

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

پرتال جامع مهندسی عمران و معماری

« با هم متفاوت بیندیشیم »

[www.ucivil.ir](http://www.ucivil.ir)



برای دانلود کتاب، پروژه و آموزش تخصصی نرم افزارهاک مختلف مهندسی عمران و معماری از

وب سایت و کانال تلگرام پرتال جامع مهندسی عمران و معماری بازدید فرمایید





دانشگاه صنعتی قم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

درس اصول مهندسی تصفیه آب و فاضلاب

(بخش اول)



دکتر عبدالرضا کریمی

۱۳۹۰-۱۳۹۱

## درس اصول مهندسی تصفیه آب و فاضلاب

تعداد واحد: ۳

نوع واحد: نظری و اختیاری

پیشنیاز: مهندسی محیط زیست

سرفصل درس: (۴۸ ساعت)

۱. آشنایی با فرآیندهای مشترک تصفیه آب و فاضلاب، شامل تئوری‌ها و کاربرد آنها
۲. تصفیه فیزیکی آب: جداسازی مواد جامد معلق از آب: تیپ‌های مختلف ته نشینی، ضوابط و مبانی طراحی واحدهای ته‌نشینی اعم از واحدهای با مقطع مستطیلی و دایره‌ای
۳. تصفیه شیمیایی آب: انعقاد و لخته‌سازی، اصول و تئوری‌های مربوطه، روابط و مبانی مربوط به طراحی واحدهای انعقاد و لخته‌سازی
۴. سختی زدایی: ته‌نشین‌سازی عوامل سختی به کمک مواد شیمیایی، سختی‌زدایی با روش تبادل یونی
۵. صاف کردن و زلال‌سازی آب: مشخصات فیلترها، هیدرولیک فیلترها، اجزاء فیلترها
۶. گندزدایی آب: استفاده از کلر، استفاده از دیگر روش‌های ضدعفونی کردن آب
۷. روش‌های حذف مواد معدنی و آلی محلول در آب
۸. هوادهی و اصول و کاربرد آن در تصفیه آب
۹. تصفیه مقدماتی فاضلاب: آشنایی با ضوابط و مبانی مربوط به طراحی آشغال‌گیرها، خردکننده‌ها، دانه‌گیرها، وسایل اندازه‌گیری دبی، ته‌نشینی مقدماتی
۱۰. فرآیندهای تصفیه ثانویه: آشنایی با ضوابط و مبانی طراحی سیستم‌های مختلف لجن‌فعال، صافی‌های چکنده، استخرها و برکه‌های تثبیت، ته‌نشینی ثانویه
۱۱. ضدعفونی کردن پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب
۱۲. تصفیه تکمیلی فاضلاب: استخراج مواد مغذی و مواد جامد از فاضلاب
۱۳. دفع و کاربرد مجدد فاضلاب تصفیه شده
۱۴. آنالیز هیدرولیکی تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب و رسم پلان و پروفیل‌های هیدرولیکی در مسیر جریان

### رفرنس‌های پیشنهادی:

- ۱- کتاب تصفیه فاضلاب، نگارش: دکتر م.ت. منزوی، انتشارات دانشگاه تهران، جلد دوم، چاپ پنجم: اسفند ۱۳۷۳.
- ۲- کتاب مهندسی محیط زیست، مترجم: دکتر ایوب ترکیان، انتشارات کنکاش، چاپ اول: پاییز ۱۳۷۴.
- ۳- کتاب آلودگی محیط زیست "آب، خاک و هوا"، تالیف: مهندس مجید عرفان‌منش، دکتر مجید افیونی، انتشارات ارکان، چاپ دوم: پاییز ۱۳۸۱.
- ۴- کتاب اصول کیفیت و تصفیه آب و فاضلاب، تالیف: دکتر محمد شریعت پناهی، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ سوم: مهر ۱۳۷۳.
- 5- Wastewater Engineering, Treatment and Reuse, Metcalf & Eddy, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Fourth Edition, 2003.
- 6- Wastewater Treatment for Pollution Control, Soli J Arceivala, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Fifth Edition, 2004.
- 7- Wastewater Treatment Concepts and Design Approach, G.L. Karia & R.A. Christian, Prentice-Hall Of India Private Limited, 2006.
- 8- Principles of water Quality Control, T.H.Y. Tebbutt, Butterworth Heinemann, 2002.

## فهرست مطالب

- مقدمه و کلیات ..... ۲
- ۱- آشنایی با فرآیندهای مشترک تصفیه آب و فاضلاب، شامل تئوری‌ها و کاربرد آنها ..... ۹
- ۲- تصفیه فیزیکی آب: جداسازی مواد جامد معلق از آب: تیپ‌های مختلف ته نشینی، ضوابط و مبانی طراحی واحدهای ته‌نشینی اعم از واحدهای با مقطع مستطیلی و دایره‌ای ..... ۱۱
- ۳- تصفیه شیمیایی آب: انعقاد و لخته‌سازی، اصول و تئوری‌های مربوطه، روابط و مبانی مربوط به طراحی واحدهای انعقاد و لخته‌سازی ..... ۱۶
- ۴- سختی زدایی: ته‌نشین‌سازی عوامل سختی به کمک مواد شیمیایی، سختی‌زدایی با روش تبادل یونی ..... ۳۲
- ۵- صاف کردن و زلال‌سازی آب: مشخصات فیلترها، هیدرولیک فیلترها، اجزاء فیلترها ..... ۳۷
- ۶- گندزدایی آب: استفاده از کلر، استفاده از دیگر روش‌های ضدعفونی کردن آب ..... ۴۲
- ۷- روش‌های حذف مواد معدنی و آلی محلول در آب ..... ۵۳
- ۸- هوادهی و اصول و کاربرد آن در تصفیه آب ..... ۵۸

