فصل ۱۳

روش‌های هیدرومتالورژی (لیچینگ) فروشوئی

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

۱ـ اهمیت لیچینگ را در فرآوری مواد معدنی فرا گیرد.

۲ـ استفاده از باکتری و میکروب‌ها را در صنایع فرآوری ارزیابی کند.

۳ـ روش‌های لیچینگ را مقایسه کند.

۴ـ پارامترهای مؤثر در لیچینگ را بداند.

۵ـ مراحل مختلف در لیچینگ را لیست کند.

۱۳ــ آشنایی

این روش شیمیایی بر مبنای انحلال انتخابی یک کانی و یا فلز در یک حلال مناسب مانند آب، اسید، باز و موارد مشابه استوار می‌باشد. مطابق آنچه در فصل دوم گفته شد این روش طی مراحل مختلف مانند، آماده‌سازی بار اولیه، روش پیش تغلیظ و پیش فرآوری قبل از لیچینگ که ممکن است با سایر روش‌های کانه‌آرایی صورت گیرد، مرحله انحلال عنصر و یا کانی مورد نظر در حلالی مناسب، جدا کردن محلول مادر (غنی) از رسوب باقی مانده، تصفیه محلول مادر و آخرین مرحله بازیابی عناصر با ارزش از محلول مادر به روش تعویض یونی، سمنتاسیون، استخراج حلالی و موارد مشابه صورت می‌گیرد.

ــ **نمونه‌برداری و آماده‌سازی**: به فصل اول و دوم کتاب مراجعه شود. اگر ماده‌معدنی تخلخل نداشته باشد، برای حمله بهتر حلال به آن باید خواص سنجی و وارد مراحل خردایش شود که

در این راستا نقش مطالعات کانی‌شناسی و میکروسکوپی بسیار پراهمیت است.

ـــ **پیش فرآوری** : ممکن است قبل از اینکه مواد مستقیماً وارد مرحله انحلال شود بتوان میزان قابل توجهی از مواد باطله همراه را به روش‌های کانه‌آرائی حذف نمود. از طرفی ممکن است عمل تشویه صورت گیرد که منجر به تبخیر ناخالصی، تغییر کانی‌ها و عدم انحلال آن‌ها (مواد باطله)، سهولت نفوذ حلال، کاهش سختی در مقابل خردایش و دیگر موارد شود.

ـــ **لیچینگ** : وقتی ماده معدنی در تماس با حلال مناسب قرار گیرد، با انحلال مواد مورد نظر، محلول مادر حاصل و در مراحل بعدی عناصر با ارزش آن بازیابی می‌شوند. حلال نباید بر روی دیگر مواد باطله تأثیر داشته باشد. آب یکی از بهترین انواع حلال‌ها می‌باشد که در شرایط معمولی بسیاری از نمک‌ها مانند NaCl, KCl و دیگر موارد را در خود حل می‌سازد.

ـــ **روش‌های لیچینگ** : از روش‌های مهم لیچینگ می‌توان به لیچینگ توده‌ای، ستونی، برجا، همزن و دیگر موارد اشاره کرد. در لیچینگ توده‌ای، مواد را پس از آماده‌سازی و نرمه‌گیری (جدایش ذرات زیر ۲۰ میکرون) به صورت انباشته قرار می‌دهند به نحوی که زیر ساخت‌های مناسب جهت جلوگیری محصول مادر به زمین و نفوذ به آب‌های زیرزمینی دیده شده باشد. یکی از پارامترهای مهم وجود تخلخل مواد است که در حَمله حلال پراهمیت است.

پس از پاشیدن حلال در سطح توده، حلال به مواد نفوذ کرده و عناصر مورد نظر را حل و شکل محلول مادر از محیط خارج می‌شود تا در مراحل بعدی عناصر با ارزش آن بازیابی شود. انحلال توده‌ای کانسنگ‌های کم عیار مس از جمله این موادند. در روش ستونی، مواد در ستونی بر روی هم انباشته و از سطح فوقانی مورد حلال پاشی قرار می‌گیرد و سپس محلول مادر از ته ستون و یا حوضچه خارج می‌شود. ابعاد ماده معدنی به حدود ۱۰ تا ۴۰ میلی‌متر هم می‌رسد و ممکن است در سیکل‌های چند ساعته صورت گیرد. این روش در کلیه مواد معدنی مستعد کاربرد دارد.

در لیچینگ به روش همزن، مواد به اندازه کافی توسط آسیا نرم و سپس وارد تانک‌های لیچینگ می‌شود. با هم زدن مواد، عناصر با ارزش در حلال حل شده و سپس در مراحل بعدی محصول مادر از باطله جدا می‌شود. سیانوراسیون طلا برای دست‌یابی به عنصر طلا را می‌توان بهترین مثال نمونه فرض کرد.

در روش لیچینگ برجا، همان‌طور که از نامش مشخص است، توده‌های مواد معدنی در سطح را درجا با تزریق حلال مناسب، حل و محصول مادر به سطح زمین پمپاژ می‌شود، برخی از معادل اورانیوم، مس و طلا در دنیا بدین شکل فرآوری می‌شوند.

حلال‌ها : از جمله حلال‌های مناسب می‌توان به آب، اسیدها مانند سولفوریک، کلریدریک و بسیاری از اسیدهای آلی و معدنی دیگر اشاره کرد. از مواد قلیایی مانند، سود سوزآور، بی‌کربنات سدیم، نمک سودا وبسیاری دیگر در لیچینگ استفاده می‌شود.

۱۳ــ۱ــ لیچینگ به کمک باکتری

از این روش هم اکنون در مقیاس‌های صنعتی برای کانسنگ‌های اورانیوم، طلا، مس و بسیاری دیگر استفاده می‌شود. هزینه‌های این روش نسبت به دیگر روش‌های لیچینگ ارزان‌تر است.

از باکتری‌های معروف مانند تیوباسیلوس‌ها استفاده فراوانی می‌شود. در واقع باکتری نقش کاتالیزور را در یک فرآیند بیوشیمیایی به عهده دارد. این باکتری‌ها برای رشد از Co_2 هوا استفاده می‌کنند و آهن دوظرفیتی را به سه‌ظرفیتی تبدیل می‌سازند. در دمای تقریبی $30^{\circ}C$ و محیط pH=۲ فعالند. با متابولیسم این میکروب‌ها اسید تولید شده که منجر به انحلال عنصر مورد نظر می‌شود. امروزه از این فرآیند در مقیاس صنعتی استفاده می‌شود.

۱۳ــ۱ــ۱ــ عوامل مؤثر در لیچینگ : در لیچینگ عوامل مهمی از جمله زمان انحلال، دانه‌بندی مواد اولیه، غلظت مواد شیمیایی، دما، سرعت همزن، دانسیته پالپ، ویسکوزیته پالپ و بسیاری دیگر پراهمیت‌اند که بسته به نوع مواد معدنی باید بهینه‌سازی شوند.

۱۳ــ۱ــ۲ــ جدا کردن محلول مادر از باطله : با توجه به دانسیته محلول مادر ومشابهت آن با باطله همراه، جدایش ثقلی در تیکنرِها به سختی صورت می‌گیرد ولی باید بهینه‌سازی و طراحی شوند. پس از جدایش محلول مادر، باید باطله نیز مورد عملیات فیلتراسیون قرار گیرد، تا مانده عناصر با ارزش نیز از آن بازیابی شود.

۱۳ــ۱ــ۳ــ بازیابی عناصر مفید از محلول مادر : یکی از مراحل مهم در روش‌های لیچینگ، بازیابی عناصر با ارزش از محلول مادر است که با روش تبادل یون، استخراج با حلال، سمنتاسیون و بسیاری روش‌های دیگر صورت می‌گیرد. در مورد هر ماده‌معدنی خاص، از روش‌های نام‌برده، پس از بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر استفاده می‌شود.

خودآزمایی

۱ـ اصول لیچینگ را تعریف کنید.

۲ـ نقش باکتری در فرآوری را توضیح دهید.

۳ـ انواع لیچینگ را نام ببرید.

۴ـ پارامترهای مؤثر در لیچینگ را نام ببرید.

