کار می رود. شکل ۱۱-۲۵ یک نوع برج استخراج با همزن مکانیکی با پره های توربینی<sup>۲</sup> را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود، جهت اختلاط بهتر این برج مجهز به بافل و توزیع کننده فازهای مایع است.

شکل ۱۱-۲۶ نوع دیگری از برج های استخراج را که استخراج کننده با صفحات چرخان (RDC)<sup>۳</sup> نام دارد نشان می دهد. در این دستگاه بافل های عمودی وجود ندارد و اختلاط در اثر حرکت صفحات چرخان به وجود می آید که سرعت دوران صفحات چرخان از پره های توربینی بیشتر است.

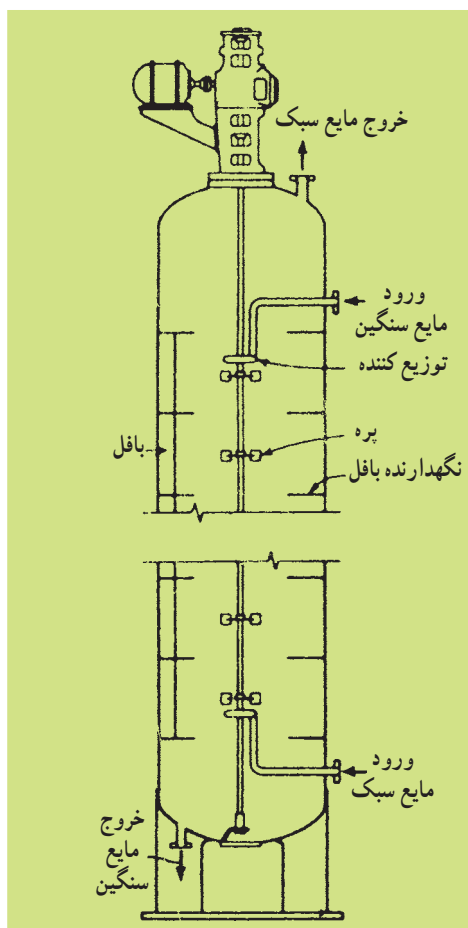
۱- Mechanically Agitated Extractor

۲- این نوع استخراج کننده ها را Oldshue-Rushton می نامند.

۳- Rotating-Disk Contactor



شکل ۱۱-۲۶- برج استخراج RDC



شکل ۱۱-۲۵- برج استخراج با همزن مکانیکی با پره‌های توربینی

## خودآزمایی

۱- مواد A، B و C در دمای C ۲۵ به ترتیب دارای فشار بخارهای ۰.۶۰۰، ۱۱۸/۵ و ۴۰۲ میلی متر جیوه هستند. کدام یک از این مواد سبک تر و دارای نقطه جوش پایین تر و کدام یک سنگین تر و دارای نقطه جوش بالاتر است؟

۲- قابلیت تبخیر (فراریت) نسبی را با فرمول زیر نشان می‌دهیم.

$$P_{AB} = \frac{P_A}{P_B}$$

• فراریت نسبی ماده A نسبت به B

• فشار بخار جزء A

• فشار بخار جزء B

$P_A$  و  $P_B$  هم واحد هستند. با استفاده از اطلاعات سؤال قبل فراریت نسبی A نسبت به B، A نسبت به C و C نسبت به B را به دست آورید و بگویید جداسازی کدام دو آمیزه به روش تقطیر راحت تر است؟ چرا؟

۳- اصول تقطیر را با بیان یک مثال شرح دهید.

۴- انواع تقطیر را فقط نام ببرید و بگویید در کدام روش جداسازی بهتر انجام می‌شود؟ چرا؟

۵- در چه مواردی عمل تقطیر تحت خلأ یا تحت فشار انجام می‌شود؟

۶- اصول استخراج مایع از مایع را توضیح دهید (فرض کنید محلول دوجزئی A و B را داریم و می‌خواهیم این دو ماده را به کمک حلال S از یکدیگر جدا کنیم).

۷- مشخصات یک حلال مناسب برای انجام عملیات استخراج را بنویسید.

۸- چرا هرچه تفاوت دانسیته بین فازهای «استخراج شده» و «پس مانده» بیشتر باشد، بهتر است؟

۹- با رسم یک شکل ساده، نحوه جریان مایع و بخار روی یک سینی را شرح دهید.

۱۰- سه نوع سینی را نام ببرید و موارد کاربرد، مشخصات و محاسن و معایب هر یک را بنویسید.