## مقدمه و کلیات

انسان در تاریخ حیات خود ضمن آشنایی با آب و خواص آن به این نکته پی برد که می‌توان از آب به عنوان یک ماده پاک کننده استفاده کند. هرچند با دفع آلودگی‌ها توسط آب کمک بزرگی در بقای بشر شد، اما از طرف دیگر مشکل دیگری بوجود آمد و آن تجمع آب‌های آلوده و اصطلاحاً فاضلاب بود. رها سازی این فاضلاب در کنار محل سکونت جوامع بشری، محل مناسبی برای حیات، رشد و تکثیر انواع تک‌سلولی‌ها مانند میکروب‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها شد. برخی از این تک سلولی‌ها عامل ایجاد بیماری و انتشار آن در جوامع بشری شدند. بطوریکه مرگ و میر بسیار زیادی بوجود آمد و انسان پی برد که پس از تولید فاضلاب می‌بایست آن را در مکان مناسبی به دور از محل سکونت دفع نماید. به این ترتیب دفع آن در اعماق زمین، رودخانه‌ها و دریاها مطرح گردید. هر چند این امر کمک قابل توجهی در مقابله با شیوع بیماری‌ها شد، اما باعث آلودگی محیط زیست و منابع طبیعی گردید.

رودخانه‌ها و دریاها به طور طبیعی تا اندازه‌ای توان خودپالایی و تصفیه فاضلاب را دارند. اما با ازدیاد جمعیت و صنعتی شدن زندگی بشری، انواع فاضلاب‌های خطرناک و صنعتی وارد رودخانه‌ها و دریاها شد و باعث نابودی آبزیان و اکوسیستم‌های آنها گردید. بطوریکه تا به امروز این مشکل کماکان ادامه دارد و دریاها و رودخانه‌ها توانایی تصفیه فاضلاب‌ها را ندارند. به این دلیل، انسان پی برد که باید فاضلاب را تصفیه کرده تا از زیان‌های آن بکاهد.

تعریف و اهداف تصفیه فاضلاب:

تصفیه فاضلاب عبارت است از: مجموعه اقداماتی که جهت زدایش یا کاهش مواد آلاینده موجود در فاضلاب به کار می‌رود، به طوریکه از پساب تولیدی بتوان به طور سالم و مطمئن برای مصارف کشاورزی یا تخلیه به آبهای جاری و یا مقاصد دیگر استفاده مجدد نمود. اهداف تصفیه فاضلاب عبارت است از:

- ✓ حفاظت بهداشت عمومی جامعه و جلوگیری از انتشار بیماری‌های واگیر.
- ✓ استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده
- ✓ برطرف شدن مشکل حاد دفع فاضلاب ساکنین شهرها و روستاها، به ویژه در مناطقی که دارای زمین‌های سنگی و غیرقابل نفوذ بوده و یا این که دارای سطح آبهای زیرزمینی بالا می‌باشند.

فاضلاب خام، محتوای مواد آلاینده فیزیکی، میکروبی و شیمیایی است و در صورتی که به صورت خام و تصفیه نشده به محیط زیست تخلیه شود، باعث آلودگی منابع آب، زمین‌های کشاورزی و به طور کلی محیط زیست می‌شود. خطرات ناشی از آلودگی محیط زیست نیز در نهایت از طریق چرخه غذایی متوجه بهداشت و سلامتی انسان می‌شود.

استفاده از چاه جذبی که روش متداول دفع فاضلاب در اکثر شهرهاست، سبب آلودگی منابع آبهای زیرزمینی به مواد آلاینده میکروبی و شیمیایی شده که آلودگی این نوع منابع آب در بسیاری از شهرها اتفاق افتاده است. یکی از راههای افزایش غلظت نیترات در آبهای زیرزمینی، دفع فاضلاب از طریق چاههای جذبی است که در بسیاری از موارد سبب شده که غلظت نیترات در آب به بیش از حد توصیه شده توسط سازمان بهداشت جهانی برسد و استفاده از چنین آبهایی برای مصارف شهری بدون تصفیه مقدور نباشد. مطالعات نشان داده در جوامعی که قبلاً دارای سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب نبوده و بعداً مجهز به سیستم دفع فاضلاب شده‌اند، درصد انتشار بیماری‌های منتقله از طریق آب آلوده به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

کاربرد فاضلاب خام و تصفیه نشده نیز در زمین‌های کشاورزی سبب آلودگی محصولات کشاورزی به طیف وسیعی از مواد آلاینده میکروبی و شیمیایی می‌شود که چنین مواد آلاینده‌ای در نهایت از طریق زنجیره غذایی به واسطه مصرف محصولات آلوده به فاضلاب به انسان راه یافته و اثرات سوء بهداشتی و بیماری‌زایی به همراه خواهد داشت. همچنین تماس کشاورزان و کارگران نیز با فاضلاب در موقع آبیاری سبب انتشار عوامل بیماری‌زا در جامعه می‌شود.