۵ـ کدام‌یک از کارخانه‌های ایران با لیچینگ کار می‌کنند؟

۶ـ تفاوت لیچینگ میکروبی و غیرمیکروبی در چیست؟

۷ـ چرا باطله حاصل از لیچینگ نیز باید فیلتر شود؟

فصل ۱۴
آب گیری

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

۱ـ اهداف آب‌گیری را بیان کند.

۲ـ روش‌های آب‌گیری را شرح دهد.

۳ـ فیلترها را شرح دهد.

۴ـ انواع فیلترها را توضیح دهد.

۵ـ خشک کن‌ها را شرح دهد.

۶ـ انواع خشک کن‌ها را شرح دهد.

۷ـ کوره را شرح دهد.

۱۴ــ آشنایی

به طور کلی عملیات آب‌گیری با سه هدف زیر صورت می‌گیرد :

الف) کاهش مایع از مواد جامد همراه آن که در این حال مایع مورد نیاز می‌باشد و مواد جامد انباشت می‌شود.

ب) جدایش مایع از جامد که در این حال مقدار مادهٔ جامد موجود در مایع افزایش می‌یابد.

ج) جدایش مواد جامد از مایع و نگهداری مایع.

بنابراین در کانه‌آرایی محصول نهایی به علت دارا بودن مقداری آب، مستقیماً قابل استفاده نبوده و نهایتاً عملیات آب‌گیری باید بر روی آن صورت گیرد.

برای انجام عملیات آب‌گیری روش‌های مختلف و دستگاه‌های گوناگونی وجود دارد که بسته به نوع مادهٔ معدنی و خواص آن می‌توان از هریک از آن‌ها یا تلفیقی از آن‌ها استفاده کرد.

الف) روش لبریز کردن مواد : هرگاه در مایعات دانه‌های جامد به صورت پراکنده باشند، بعد از مدتی دانه‌های درشت‌تر زودتر از دانه‌های ریز ته‌نشین می‌شود و با لبریز کردن مایعات، دانه‌های ریز از محیط خارج می‌شوند.

ب) روش سانتریفوژ کردن : با استفاده از نیروی گریز از مرکز، برای جدا کردن یا ته‌نشین کردن دانه‌های ریز جامد از مایعات، به وسیلهٔ چرخش مایع و ایجاد نیروی گریز از مرکز، ذرات به اطراف منتقل و از سوراخ‌های ریزی که در آن تعبیه شده از آن خارج می‌شود.

ج) روش فشرده کردن : برای جدایش جامد از مایع، از فشردن کردن پالپ با اجسام اسفنجی استفاده می‌کنند.

د) روش فیلتر کردن : برای کاهش بیشتر رطوبت از صافی‌ها استفاده می‌شود.

هـ) روش حرارت دادن : این روش براساس اصول فیزیکی تبخیر، استوار بوده و مایعات با دمادهی بخار شده و جسم جامد تا حد مورد نظر خشک می‌شود.

۱۴ــ۱ــ تیکنرها

روش‌های آب‌گیری در سه مرحله صورت می‌گیرد.

۱ــ تیکنر کردن

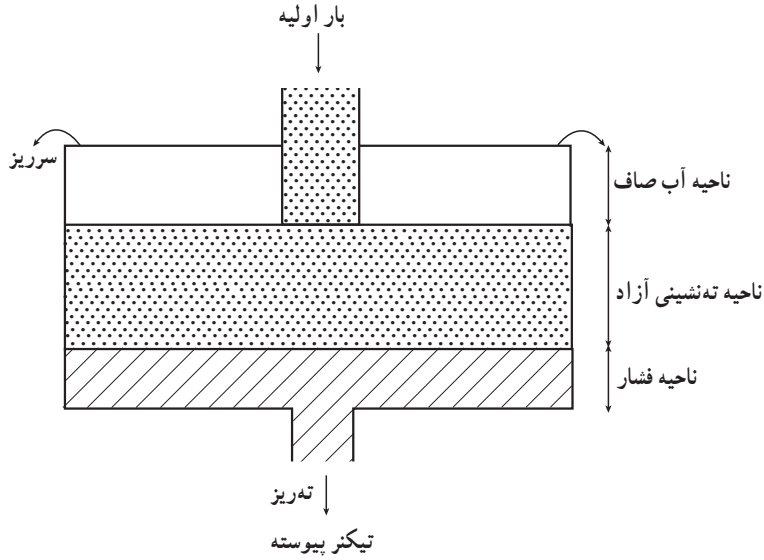
۲ــ فیلتر کردن

۳ــ خشک کردن

در شرایطی که اختلاف چگالی جامد و مایع زیاد باشد تیکنر کردن، روش بسیار مناسبی است. با این عمل ۵۵ تا ۶۰ درصد آب کنسانتره گرفته می‌شود. با فیلتر کردن رطوبت تا ۱۰ درصد نیز می‌رسد که در مرحله بعدی با روش خشک کردن به زیر ۰/۵ درصد کاهش می‌یابد.

در تیکنر کردن چنانچه سرعت ته‌نشینی ذرات کم باشد با اضافه کردن مواد آلی (فلوکولاسیون) و موادمعدنی (کواگولاسیون) سرعت ته‌نشینی را افزایش می‌دهند. در تیکنر کردن عملیات ته‌نشینی در حوضچه‌هایی انجام می‌شود که به آن تیکنر می‌گویند. در طی عملیات، ذرات ته‌نشین شده و با درصد جامد مورد نظر از انتهای آن خارج و آب نیز جهت تصفیه و برگرداندن به کارخانه در حوضچه‌های دیگر وارد می‌شود.

شکل صفحهٔ بعد یک تیکنر پیوسته را نشان می‌دهد.



۱۴ــ۲ــ فیلترها

فیلترها از دستگاه‌های متداول صنعتی، جهت جداسازی مواد جامد موجود از سیال می‌باشند. به علت کاربردهای گوناگون، این دستگاه‌ها امروزه در اشکال مختلف ساخته شده و جهت مصارف گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرند. عمل فیلتراسیون را می‌توان به عبور سیال حاوی مواد جامد از یک بستر ثابت با یک غشاء که ابعاد خلل و فرج‌های آن کوچکتر از اندازهٔ ذرات جامد می‌باشد، تشبیه نمود. در نتیجه سیال از این بستر عبور کرده و مواد موجود در آن برجا می‌ماند. معمولاً جریان ورودی به فیلتر، تحت فشار می‌باشد تا عمل عبور از غشاء سریع‌تر انجام گیرد. با گذشت زمان مواد جامد که باقی می‌ماند، به تدریج منافذ عبور سیال را مسدود می‌کند و افت فشار در فیلتر را بالا می‌برد؛ لذا باید سطح فیلتر را از مواد جامد پاک نمود تا جریان مجدداً برقرار گردد.

در فیلترها سعی بر آن است که سطح فیلتر را زیاد کنند تا مقدار جریان افزایش یابد. فیلترها به دو نوع پیوسته و غیرپیوسته تقسیم می‌شوند. انتخاب فیلترهای غیرپیوسته، بیشتر بر ملاحظات اقتصادی استوار است. جریان ورودی به این فیلترها می‌تواند با اعمال فشار یا خلأ درون فیلتر یا با استفاده از نیروی وزن مواد، انجام شود. فیلترهای صفحه‌ای[۱] و لوله‌ای[۲] را نوع غیرپیوسته و فیلترهای تسمه‌ای استوانه‌ای را از نوع فیلترهای پیوسته مشخص کرده‌اند.

۱۴ــ۲ــ۱ــ فیلترهای صفحه‌ای (فیلتر پرسی) : یکی از قدیمی‌ترین انواع فیلترهاست که

۱ــ Plate and Frame Filters ۲ــ Tube Filter Press

برای انواع سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرد. فشار کارکرد این دستگاه معمولاً psi ۱۰۰ـ۵۰ است ولی برای فشارهای تا psi ۱۰۰۰ نیز چنین دستگاه‌هایی ساخته شده است. در این فیلترها غشاء بین دو صفحه قرار می‌گیرد و عمل فیلتراسیون را انجام می‌دهد. برحسب نوع ورود مواد به فیلتر این فیلترها را به ورودی گوشه‌ای[۱]، ورودی جانبی[۲]، ورودی مرکزی[۳] و نوع فیلتر پرس تیغه‌ای تقسیم نموده‌اند.