۱۱- در عملیات تقطیر در چه مواردی برج‌های آکنده می‌توانند جایگزین برج‌های سینی‌دار

شوند؟ در چه مواردی استفاده از برج‌های آکنده توصیه نمی‌شود؟

۱۲- سه دسته اصلی آکنه‌ها را نام ببرید. سه نوع آکنه شکل داده شده را نام ببرید.

۱۳- طرز کار یک برج سینی‌دار غربالی در عملیات استخراج مایع از مایع را شرح دهید.

۱۴- هنگامی که عمل اختلاط فازها در برج‌های سینی‌دار و آکنده به نحو مطلوب انجام نشود،

از چه نوع استخراج‌کننده‌ای استفاده می‌کنیم؟



۱۵- عبارتهای زیر را به شکل صحیح بنویسید.

الف) در یک برج استخراج سینی دار روی هر سینی  $\frac{\text{یک مرحله}}{\text{چند مرحله}}$  عملیات استخراج انجام می شود؟

ب) هر مرحله از عملیات استخراج ابتدا با  $\frac{\text{اختلاط}}{\text{جدا شدن}}$  فازها آغاز می شود و سپس در پی آن  $\frac{\text{اختلاط}}{\text{جدا شدن}}$  فازها انجام می شود.

ج) متداول ترین و مهم ترین عملیات جداسازی  $\frac{\text{تقطیر}}{\text{استخراج}}$  است.

## منابع و مراجع

- ۱- مکانیک سیالات و هیدرولیک، تألیف: دکتر مدنی، ۱۳۷۴، تهران
- ۲- اصول بنیانی و مبانی محاسبات در مهندسی شیمی، تألیف: دیوید هیمل بلاو، ترجمه دکتر مرتضی سهرابی، ۱۳۷۰ پبلی تکنیک
- ۳- کنترل فرآیندها، تألیف: کاک ناور + کاپل، ترجمه دکتر گودرز نیا، ۱۳۷۰
- ۴- طراحی و تنظیم سیستم‌های کنترل در واحدهای شیمیایی نفت و گاز، تألیف: سید پندار توفیقی، سال ۱۳۷۴، انتشارات شرکت نفت جنوب
- ۵- پمپ و پمپاژ، تألیف: دکتر احمد نوربخش، ۱۳۷۹، دانشکده فنی تهران
- ۶- عملیات واحد در مهندسی شیمی، تألیف: وارون مک کیب چاپ پنجم، ترجمه عطاءالله امینی ۱۳۷۹
- ۷- مبانی صنایع شیمیایی (۱) کد (۴۸۰)، تألیف: دکتر داوود رشتچیان، سیروس قطبی، غلامحسین غلامی سعیدی
- ۸- جزوه آموزش اصول انتخاب و طراحی همزن‌ها، مصطفی زراعی آبیانه، انتشارات واحد آموزش و برنامه‌ریزی نیروی انسانی پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۷۹
- ۹- کارگاه عملیات دستگاهی صنایع شیمیایی، تألیف: سیدپندار توفیقی، ۱۳۸۰
- ۱۰- Fluid Mechanics, by: Streeter 9th ed. -2000, Mc. GrawHill
- ۱۱- Heat transfer, by: J.P. Holman. 1999, Mc. GrawHill
- ۱۲- Experimental method of Engineering, by: Holman. 1990
- ۱۳- Fluid Measurement Engineering Handbook, by: Miller, 1980
- ۱۴- Pump handbook, by: Karrasik, 1986
- ۱۵- Coluson and Richardsonts, Chemical Engineering, by: Coluson, Richardson, 1999, Vol: 1-6, Mc GrawHill
- ۱۶- Shell & Tube Heat Exchanger, by: William R. Aplolett. Jr. Fosterweeler development Corporation, 1989
- ۱۷- Industrial Heat Exchanger a book guid, walker, university of Colgary.

١٨\_ Pump for the offshore oil industry, Sulzer company, 1991

١٩\_ Casing Manual by: Ebara corporation, 1995

٢٠\_ Centrifugal pump of the oil and gas industry, by: Mannes Mann Demag company, 1995.

٢١\_ Platon, instrumentation flow bit, Flow, pressure measurment and control experiment, by: Platon corporting, 1991

٢٢\_ Mass transfer operation, by: Treyball 3th Edition, 1979. Mc-GrawHill

٢٣\_ Mixing in the proces industries. N. Harn by M.F edwards, A. W. Nienow, Butterworth and Co. 1989.