تخلیه فاضلاب‌های تصفیه نشده به آبهای جاری نیز سبب تهی شدن منابع آب از اکسیژن محلول شده و زندگی را برای آبزیان با مشکل مواجه می‌سازد. بطوریکه ماهی‌ها و دیگر آبزیان در چنین آبهایی قادر به زندگی نخواهند بود. زیرا ماهی‌ها برای زنده ماندن به حداقل ۳ تا ۵ میلی‌گرم در لیتر اکسیژن محلول نیاز دارند. ورود آمونیاک و دیگر مواد سمی نیز به آبهای جاری خطر جدی برای زندگی آبزیان به دنبال خواهد داشت. تخلیه فاضلاب‌های محتوی مواد معلق و آلی به آبهای سطحی سبب افزایش کدورت و کاهش عبور نور خورشید به اعماق آب شده و در کاهش رشد گیاهان به ویژه جلبک‌ها موثر می‌باشد. جلبک‌ها یک منبع تولید اکسیژن محلول در منابع آب می‌باشند. ته‌نشینی مواد معلق در کف رودخانه به مرور منجر به تشکیل لایه‌ای از لجن شده که وجود این لایه لجن، محل را برای تخم‌ریزی ماهی‌ها نامناسب می‌سازد. علاوه بر این، در لایه لجن موجود در کف رودخانه به دلیل عدم وجود اکسیژن، فعالیت‌های بیولوژیکی بی‌هوازی اتفاق می‌افتد که نتیجه آن تولید گازهای نامطبوع و ایجاد رنگ در آب است که چنین آبی بدون تصفیه قابل استفاده برای مصارف شهری نخواهد بود.

علاوه بر جنبه‌های بهداشتی تصفیه فاضلاب، یکی دیگر از اهداف تصفیه فاضلاب را می‌توان استفاده مجدد از پساب جهت مصارف کشاورزی، فضای سبز، مصارف تفریحی، پرورش ماهی، صنایع و تغذیه سفره‌های آب زیر زمینی نام برد. استفاده مجدد از فاضلاب‌های تصفیه شده می‌تواند به عنوان یک منبع ارزشمند آب در شهرهایی که با مشکل کمبود آب روبرو می‌باشند، مطرح باشد. کاهش منابع آب از یک طرف و افزایش مصارف آن از طرف دیگر سبب شده که مسئولین به دنبال یافتن راه حلی جهت مقابله با بحران کمبود منابع آب باشند. در این رابطه استفاده از پساب می‌تواند دارای نقش موثر در جهت کاهش برداشت آب از منابع دیگر باشد.

کاربرد پساب در کشاورزی از متداولترین مصارف استفاده از فاضلاب‌های تصفیه شده می‌باشد، زیرا در فاضلاب مواد مغذی لازم برای رشد گیاهان همچون ازت، فسفر، پتاسیم و ... به اندازه کافی وجود دارد. همچنین با توجه به این که پساب محتوی مواد آلی است، کاربرد آن در زمین‌های کشاورزی سبب بهبود کیفیت بافت خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌شود. مطالعات نشان داده که استفاده از پساب در کشاورزی سبب افزایش بازدهی محصولات کشاورزی به میزان ۳۰-۵۰ درصد نسبت به استفاده از آب خام و کود شیمیایی می‌شود.

یکی دیگر از مزایای استفاده از فاضلاب‌های تصفیه شده در کشاورزی، کاهش مصرف کودهای شیمیایی است که خود در کاهش آلودگی منابع آب بسیار موثر است. با استفاده مجدد از پساب تولیدی توسط هر نفر می‌توان ۳۰-۲۵ متر مربع زمین را تحت پوشش کشاورزی قرار داد. در خصوص کاربرد پساب برای استفاده مجدد، توجه به استانداردها و معیارهای بهداشتی ارائه شده از سوی سازمان‌های مربوطه ضروری است. اگر چنین معیارهایی نادیده گرفته شود، خطرات سوء بهداشتی کاربرد پساب جبران ناپذیر خواهد بود.

### منابع آب در طبیعت

- ✓ آبهای زیرزمینی مثل آب چاه‌ها و چشمه‌ها
- ✓ آبهای سطحی مثل رودخانه‌ها و جویبارها
- ✓ آبهای شور دریاها و اقیانوس‌ها

### ویژگیهای آب‌های زیرزمینی

- ✓ مواد معلق و مواد آلی کم
- ✓  $Fe^{2+}$  و  $Mn^{2+}$  کم و  $CO_2$  نسبتاً زیاد

- ✓ املاح محلول و سختی نسبتاً زیاد
- ✓ چاههای کم عمق ممکن است آلوده به میکروب باشند.

### ویژگی های آبهای سطحی

- ✓ معمولاً به میکروارگانیسمها آلوده هستند.
- ✓ مقدار آمونیاک و نیترات آنها ممکن است زیاد باشد.
- ✓ در صورت عبور از نواحی صنعتی، به مواد شیمیایی آلوده هستند.
- ✓ املاح محلول آنها نسبتاً کم است.
- ✓ PH آنها در حدود ۷-۸ است.