ساختمان فیلتر پرس

۱۴ـ۲ـ۲ـ فیلتر پرس با ورودی گوشه‌ای : این نوع فیلتر پرس در شکل نشان داده شده است و معمولی‌ترین نوع مورد مصرف فیلتر پرس می‌باشد. بار ورودی از طریق سوراخی که در گوشهٔ صفحه فیلتر قرار دارد، وارد فیلتر می‌شود و بین غشاء، توزیع می‌گردد. ورودی از گوشهٔ پایین انجام می‌گیرد و خروجی مایع از قسمت بالای فیلتر صورت می‌گیرد. در این حالت فیلتر در آغاز کار به خوبی هواگیری می‌شود. در صورتی که مواد جامد به سرعت رسوب کنند، می‌توان بار را از بالا وارد نمود. در بعضی از این دستگاه‌ها برای افزایش جریان ورودی، بار از دو قسمت وارد می‌شود. در این نوع فیلتر پرس ویسکوزیتهٔ سیّال نقش مهمی ندارد.

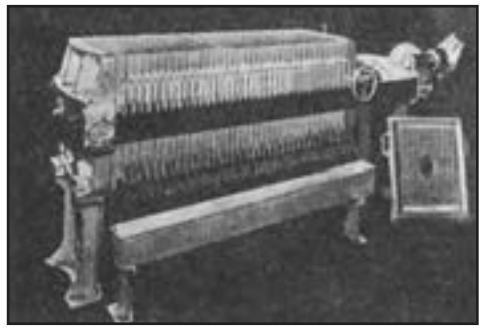
فیلتر پرس با ورودی گوشه‌ای

۱ـ Corner Feed Filter Press ۲ـ Side Feed Filter Press ۳ـ Center Feed Filter Press

۱۴ــ۲ــ۳ــ فیلتر پرس با ورودی جانبی : در این نوع فیلتر پرس جریان ورودی مطابق شکل از دیوارهٔ جانبی وارد می‌شود و مایع خروجی نیز از سمت دیگر خارج می‌شود. عملیات مطابق فیلتر پرس با ورودی گوشه‌ای است، با این تفاوت که معمولاً قسمت ورودی وخروجی، مجزا از صفحهٔ بعدی و قاب بوده و در هنگام کار به فیلتر پرس متّصل می‌شوند. در این حالت غشاء یک پارچه بوده، نیازی به سوراخ کردن یا تغییر شکل قاب و صفحه نیست.

فیلتر پرس با ورودی جانبی

۱۴ــ۲ــ۴ــ فیلتر پرس با ورودی مرکزی : در این نوع فیلتر پرس جریان سیّال ورودی از مرکز، وارد فیلتر پرس می‌شود و بین صفحات غشاء توزیع می‌گردد. در این دستگاه برخلاف دستگاه‌های قبل امکان گرفتگی مسیر در اثر رسوب شدن مواد جامد بسیار کم می‌باشد زیرا در تماس مستقیم با جریان ورودی است. روش کار این فیلتر پرس شبیه دستگاه‌های قبلی است با این تفاوت که تعداد صفحات این دستگاه کمتر است.



فیلتر پرس با ورودی مرکزی

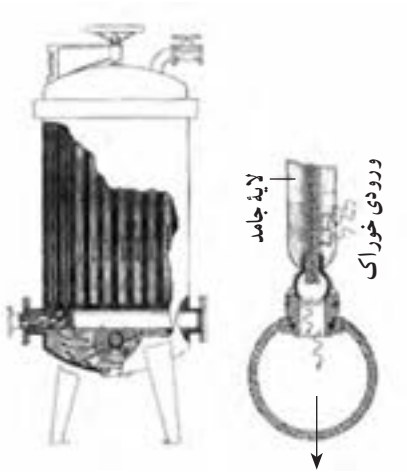
۱۴ــ۲ــ۵ــ فیلتر پرس تیغه‌ای : این دستگاه شبیه فیلتر پرس با ورودی گوشه‌ای است با این تفاوت که به وسیلهٔ تیغه‌های فلزی، تجمع ذرّات جامد در آن به حداقل رسیده است. از این

دستگاه زمانی استفاده می‌کنند که مقدار ذرات جامد بسیار کم باشد و زمانی که از صفحات پشم شیشه‌ای استفاده شود، در حد میکرون مقدار مواد جامد را کاهش می‌دهد.

فیلتر پرس تیغه‌ای

۱۴ـ۲ـ۶ـ فیلترهای لوله‌ای[1]:

در این دستگاه از غشاهای فلزی جهت فیلتراسیون استفاده شده است که به طور لوله‌ای ساخته شده‌اند. این غشاها در لوله‌ای قرار گرفته و به طور عمودی در استوانه‌ای جانمایی می‌شود. غشاء فیلتراسیون ممکن است از سرامیک، کربن، پلاستیک و موارد مشابه ساخته شود. این غشاها بعد از هر بار مصرف می‌توانند مجدداً پس از شستشو، مورد استفاده قرار گیرند. عمل شستشو به علت شکل غشاهای فیلتر به راحتی انجام می‌گیرد.



فیلتر غشایی (لوله‌ای)

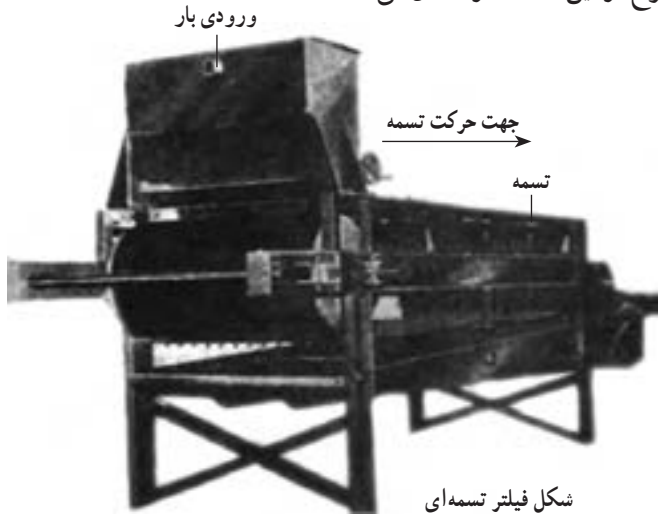
در فیلترهای مداوم همان طوری که از نامشان پیداست، عمل فیلتراسیون برای مدّت طولانی بدون توقّف انجام می‌گیرد و بدیهی است که در این حالت، عملیات کامل نمی‌باشد. در این دستگاه‌ها بار ورودی به سیستم، معمولاً به یک لایهٔ جامد مرطوب و یک محلول رقیق، تقسیم می‌شود. هرچه محلول خروجی رقیق‌تر باشد فیلتراسیون بهتر انجام می‌شود. اصول کار این فیلترها، مشابه فیلترهای غیرپیوسته است، با این تفاوت که به محض افزایش ضخامت لایهٔ جامد روی غشاء، فیلتر به وسیلهٔ این لایه از غشاء جدا شده و از سیستم خارج می‌گردد.

هرچه اختلاف فشار در دو سطح غشاء بیشتر باشد، مقدار جریان عبوری افزایش خواهد یافت.

۱ـ Tube Filter Press

اگرچه جریان سیّال از غشاء می‌تواند به علت وزن سیّال با فشار با خلأ انجام گیرد، ولی در بسیاری از این دستگاه‌ها از خلأ جهت عبور مایع از غشاء استفاده می‌کنند.