### ویژگیهای آبهای شور

- ✓ مقدار املاح محلول آنها زیاد، ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ PPM
- ✓ میزان یونهای کلر و سدیم زیاد، بیش از ۵۰۰ PPM

### ناخالصی های آب

آب خالص در طبیعت وجود ندارد. ضمن استقرار آب در یک مکان یا جاری شدن در یک منطقه، مواد جامد و گازهای محلول در آب، در آن حل و مواد ریز غیرقابل حل در آن به صورت معلق در می آیند. بنابراین، ناخالصی های آب سه دسته کلی هستند:

- ✓ یونها (کاتیونها و آنیونها)
- ✓ گازهای محلول در آب (اکسیژن، دی اکسید کربن و ...)
- ✓ مواد کلوئیدی و معلق (گل و لای، باکتریها و ...)

### ناخالصی های یونی:

کاتیونهایی که تقریباً در تمام آبهای طبیعی وجود دارند:



- ✓ منیزیم  $Mg^{++}$  باعث سختی شده و ماده غذایی موجودات زنده می شود.
  - ✓ سدیم  $Na^+$ ، غلظت زیاد آن سبب شوری شده و برای گیاهان و ماهیان مضر است.
  - ✓ کلسیم  $Ca^{++}$ ، باعث سختی شده و ماده غذایی موجودات زنده است.
  - ✓ پتاسیم  $K^+$ ، مقدار آن کمتر از سدیم است.
  - ✓ آهن  $Fe^{2+}$ ، مقدار آن به pH و  $O_2$  آب بستگی دارد. حدود  $0/2 - 0/5$  PPM در آب های سطحی و حدود ۱ تا  $10$  mg/l در آب های عمقی.
  - ✓ منگنز  $Mn^{++}$ ، غلظت آن حدود  $0/1 - 1$  میلی گرم در لیتر است. زیاد آن باعث بوی نامطبوع و رشد میکروارگانیسم ها می شود.
- آنیون هایی که در آب های طبیعی حضور دارند:

- ✓ بیکربنات و کربنات: منشا آنها، انحلال کربنات کلسیم و  $CO_2$  در آب بوده و خاصیت بافری به آب می دهند.
- ✓ کلرید  $Cl^-$ : غلظت زیاد آن سبب شوری و برای بسیاری از گیاهان مضر است و سبب خوردگی فلزات نیز می شود.
- ✓ سولفات  $SO_4^{2-}$ : منشا آن انحلال نمک های سولفات بوده و تا حدودی از فعالیت باکتری ها حاصل می شود. مقدار زیاد آن سبب اسهال شده و برای گیاهان مضر بوده و باعث خوردگی سازه ها می شود.
- ✓ سیلیکا: سیلیکا هم به صورت یونی و هم کلوئیدی در آب می تواند وجود داشته باشد که به pH بستگی دارد. در آب های طبیعی حدود  $1-30$  ppm برای نیروگاهها مشکل ساز است.
- ✓ نیتрат  $NO_3^-$ : در آب طبیعی در حدود  $1$  ppm است. در آب های زیرزمینی در حضور باکتری ها می توانند تا  $50$  ppm هم باشد.

### ناخالصی های گازی:

- ✓ مهمترین ناخالصی های گازی آب:
- ✓ اکسیژن ( $O_2$ ): منشا آن اکسیژن هوا (طبق قانون هنری) است. اکسیژن باعث گوارایی آب و در ضمن خوردگی آن می شود.
- ✓ دی اکسید کربن ( $CO_2$ ): منشا آن تجزیه بی کربنات ها است.

- ✓ آمونیاک ( $\text{NH}_3$ ): منشا آن ترکیبات ازت دار آلی و باکتریها است.
- ✓ هیدروژن سولفور ( $\text{H}_2\text{S}$ ): منشا آن تجزیه ترکیبات گوگرد بوسیله باکتریها است که ایجاد طعم و بوی بد می کند.

### شیمی آب

- ✓ فرمول مولکولی آب  $\text{H}_2\text{O}$  است.
- ✓ برای آب ۱۸ نوع ایزوتوپ وجود دارد.
- ✓ به علت وجود پیوندهای هیدروژنی در آب، ویژگیهای ذیل در آب از مواد با وزن مولکولی مشابه بیشتر است.

• نقطه جوش و نقطه ذوب، ظرفیت حرارتی

• دانسیته، ویسکوزیته، کشش سطحی

• مولکول آب قطبی است و بسیاری از مواد یونی را در خود حل می کند.

• فشار بخار آب زیاد نبوده، بنابراین، اتلاف آن زیاد نیست.

• ظرفیت حرارتی آب زیاد است.

• برای انتقال گرما مناسب است.

• گرمای نهان جوش آب زیاد است.

• محمل ارزان قیمتی برای انتقال انرژی است.

### مصارف عمده آب

- ✓ کشاورزی: بیشترین مصرف آب در کشاورزی است. pH و میزان  $\text{Na}^+$  آب مورد مصرف کشاورزی باید کنترل شود و باید فاقد مواد سمی باشد.

✓ صنعت

✓ فرآیند تولید

✓ سیستمهای سرمایش و گرمایش

✓ واحدهای تولید بخار

### آبهای آشامیدنی و مصارف خانگی

ویژگی‌های لازم این آبها:

✓ فاقد مواد معلق، کلوئیدی و رنگ

✓ فاقد میکروبه‌های بیماری‌زا

✓ فاقد مواد سمی

✓ مقدار مواد آلی و اکسید کننده نباید از حد مجاز بیشتر باشد.