۱۴ــ۲ــ۷ــ فیلترهای تسمه‌ای: در این فیلترها مواد ورودی را از بالا بر روی تسمه می‌ریزند. تسمه حرکت افقی داشته، جنس آن از غشاء مورد نیاز می‌باشد. ضمن حرکت افقی تسمه، مایع از منافذ آن عبور کرده، مواد جامد در روی تسمه باقی می‌مانند. در انتهای مسیر هنگامی که تسمه برمی‌گردد، مواد جامد از روی آن تراشیده و در ضمن برگشت تسمه در قسمت پایین می‌توان با وسایل مختلف تسمه را شستشو داد تا عاری از رسوب گردد و دوباره در معرض مواد ورودی قرار گیرد. شکل زیر یک نوع از این دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل فیلتر تسمه‌ای

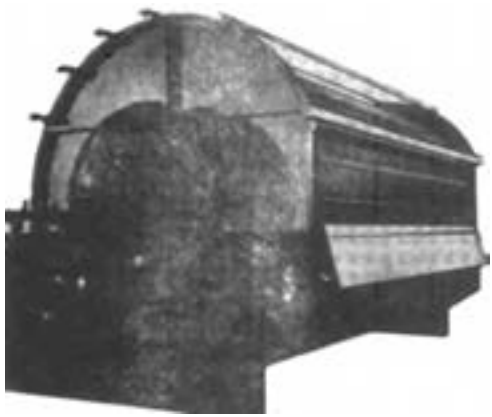
۱۴ــ۲ــ۸ــ فیلترهای استوانه‌ای[1]: این فیلترها به لحاظ حجم کم و کارآیی بالا، امروزه در اشکال مختلفی به کار گرفته شده‌اند. این دستگاه‌ها از استوانه‌ای تشکیل شده‌اند که مواد به طرق مختلفی به آن‌ها منتقل می‌شود. خلأ مایع جریان ورودی را به داخل می‌کشد و مادهٔ جامد بر روی بدنهٔ استوانه باقی می‌ماند. جنس بدنهٔ استوانه از غشاهای مخصوص فیلتر ساخته شده است. استوانه در حال گردش به دور محور افقی خود می‌باشد. از زمانی که سیّال بر روی استوانه ریخته می‌شود، عمل فیلتراسیون انجام می‌گیرد و لایه‌ای از مادهٔ جامد بر روی استوانه تشکیل می‌گردد. این لایه قبل از این که استوانه یک دور کامل بزند، به وسیلهٔ تیغه‌هایی که مماس بر سطح استوانه می‌باشند، تراشیده می‌شود و سطح تمیز دوباره در معرض جریان ورودی قرار می‌گیرد. بین فاصلهٔ تراشیده شدن مواد

۱ــ Drum Filters

جامد و تماس جریان ورودی به فیلتر، می‌توان در صورت لزوم عمل شستشو را انجام داد. این عمل باید به سرعت و به نحوی انجام گیرد که در خلأ داخل سیستم خللی ایجاد نشود. بدیهی است در این حالت مقدار آب شستشو حجم زیادی خواهد داشت که باید دقّت لازم صورت گیرد. شکل زیر یک نوع از این فیلترها را که بار ورودی آن‌ها از بالا وارد می‌شود نشان می‌دهد.

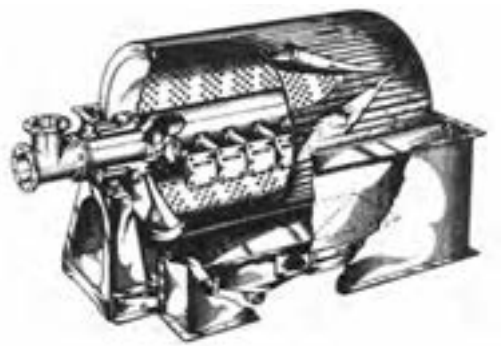
فیلتر استوانه‌ای با بار ورودی از بالا

در شرایطی که بار قبل از ورود به فیلتر نیاز به هم زدن داشته باشد، معمولاً بار را در ظرفی مجهز به هم‌زن قرار می‌دهند و در این حالت قسمت استوانه‌ای فیلتر همواره در تماس با سیّال بوده، در هر دور قسمتی از مایع را در حالت مکش به درون استوانه رانده و مادهٔ جامد باقی مانده روی استوانه توسط کاردک‌هایی تراشیده می‌شود. در این جا نیز بدنهٔ استوانه از جنس غشاء فیلتر می‌باشد. (شکل الف) این نوع فیلتر را نشان می‌دهد.



الف ــ فیلتر دورانی

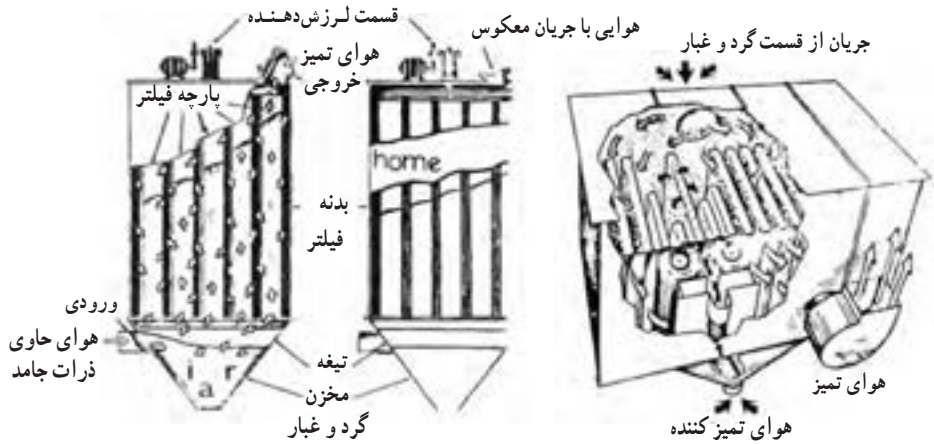
در برخی از دستگاه‌ها به جای تراشیدن لایهٔ جامد تشکیل شده، استوانهٔ فیلتر از داخل به نحوی ساخته شده که در قسمتی از آن هوا به شدت از داخل به خارج استوانه دمیده می‌شود. این عمل به جدا شدن رسوبات منجر می‌گردد. (شکل ب) یک نوع از این فیلتر را نشان می‌دهد.



ب ــ فیلتر دورانی

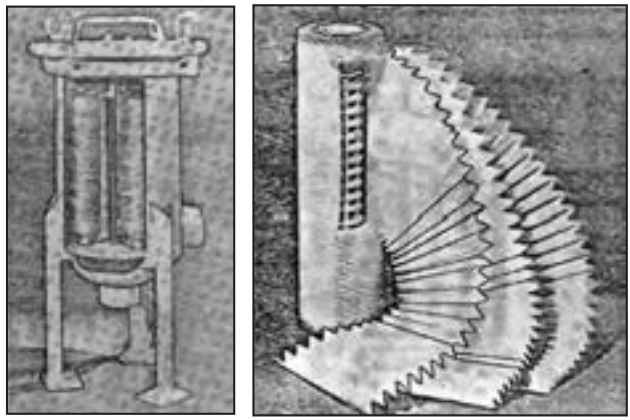
۱۴ــ۲ــ۹ــ فیلترهای پارچه‌ای : در این فیلترها از غشاء پارچه‌ای جهت جداسازی ذرّات جامد از گاز و بخار استفاده می‌کنند. گازها به هنگام عبور از پارچه، ذرّات خود را برجای می‌گذارند. به منظور عمل بهتر و مداوم فیلتر، ذرّات رسوب شده برروی فیلتر را به روش‌های مختلفی از آن جدا می‌کنند. در برخی از فیلترها از وسایل مکانیکی جهت دور کردن ذرّات استفاده می‌کنند. در انواع دیگر فیلترها به وسیلهٔ تکان دادن و یا استفاده از جریان هوای معکوس، فیلتر را از ذرّات جدا می‌سازند. کارآیی عمل، به ماهیت ذرّات بستگی دارد؛ ولی عموماً بسیار بالا می‌باشد. از این فیلترها زمانی استفاده می‌شود که مقدار ذرات جامد موجود در جریان گاز زیاد نباشد، در غیراین صورت منافذ فیلتر به سرعت مسدود شده، افت فشار بالا می‌رود و کارآیی شدیداً پایین خواهد آمد. جنس غشاء پارچه‌ای با توجه به نوع مواد جامد و گاز، انتخاب می‌شود. غشاء باید از نظر شیمیایی نسبت به مواد مقاوم بوده، در صورتی که ذرّات ساینده‌ای در جریان گاز وجود داشته باشد، مقاومت غشاء و در مقابل سایش نیز باید در نظر گرفته شود. در شکل فیلتر پارچه‌ای نشان داده شده که با استفاده از جریان معکوس هوا، ذرّات روی غشاء از آن جدا می‌شود.