سازمان بهداشت جهانی WHO یکی از مراجعی است که حدود مجاز میزان ناخالصی‌های آب شرب را مشخص کرده است.

### لزوم تصفیه آب

آب طبیعی را باید برای مصارف آشامیدنی و صنعتی تصفیه کرد. عواملی که سبب ضرورت تصفیه آب می‌شوند:

✓ وجود باکتری‌های بیماری‌زا (پاتوژن) در آب

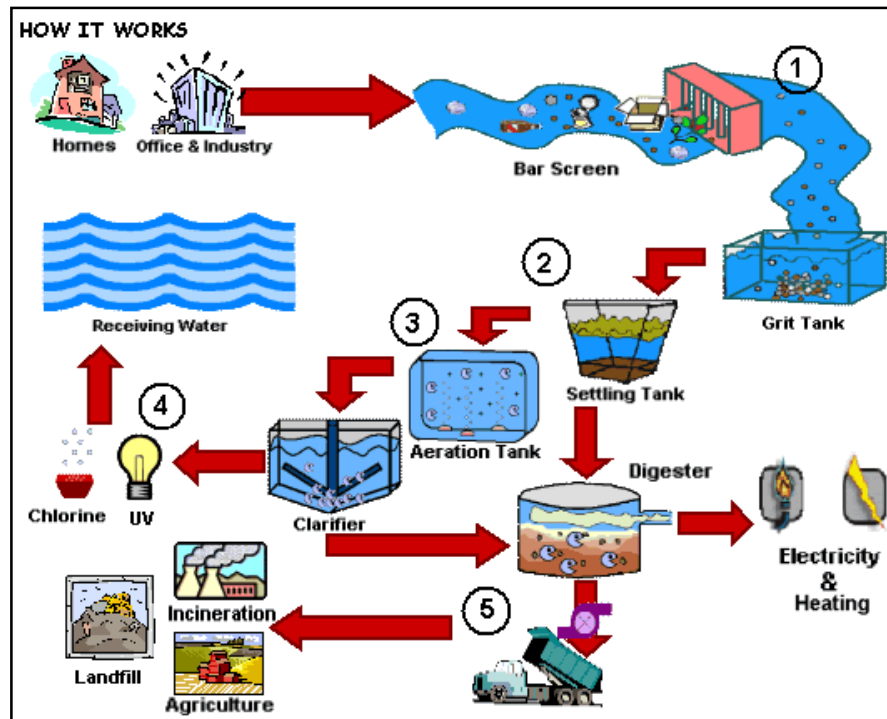
✓ کمبود و یا زیادی بعضی از یونها

✓ وجود ذرات معلق

✓ بو، مزه و رنگ آب

برای هر صنعتی مطلوب‌ترین کیفیت آب آن است که هزینه تصفیه آب کمتر از مخارج رفع عوارض ناشی از حضور ناخالصی‌ها باشد.

۱- آشنایی با فرآیندهای مشترک تصفیه آب و فاضلاب، شامل تئوری‌ها و کاربرد آنها



شماتیک واحدهای عملیاتی و فرآیندی تصفیه فاضلاب

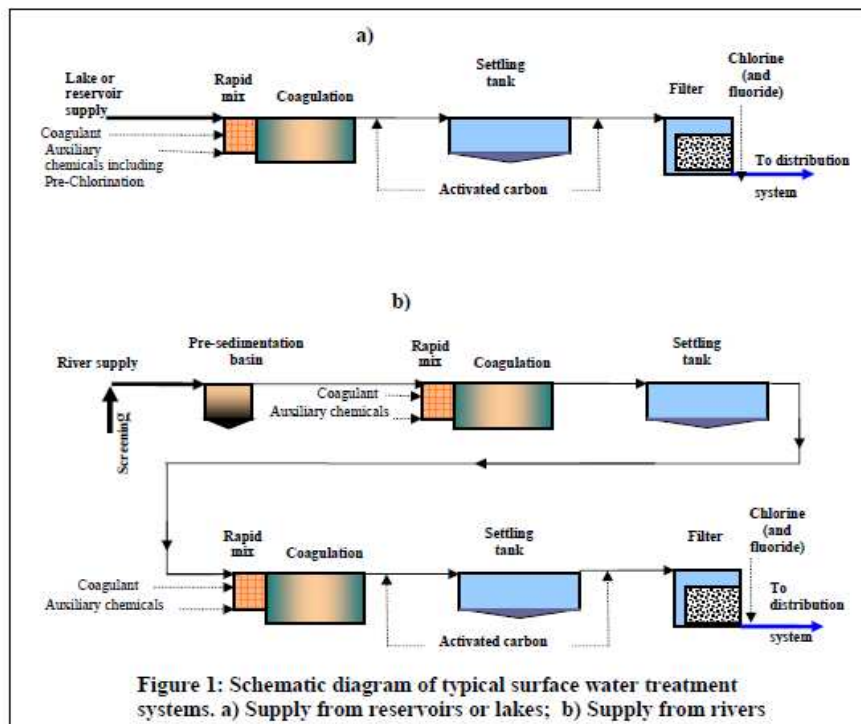


Figure 1: Schematic diagram of typical surface water treatment systems. a) Supply from reservoirs or lakes; b) Supply from rivers

فلودیاگرام سیستم‌های متعارف تصفیه آب

روش‌های حذف گازها از آب و فاضلاب:

مهمترین گازهایی که ممکن است در آب‌ها و یا فاضلاب‌ها وجود داشته باشند:

منشاء	نام گاز
هوا، گیاهان سبزینه دار	O <sub>2</sub>
جلبک‌ها در شب - تجزیه هوازی مواد آلی - تجزیه کربنات‌ها	CO <sub>2</sub>
تجزیه غیر هوازی مواد آلی گوگرد دار	H <sub>2</sub> S
تجزیه غیر هوازی مواد آلی ازت دار	NH <sub>3</sub>
کلرزنی	Cl <sub>2</sub>
هوا	N <sub>2</sub>

- O<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> در آب فقط به صورت مولکولی هستند.
  - مقداری از NH<sub>3</sub>، H<sub>2</sub>S، CO<sub>2</sub> و Cl<sub>2</sub> در آب بصورت یون درمی‌آیند، ولی فرمهای یونی و مولکولی مربوطه با یکدیگر در حال تعادل هستند.
  - فرمهای یونی مواد فوق‌الذکر جزء ناخالصی‌های گازی محسوب نمی‌شوند.
- بیشترین کاربرد واحد هوادهی در تصفیه فاضلاب بوده، اگرچه در تصفیه‌خانه آب نیز استفاده می‌شود. وقتی شرایط اکسیداسیون هوازی را در آب و فاضلاب خواسته باشیم، باید به طریق مصنوعی این اکسیژن را برای سیستم تامین کنیم.

انواع هوادهی:

- هوادهی سطحی
- هوادهی نیمه مستغرق
- هوادهی افشانه‌ای

هوادهی سطحی دارای پرت بالا می‌باشد.

تئوری و مکانیسم عملکرد سیستم هوادهی در فصل ۸ به تفصیل ارائه خواهد شد.

## ۲- تصفیه فیزیکی آب: جداسازی مواد جامد معلق از آب: تیپ‌های مختلف ته‌نشینی، ضوابط و مبانی طراحی واحدهای ته‌نشینی اعم از واحدهای با مقطع مستطیلی دایره‌ای

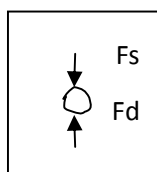
جدا شدن ذرات از آب یا فاضلاب به کمک نیروی وزن خویش را ته‌نشینی گویند. حوض ته‌نشینی دارای ۴ ناحیه ورودی، خروجی، ته‌نشینی و جمع‌آوری لجن می‌باشد. در حوض ته‌نشینی عدد رینولدز باید پایین باشد. سرعت آب در ناحیه خروجی باید کم باشد تا مواد ته‌نشین شده از حوض خارج نگردند ته‌نشینی ۴ نوع دارد:

Discrete Settling	ته‌نشینی آزاد
Flocculants Type	ته‌نشینی توام با لخته‌سازی
Zone Settling	ته‌نشینی ناحیه‌ای
Compressed Settling	ته‌نشینی در اثر فشار

### ته‌نشینی نوع اول:

ذره در آب تحت تاثیر دو نیروی جاذبه و حرکت آب قرار می‌گیرد. عمق و طول حوض ته‌نشینی باید به اندازه‌ای باشد که ذرات برای ته‌نشینی فرصت لازم را داشته باشند. در ته‌نشینی نوع اول، ته‌نشینی ذره مستقل از سایر ذرات صورت می‌گیرد. برای اینکه این نوع ته‌نشینی اتفاق بیفتد، باید غلظت ذرات کم بوده و ذرات حالت پارتیکولی داشته باشند (تمایلی به لخته شدن نداشته باشند). سرعت سقوط درته‌نشینی بر اساس قانون استوکس به شرح زیر است:

مطابق با قانون نیوتن، شرط ته‌نشینی این است که نیروی جاذبه زمین بر ذره نسبت به نیروی مقاومت آب مساوی و یا بزرگتر گردد.



$$F_s = V \cdot \rho_s \cdot g - V \cdot \rho_w \cdot g = gV(\rho_s - \rho_w)$$

$F_s$ : وزن ارشمیدس برابر است با وزن موثر ذره منهای وزن آب هم حجم آن

$$F_D = C_D \cdot A_c \cdot \rho_w \cdot \frac{V_s^2}{2}$$

$C_D$ : ضریب اصطکاک که به خواص آب بستگی دارد.

$A_c$ : سطح موثر ذره در جهت حرکت

$V_s$ : سرعت ته‌نشینی ذره

هرچه سرعت ته‌نشینی بیشتر باشد، مطلوب‌تر خواهد بود. بنابراین باید  $V_s$  حداکثر باشد. باید حجم ذره را زیاد کنیم که با اضافه نمودن مواد شیمیایی کواگولانت حجم را زیاد می‌کنیم و چگالی هم از این طریق زیاد می‌شود.

$$C_D = F(Re)$$

$C_D$  ثابت نیست و با تغییر عدد رینولدز تغییر می‌کند.