در نوع دیگری از فیلترهای پارچه‌ای، غشاءها به صورت آماده، به شکل‌های مختلفی ساخته شده‌اند که به آسانی در محل خود در دستگاه جای می‌گیرند. در شکل یک نوع از این فیلترها را با غشاهای مورد استفاده آن که به صورت لوله‌ای هستند، نشان می‌دهد.



فیلترهای پارچه‌ای

در این نوع فیلترها غشاهای «کارتریج» را به آسانی می‌توان تعویض نمود و پس از شستشو مجدداً مورد استفاده قرار داد. لازم به تذکر است که جنس این فیلترها ممکن است از مواد طبیعی نظیر پشم و پنبه و یا از مواد مصنوعی نظیر پشم شیشه، داکرون، نایلون، الیاف، اکریلیک و سلولزی باشد.



فیلتر با غشاء کارتریج قابل تعویض

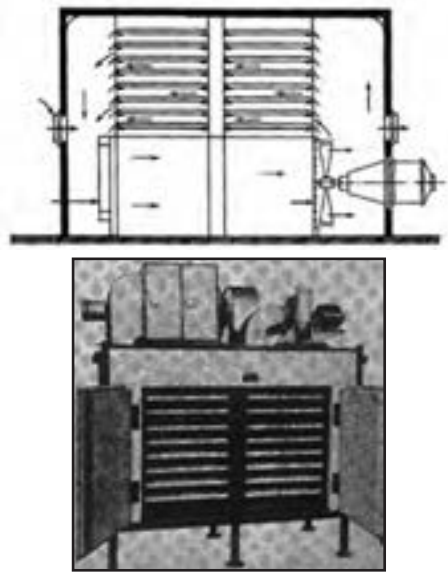
۱۴ــ۳ــ خشک‌کن[۱]

خشک‌کن‌ها دستگاه‌هایی هستند که به منظور جدا کردن مایع از مواد جامد مرطوب، مورد استفاده قرار می‌گیرند. چون در مواردی کنسانترهٔ به دست آمده از فلوتاسیون محتوی میزان قابل توجهی رطوبت است، لذا ضرورت ارسال آن‌ها به دستگاه‌های خشک‌کن کاملاً محسوس است. خشک‌کن‌ها امروزه انواع مختلفی دارند و با توجه به چگونگی رفتار مادهٔ مرطوب در طی خشک شدن و خواص فیزیکی و شیمیایی آن در خطوط تولید قرار می‌گیرند.

خشک‌کن‌ها نیز مانند فیلترها به دو نوع غیرپیوسته و پیوسته تقسیم می‌شوند.

۱۴ــ۳ــ۱ــ خشک‌کن‌های غیرپیوسته

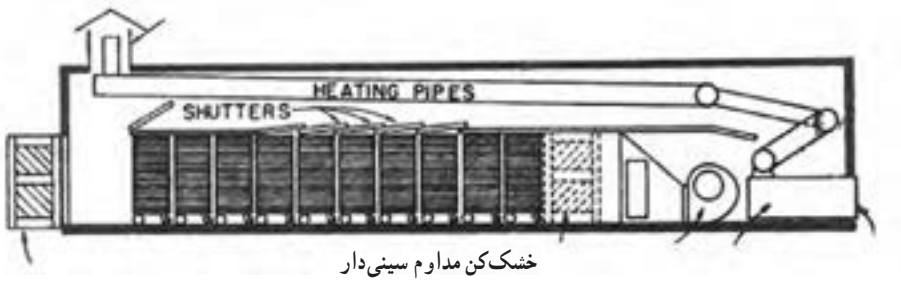
خشک‌کن‌های سینی‌دار: این خشک‌کن‌ها از ساده‌ترین انواع خشک‌کن‌های مورد استفاده در صنعت می‌باشند. از محفظه‌ای تشکیل شده‌اند که در داخل آن‌ها سینی‌هایی به موازات یکدیگر قرار گرفته است که مواد مرطوب را روی آن‌ها قرار داده و به کمک یک منبع حرارتی و یک بادبزن هوای گرم و خشک را از محفظه ورودی مواد مرطوب عبور می‌دهند.



خشک‌کن سینی‌دار

۱ــ Dryers

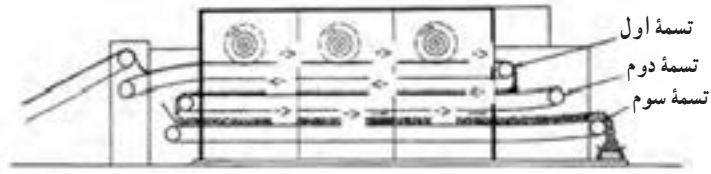
در نوع دیگری از این خشک‌کن‌ها، سینی‌ها از طریق چهارچوب متحرکی که در آن قرار گرفته‌اند، جهت بارگیری به خارج خشک‌کن برده می‌شوند و بعد از قرار دادن مواد در داخل آن‌ها وارد خشک‌کن می‌گردند. معمولاً چهارچوب سینی‌ها دارای چرخ‌هایی است که امکان حرکت آن را آسان می‌سازد و یا در مواردی حرکت سینی‌ها بر روی ریل انجام می‌گیرد.



خشک‌کن مداوم سینی‌دار

۱۴ــ۳ــ۲ــ خشک‌کن‌های پیوسته : این خشک‌کن‌ها عموماً از تونلی تشکیل شده‌اند که تسمه‌ای در آن در حال حرکت می‌باشد. مواد بر روی تسمه قرار گرفته، در مدتی که طول تونل را طی می‌نمایند، در تماس با هوای گرم بوده، خشک می‌شوند. طول این خشک‌کن‌ها ممکن است گاهی به بیش از یک صد متر برسد.

در مواردی که نیاز به زیر و رو کردن مواد خشک شونده در روی تسمه‌ها باشد، از خشک‌کن‌های چند تسمه‌ای استفاده می‌کنند. جهت حرکت تسمه‌ها و مسیر کلی مواد در شکل دیده می‌شود.

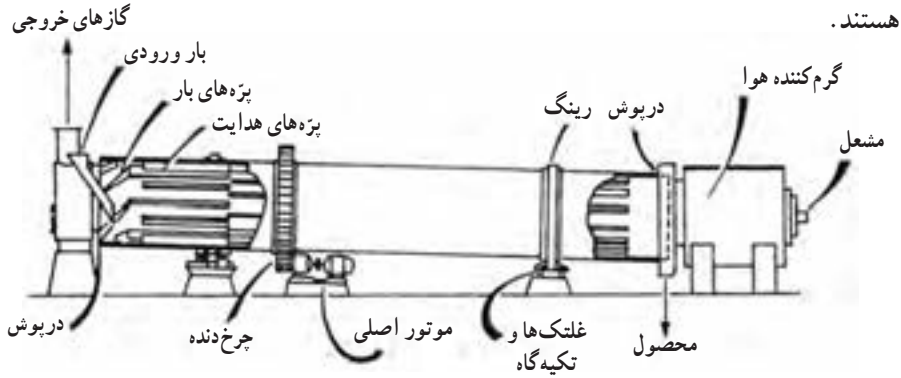


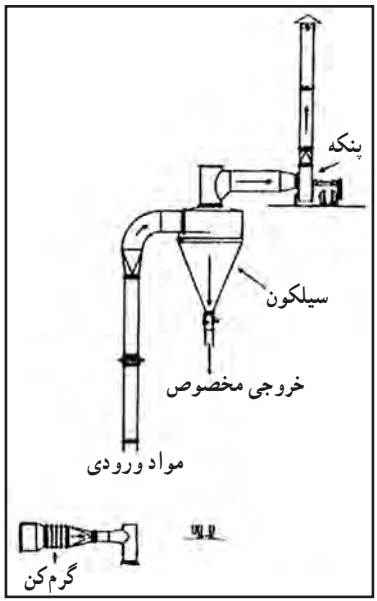
خشک‌کن‌های چندتسمه‌ای

الف) خشک‌کن‌های پیچی[1] : در این نوع خشک‌کن‌ها عمل انتقال و حرکت مواد در یک محفظهٔ استوانه‌ای که در آن هوای گرم و خشک در تماس با مواد مرطوب است، توسط یک یا چند مارپیچ صورت می‌گیرد که ضمن گردش آن‌ها مواد به جلو رانده می‌شوند. این دستگاه‌ها برای آن دسته از موادی به کار می‌روند که اولاً تحت فشار، خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها تغییر نکند ثانیاً به بدنهٔ استوانه یا پیچ‌ها نچسبد.