$Re \leq 1 \Rightarrow C_D = \frac{24}{Re}$	$1 \leq Re \leq 10^3 \Rightarrow C_D = \frac{18.5}{Re^{0.6}}$	$Re > 10^3 \Rightarrow C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34$
---	---	--

$$Re = \frac{V_s \cdot d}{\nu}$$

$$(\rho_s - \rho_w)g \cdot V = C_D \cdot A_c \cdot \rho_w \cdot \frac{V_s^2}{2}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{2gV(\rho_s - \rho_w)}{C_D \cdot A_c \cdot \rho_w}}$$

ذرات را کروی فرض می‌کنیم که در این صورت نسبت  $\frac{V}{A}$  مقدار مشخصی می‌شود. حال حجم را بر حسب قطر و سطح مقطع را هم بر حسب قطر بدست می‌آوریم

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi \frac{d^3}{8} = \frac{1}{6}\pi d^3 A = \pi R^2 = \pi \frac{d^2}{4} = \frac{\pi d^2 V}{4 A} = \frac{2d}{3}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{4gd(\rho_s - \rho_w)}{3C_D \cdot \rho_w}} V_s = \sqrt{\frac{4gd(S_s - 1)}{3C_D}} \text{ ذره } S_s \text{ دانسیته نسبی ذره}$$

برای جریان توربولانت  $Re > 10^3$  مقدار  $C_D$  برابر ۰.۴ در نظر گرفته می‌شود. لذا داریم

$$V_s = \sqrt{3.3gd(S_s - 1)}$$

برای جریان آرام  $Re \leq 1$  مقدار  $C_D = \frac{24}{Re}$  بنابراین:

$$V_s = \frac{gd^2(S_s - 1)}{18\mu}$$

که قانون استوک است.

در محاسبه سرعت ته‌نشینی انتخاب فرمول صحیح نقش کلیدی دارد. در رنج بین جریان آرام و توربولانت، بایستی برای محاسبه سرعت ته‌نشینی از روش سعی و خطا استفاده شود. با توجه به اینکه ویسکوزیته تابعی از درجه حرارت است، مهم است که در نظر داشته باشیم که درجه حرارت‌های پایین باعث افزایش ویسکوزیته و کاهش سرعت ته‌نشینی می‌گردد، در حالیکه در درجه‌حرارت‌های بالا، به دلیل کاهش ویسکوزیته، سرعت ته‌نشینی افزایش خواهد یافت. حوض ته‌نشینی را برای فصل زمستان که بازدهی آن کمتر است طراحی می‌کنند.

**سوال:** سرعت سقوط ذره‌ای به شعاع ۲ میلی‌متر و چگالی ۴ در آب بیشتر است یا سرعت سقوط ذره‌ای به شعاع ۴ میلی‌متر و چگالی ۲ در همان آب.

حل: سرعت سقوط برابر است با:

$V_s$

برای ذره اول  $d=2$  و  $\rho_s=4$  (فرض می‌کنیم)  $\rho_w=1$

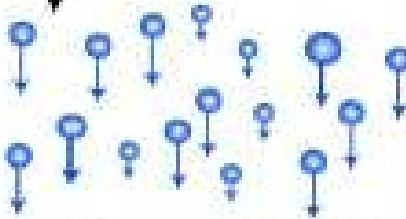
برای ذره دوم  $d=4$  و  $\rho_s=2$  (فرض می‌کنیم)  $\rho_w=1$

$$V_s(1) = \frac{g d^2 (4 - 1)}{18 \mu}$$

$$V_s(2) = \frac{g d^2 (2 - 1)}{18 \mu}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{3}{1}$$

Particles settling without influencing other particles.

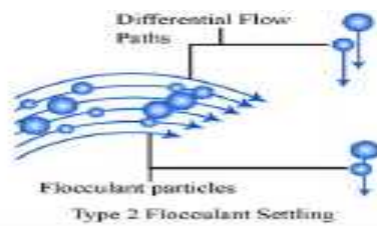


Type 1 Discrete particle settling



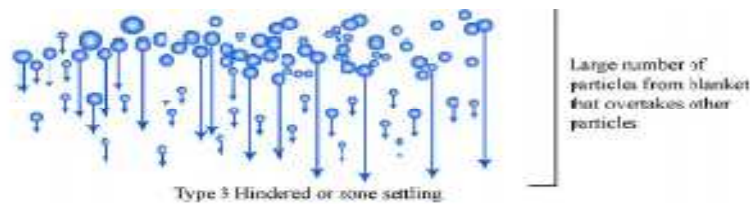
ته‌نشینی نوع دوم:

در این نوع، در حین ته‌نشینی، لخته‌بندی هم صورت می‌گیرد. در نتیجه سرعت در اعماق مختلف یکنواخت نبوده و هر چه پایین‌تر می‌رویم سرعت ته‌نشینی بیشتر می‌گردد، چون اندازه لخته‌ها بزرگتر می‌شود. این نوع وقتی اتفاق می‌افتد که غلظت نسبتاً کم باشد ولی ذرات در حالتی باشند که بتوانند لخته تشکیل دهند. نمونه این نوع ته‌نشینی در حوض‌های ته‌نشینی که مواد شیمیایی اضافه می‌کنیم کاربرد دارد (بیشتر در تصفیه‌خانه‌های آب به ویژه آبهای سطحی کاربرد دارد).