۱ــ Screw dryers

ب) خشک‌کن‌های استوانه‌ای : این خشک‌کن‌ها برای خشک کردن پالپ‌ها، مایعات غلیظ شده و مواد خمیری شکل به کار می‌روند و از دستگاه‌های پرمصرف در صنایع غذایی و صنایع شیمیایی هستند.





خشک‌کن هوایی

ج) خشک‌کن‌های هوایی[1] : خشک‌کن‌های هوایی جهت خشک کردن ذرّات جامد و مرطوب به کار می‌روند. در این دستگاه‌ها ذرّات در معرض جریانی از هـوای داغ قرار می‌گیرند و ضمن انتقال به وسیلهٔ هوای داغ در تونل‌هایی خشک می‌شوند. در این خشک‌کن‌ها همهٔ ذرّات مرطوب تماس نسبتاً کاملی با هوای داغ پیدا کرده، به سرعت خشک می‌شوند و به همین علّت زمان اقامت در این خشک‌کن‌ها از چند ثانیه تجاوز نمی‌کند. زمان خشک شدن بین ۳ تا ۱۰ ثانیه تغییر می‌کند. مواد خروجی از فیلترها که به صورت ذرّات مرطوب از سانتریفوژهای مداوم هستند در این سیستم خشک می‌شوند. جهت پخش کردن ذرّات به طور مناسب در جریان هوای داغ از پخش کننده‌ها یا به هم‌زن‌های مکانیکی استفاده می‌کنند. هوای داغ به همراه ذرّات جامد معلّق در آن در هنگام خارج شدن از مخزن خشک‌کن، (که عموماً به طور عمودی قرار دارد) وارد دستگاه جدا کننده‌ای می‌شوند که ذرّات جامد را از جریان گاز جدا می‌کنند. این دستگاه‌ها سیکلون نام دارند و در آن‌ها ذرّات به وسیلهٔ نیروی گریز از مرکز به دیوارهٔ سیکلون منحرف و به پایین می‌ریزند و هوای عاری از ذرّات از سیکلون خارج می‌شود. در شکل یک

۱ــ Peneumatic dryers

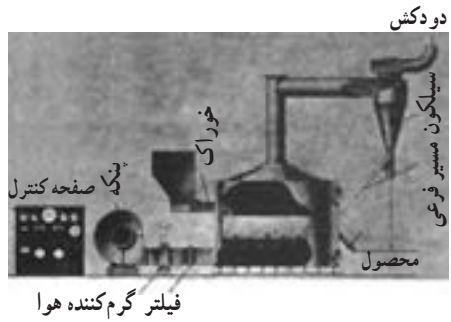
نوع از این خشک‌کن نشان داده شده است.

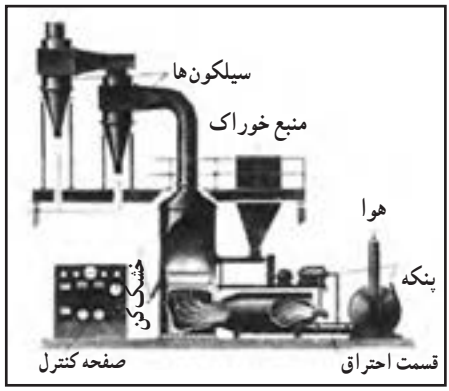
برای جریان هوا از پنکه‌های قوی استفاده می‌کنند و معمولاً یک مبدّل حرارتی که با بخار داغ کار می‌کند، جهت گرم کردن هوا به کار می‌رود. پنکه را می‌توان در پایین مخزن قرار داد که در این حالت سیستم تحت فشار کار می‌کند و در صورتی که پنکه در بالای تونل باشد، سیستم به صورت مکشی کار خواهد کرد. در این حالت پنکه در انتهای مسیر و بعد از سیکلون قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از احتمال خروج ذرّات از سیکلون، معمولاً از یک فیلتر پارچه‌ای در انتهای مسیر و قبل از خروج گاز به محیط استفاده می‌کنند.

د) خشک‌کن‌های بستر سیّال[1] : در این خشک‌کن‌ها نیز از جریان هوای داغ برای رطوبت‌زدایی از مواد دانه‌ای شکل یا ذرّات ریز استفاده می‌کنند. اصول کار این خشک‌کن‌ها بدین قرار است که با استفاده از جریان هوای داغ ذرّات را به حالت معلّق و شناور نگه می‌دارند.

در این حالت تقریباً تمام سطح ذرّات در تماس با هوای داغ قرار گرفته، رطوبت خود را از دست می‌دهند. برای شناور نگه داشتن ذرّات، سرعت و مقدار جریان هوا باید دقیقاً تعیین شود. بدنهٔ خشک کن، استوانه‌ای شکل است و هوا از پایین وارد خشک‌کن می‌شود. برای جریان یکنواخت هوا در تمام بستر خشک‌کن از صفحهٔ توزیع کننده که در پایین استوانه قرار دارد، استفاده می‌شود. این صفحه دارای سوراخ‌های بسیار ریزی بوده که امکان عبور ذرات جامد از آن وجود ندارد؛ ولی هوا به آسانی از آن عبور می‌کند. هنگامی که هوا ذرّات را به حالت معلّق نگه‌می‌دارد، بستر حالت سیّال پیدا کرده، از بسیاری جهات دارای خواص سیّال می‌باشد و انتقال حرارت به علت تماس بسیار خوب ذرّه با هوا به خوبی انجام می‌گیرد. رطوبت جدا شده از مواد جامد به همراه هوای داغ، بستر خشک‌کن را ترک می‌کند. برای جریان هوا از پنکه‌های قوی استفاده می‌کنند. گرم کردن هوا به وسیلهٔ مبدّل‌های حرارتی انجام می‌گیرد که اکثراً از بخار داغ استفاده می‌شود. اگر خشک‌کن کوچک و الکتریسته ارزان باشد، از انرژی الکتریکی نیز می‌توان جهت گرم کردن استفاده نمود. از جریان‌های گاز خروجی از کوره نیز می‌توان به عنوان هوای داغ استفاده نمود. در این حالت هوای خروجی با استفاده از یک مشعل که جهت احتراق سوخت به کار می‌رود، گرم می‌شود و بعد از عبور از صفحهٔ توزیع، وارد خشک‌کن می‌گردد. این خشک‌کن‌ها به نام خشک‌کن حرارت مستقیم موسوم‌اند. در شکل یک نوع از خشک‌کن‌های بستر سیّال نشان داده شده است.

۱ــ Fluidized ــ bed dryers





چون جریان هوا داغ خروجی از کوره، ذرّات بسیار ریز را با خود به همراه می‌برد، جهت جدا کردن این ذرّات از هوا، از سیکلون یا فیلتر و یا هر دو استفاده می‌شود. در شکل یک خشک‌کن از نوع حرارت مستقیم نشان داده شده است.

در برخی از شرایط مواد جامد، حاوی محلول حاصل از مراحل هیدرومتالورژی بود و استفاده از هوا به علّت تأثیر اکسیژن بر مواد، مجاز نمی‌باشد. در این حالت از گازهای دیگری نظیر ازت، (جهت تبخیر حلال موجود در مواد جامد) در بستر سیّال استفاده می‌کنند. به این ترتیب که ازت بعد از عبور از مبدّل حرارتی گرم شده، وارد بستر خشک‌کن می‌شود. چون امکان ارسال ازت و حلال به محیط، از نظر اقتصادی و از نظر حفاظت محیط مجاز نیست، در این حالت گازهای خروجی را بعد از عبور از سیکلون ابتدا از یک کندانسور عبور می‌دهند تا حلال جدا شود و سپس گاز مزبور را دوباره به سیستم برمی‌گردانند تا بعد از گرم شدن وارد خشک‌کن شود. در این سیستم کلاً گازها سیکل بسته‌ای را طی می‌کنند و حلال مورد نظر نیز بازیابی می‌شود.

۱۴ــ۴ــ کوره‌ها[۱]

کوره‌ها دستگاه‌هایی هستند که به وسیلهٔ اکسیداسیون شیمیایی سوخت‌ها یا با استفاده از الکتریسیته در آن‌ها گرما تولید می‌شود. قسمت اعظم کوره‌هایی که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، براساس اکسیداسیون سوخت‌های گازی و یا مایع عمل می‌کنند. بدیهی است که در این

۱ــ Furnaces

حالت، تأمین اکسیژن مورد نیاز سوخت نقش مهمی در عملکرد کوره خواهد داشت. قسمت احتراق سوخت در کوره مشعل نام دارد. و آن‌چه برای مشعل مهم است، اختلاط کامل سوخت و هوابه نسبت معین است. با توجه به نوع سوخت و مواد حاصل از احتراق سوخت، انواع مختلف کوره با متعلقات و دستگاه‌های کنترل مختلف ساخته می‌شوند. امروزه در اکثر صنایع، نیاز به منابع گرمایی وجود دارد. در فرآوری مواد معدنی نیز این نیاز وجود دارد. از جمله در کارخانه‌های زغال‌شویی کوره‌هایی با حرارت ۱۲۰۰ـ۱۰۰۰درجه سانتی‌گراد هوای گرم را جهت خشک کردن زغال‌سنگ کنسانتره که تا حدود ۲۰ درصد رطوبت دارد، تأمین می‌کند. در هر صورت برحسب نوع نیاز و مورد مصرف، انواع و اقسام کوره‌های مختلف وجود دارد که ساختمان هریک از آن‌ها دارای ویژگی‌های خاصی است. مثلاً از کوره‌های الکتریکی برای خالص کردن بسیاری از موادمعدنی استفاده می‌شود.

خودآزمایی

۱ـ عملیات آب‌گیری در صنعت با چه اهدافی صورت می‌گیرد؟

۲ـ روش‌های آب‌گیری را نام ببرید.

۳ـ فیلترها چگونه دستگاه‌هایی هستند و با گذشت زمان چه اقدامی باید در مورد آن‌ها انجام داد؟

۴ـ برحسب نوع ورود مواد به فیلترها آن‌ها را چگونه تقسیم‌بندی می‌کنند؟

۵ـ فیلتر پرس با ورودی مرکزی چه مزیّتی بر سایر انواع فیلتر پرس دارد؟

۶ـ اساس کار فیلترهای تسمه‌ای چگونه است؟

۷ـ فیلترهای استوانه‌ای چگونه عمل می‌کنند؟

۸ـ خشک‌کن‌ها چگونه دستگاه‌هایی هستند و چه انواعی دارند؟

۹ـ خشک‌کن‌های پیوسته دارای چه نوع عملکردی هستند؟

۱۰ـ خشک‌کن‌های هوایی چگونه کار می‌کنند؟

۱۱ـ اساس کار خشک‌کن‌های بستر سیّال چیست؟

۱۲ـ کوره‌ها چگونه کار می‌کنند و در زغال‌شویی چه مورد مصرفی دارند؟

فصل ۱۵

کنترل باطله، پساب و مسائل زیست محیطی در فرآوری مواد معدنی

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

۱ـ باطله را شرح دهد.

۲ـ نقش کانه‌آرائی در آلوده کردن محیط زیست را بیان کند.

۳ـ انواع سدهای باطله را بشناسد.

۴ـ طبقه‌بندی باطله‌ها را از نظر آلودگی فراگیرد.

۱۵ــ کنترل باطله، پساب و مسائل زیست محیطی در فرآوری مواد معدنی

باطله‌های فرآوری، موادی هستند که پس از بازیابی فلزات و یا کانی‌های غیرفلزی از کانسنگ‌ها باقی مانده و می‌توانند برحسب نوع فرایند، دانه‌ریز و دانه درشت باشند و با توجه به ماهیت مواد معدنی و روش فراوری، ترکیب شیمیایی و فیزیکی آن‌ها نیز متفاوت می‌باشد. بنابراین مدیریت باطله‌ها به ترکیب شیمیایی و فیزیکی باطله، محل کارخانه و دیگر پارامترها وابسته است. یکی از مهم‌ترین روش‌های انباشت باطله، استفاده از سدهای باطله است. این سدها با هدف نگهداری و کنترل انباشت مواد باطله و در برخی مواقع از خود باطله‌ها ساخته می‌شوند. این سدها ویژگی‌های مشترکی با سدهای ذخیره آب نیز دارند.

معمولاً باطله‌های معدنی را خاک‌های سطحی، روباره معدنی، مواد کم ارزش، باطله‌های

کارخانه‌های فرآوری و مواد به‌جا مانده از مراحل لیچینگ تشکیل می‌دهند. موارد زیر انواع باطله‌های کانه‌آرائی را با توجه به ماهیت و شکل ذرات و دانه‌بندی آن‌ها مشخص می‌سازد.

ــ در فرایند خردایش، ذرات جامد و با تنوع شکل و معمولاً بدون رطوبت و از چند میلی‌متر تا چند صد میکرون متغیر است.

ــ در جدایش ثقلی، ذرات شکل و محدوده مشخص دارند و اغلب درشت دانه هستند.

ــ در سنگ جوری، تنوع شکل و بدون رطوبت و ابعاد آن‌ها در حد سانتی‌متر است.

ــ در جدایش مغناطیسی و الکترواستاتیکی، شکل و محدوده دانه‌بندی مشخص و تا چند میکرون می‌رسد.

ــ در فرایند فلوتاسیون، باطله‌ها به‌صورت پالپ بوده، به همراه مواد شیمیایی و اغلب ریزتر از ۷۵ میکرون هستند.

ــ در فرایندهای لیچینگ، باطله‌ها بصورت بسیار مرطوب بوده و مواد شیمیایی آلاینده موجود در آن‌ها بسیار آسیب رسان بوده و محدوده ابعادی آن‌ها از چند صد میکرون ریزتر از میکرون نیز می‌رسد.

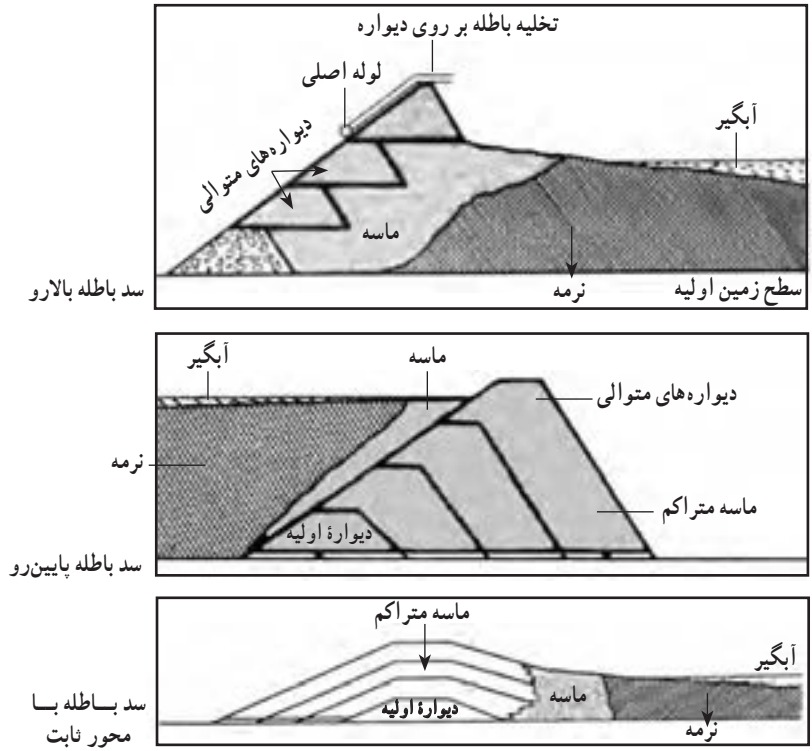
ــ در آب‌گیری از کنسانتره، باطله حاصله، بسیار آلوده و بسته به نوع فرایند، دانه‌بندی متفاوتی دارند.

۱۵ــ۱ــ انواع سدهای باطله

یکی از مهم‌ترین مراحل انباشت باطله، انتخاب محل آن است که بهتر است از نظر اقتصادی نزدیک به معدن و کارخانه باشد. این بخش حجم قابل توجهی از فعالیت‌های معدنی را به خود اختصاص می‌دهد.

زمین زیر سد باید مقاوم باشد و از نظر حمل مجدد آب به کارخانه مطالعات لازم مانند نفوذ به سد باطله، تبخیر و موارد مشابه صورت گیرد. سد باطله ممکن است در داخل دره‌ها نیز ایجاد شود. هزینه‌های انباشت باطله بسیار زیاد و قیمت تمام شده محصول کارخانه را تحت شعاع قرار می‌دهد. در مواقع خاص مانند بادهای شدید، زلزله، سیل و موارد مشابه، تدابیر خاصی باید اتخاذ گردد.

معمولاً سه نوع سد باطله جهت انباشت طراحی می‌شود. سد باطله بالارو، پایین‌رو و محور ثابت. شکل‌های صفحهٔ بعد سه نوع سد باطله را نشان می‌دهد.



سد باطله بالارو، بسیار ساده و کم هزینه است. در این روش سدی با ارتفاع کم در پایین‌ترین ارتفاع ساخته و دیواره سد در مراحل بعد به سمتی که بستر ارتفاع بیشتری دارد، پیشروی می‌کند.

در مدل پایین‌رو، با بالا رفتن دیواره سد، محورطولی آن در امتداد شیب بستر به سمت پایین پیروی می‌کند.

در سد با محور ثابت، خط الرأس دیواره سد با بالا رفتن در وضعیت ثابتی قرار می‌گیرد. در این روش سرعت عملیات بیشتر از سد پایین‌رو است.

۱۵ــ۲ــ انتقال آب به کارخانه

معمولاً ۶۰ درصد آب توسط تیکنرها به کارخانه منتقل می‌شود و حدود ۱۳/۵ درصد به سد باطله نفوذ و ۶/۵ درصد تبخیر می‌شود که در کل حدود ۲۰ درصد آب جبرانی لازم است. البته اعداد ذکر شده برحسب نوع ماده معدنی و سازه و شرایط جوی متغیر می‌باشد.

۱۵ــ۳ــ طبقه‌بندی باطله‌ها از نظر نوع آلایندگی

آلودگی زیست محیطی ناشی از فعالیت‌های معدنی بخصوص فرآوری شامل آلودگی شیمیایی و فیزیکی می‌باشد. آلودگی شیمیایی بسیار جدی و خطرناک می‌باشد و آلودگی فیزیکی از فرایندهای فیزیکی مانند تولید گرد و غبار جامدات معلق در آب و دیگر موارد ناشی می‌شود.

موارد زیر انواع آلاینده را بسته به نوع فرآوری و میزان آسیب‌رسانی آن‌ها مشخص می‌سازد.

ــ سیانور (شیمیایی) که از باطله‌های سیانوراسیون طلا حاصل و بسیار سمی می‌باشد.

ــ فلزات سنگین (شیمیایی) که از باطله‌های طلا و فلزات پایه حاصل و بسیار سمی می‌باشد.

ــ زهاب‌های اسیدی (شیمیایی) که از باطله‌های سولفیدی حاصل و باید خنثی‌سازی شود.

ــ پساب‌های خطرناک (شیمیایی) که از پساب‌های واحد آب‌گیری ــ فلوتاسیون و لیچینگ بوده و بسته به نوع آلاینده بودن آن باید تصفیه و خنثی شود.

ــ مواد فرار و گازهای سمی(شیمیایی) که ناشی از فرایندهای خردایش، لیچینگ و فلوتاسیون بوده و باید رقیق و خنثی‌سازی شود.

ــ مواد رادیواکتیو (شیمیایی) که از باطله‌های مواد رادیواکتیو مانند اورانیوم بوده و باید به‌شدت کنترل و دفن شود.

ــ مواد حاصل از لیچینگ و بسته به نوع مواد و فرایند باید کنترل شود.

از آلاینده‌های نوع فیزیکی می‌توان به گرد وغبار، صوت و سرو صدا اشاره کرد که باید کنترل شوند.

۱۵ــ۴ــ کنترل مسائل زیست‌محیطی

معمولاً روش‌های تصفیه و یا استفاده مجدد از باطله و پساب‌های کارخانه‌ای به دلیل وجود سیانور، پساب‌های اسیدی و فلزات سنگین به شرح زیر می‌باشد.

ــ روش‌های حذف سیانور مانند تجزیه طبیعی، روش‌های فیزیکی و روش‌های شیمیایی

ــ روش‌های تصفیه پساب‌های اسیدی مانند سیستم‌های تصفیه فعال، کانال‌های آهکی باز، باکتری، تصفیه غیرفعال، بیولوژیکی و تالاب

ــ روش‌های حذف فلزات سنگین مانند روش‌های رسوب‌دهی و الکتروشیمی

ــ روش‌های فیزیکی مانند تبخیر، فیلتراسیون و روش‌های بیولوژیکی

خودآزمایی

۱ـ چرا باطله‌ها را باید مدیریت نمود؟

۲ـ باطله‌ها چه نوع موادی هستند؟

۳ـ روش‌های انباشت باطله را نام ببرید.

۴ـ باطله‌ها را از نظر نوع فرایند طبقه‌بندی کنید.

۵ـ باطله‌ها را از نظر نوع آلایندگی طبقه‌بندی کنید.

۶ـ اهمیت مسائل زیست محیطی در فعالیت‌های فرآوری را چگونه ارزیابی می‌کنید؟

منابع فارسی

۱ــ جزوات درسی دکتر بهرام رضایی عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۹۰)

۲ــ خردایش و طبقه‌بندی ــ دکتر بهرام رضایی، انتشارات نور ۱۳۷۶

۳ــ پرعیارسازی ثقلی ــ دکتر بهرام رضایی، انتشارات دانشگاه هرمزگان ۱۳۷۷

۴ــ پرعیارسازی مغناطیسی ــ دکتر بهرام رضایی، انتشارات دانشگاه امیرکبیر ۱۳۷۸

۵ــ فلوتاسیون ــ دکتر بهرام رضایی، انتشارات دانشگاه هرمزگان ۱۳۷۵

۶ــ تکنولوژی زغال‌شویی ــ دکتر بهرام رضایی، انتشارات دانشگاه امیرکبیر ۱۳۸۰

۷ــ تهیهٔ مواد معدنی ــ دکتر رامز وقار، انتشارات دانشگاه تهران، شماره ۱۱۴۷ چاپ ۱۳۴۶

۸ــ استاندارد روش‌های نمونه‌گیری در سنگ معدنی منگنز بارگیری شده در واگن‌های باربری ــ انتشارات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران

۹ــ کانه‌آرایی ــ ایران برزگر، انتشارات مدرسه عالی معدن شاهرود (جزوه درسی سال ۱۳۵۴)

۱۰ــ آشنایی با معدن‌کاری ــ حسن مدنی، انتشارات دفتر تحقیقات و برنامه‌ریزی درسی وزارت آموزش و پرورش چاپ ۱۳۶۴

۱۱ــ مهندسی مواد معدنی ــ فرج‌الله مجاب، جزوه انتشاراتی سازمان سنجش آموزش کشور اسفند ماه ۱۳۵۶

۱۲ــ کانه‌آرایی ــ دکتر حسین نعمت‌اللهی، انتشارات دانشگاه تهران زمستان ۱۳۷۵

۱۳ــ ماشین‌آلات صنعتی ــ شهرزاد برقی، کتاب درسی سال سوم رشته صنایع شیمیایی هنرستان‌های فنی ۱۳۶۸

۱۴ــ کانه‌آرایی ــ کتاب‌های دکتر نعمت‌اللهی، دانشگاه تهران سال (۹۰ــ۱۳۸۸)

منابع انگلیسی

۱ــ Wills. B. A. Mineral Processing Technology Pergamon press– 1981.

۲ــ N. L. Weiss. Mineral Processing Vol. 1.1985.