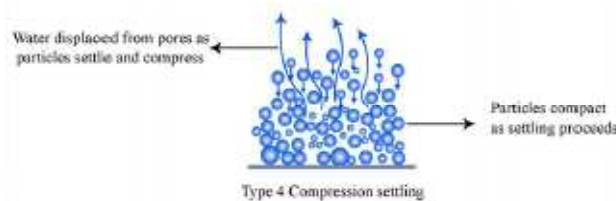
ته‌نشینی نوع سوم:

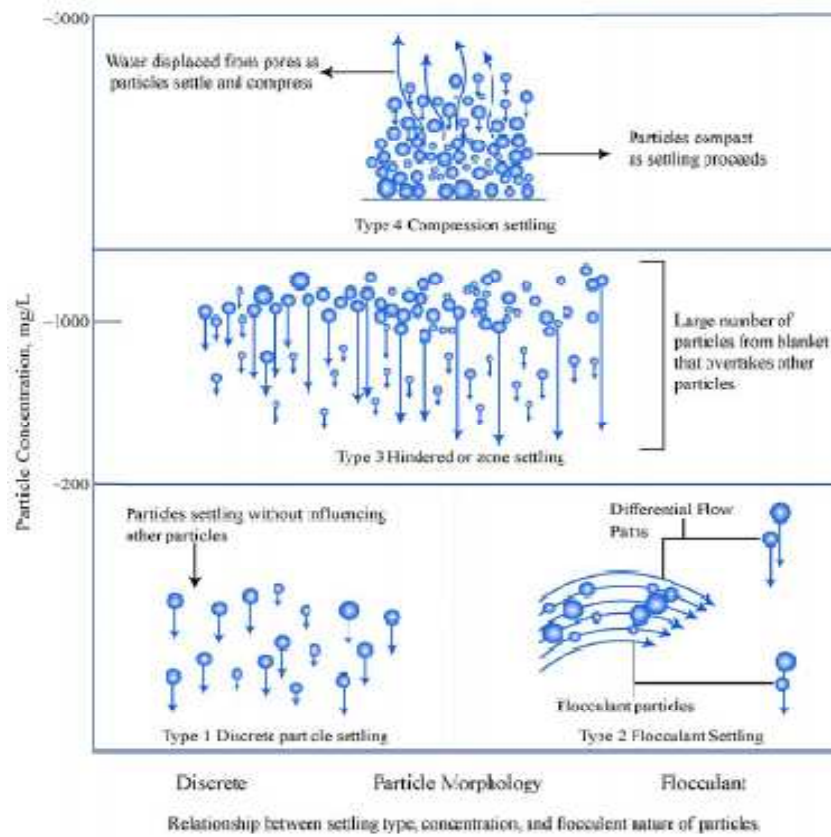
این نوع وقتی اتفاق می‌افتد که غلظت در حد متوسط و نسبتاً زیاد باشد، بطوریکه نیرویی که بین ذرات است مانع ته‌نشینی مستقل هر ذره شود و بجای اینکه ذرات به شکل تک تک و مستقل ته‌نشین شوند، توده‌ای از ذرات با هم ته‌نشین شود. این نوع ته‌نشینی اساس کار طراحی حوض ته‌نشینی ثانویه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است. البته در حوض ته‌نشینی تصفیه فاضلاب ممکن است هر ۴ نوع ته‌نشینی اتفاق بیفتد ولی نوع غالب آن این نوع است.



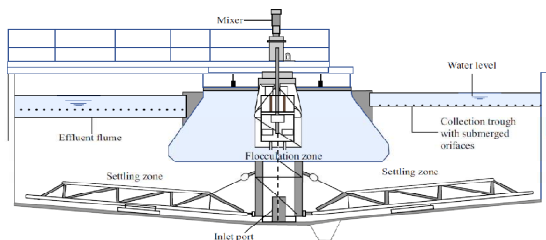
ته‌نشینی نوع چهارم:

ته‌نشینی که در اثر ارتفاع آب زلال جمع شده در بالای لجن در حوض ته‌نشینی صورت می‌گیرد.



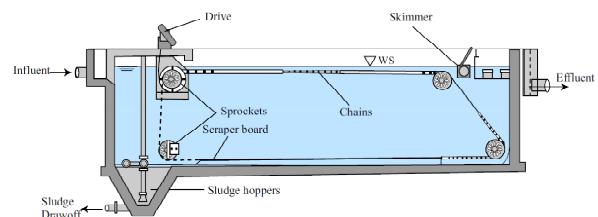


انواع حوضچه‌های ته‌نشینی



Flocculator-clarifier provides mixing, flocculation, & sedimentation in a compartmented concentric circular tank.

حوضچه ته‌نشینی دایره ای



حوضچه ته‌نشینی مستطیلی



۳- تصفیه شیمیایی آب: انعقاد و لخته‌سازی، اصول و تئوری‌های مربوطه، روابط و مبانی مربوط به طراحی واحدهای انعقاد و لخته‌سازی  
تقریباً تمام آبهای سطحی دارای کدورت قابل رویت هستند. در شرایط متعارف در مخازن ته‌نشینی حذف موثر ذرات با قطر کوچکتر از ۵۰ میکرومتر را نمی‌توان انتظار داشت. به هم چسبیدن ذرات، افزایش اندازه موثر در بعضی مواقع امکان‌پذیر است. ولی، ذرات در گستره اندازه کلوئیدی دارای خصوصیتی هستند که از بهم چسبیدن جلوگیری می‌کند. آگاهی از طبیعت سوسپانسیون‌های کلوئیدی برای این حذف لازم است.

سوسپانسیون‌های کلوئیدی که بطور طبیعی متراکم نمی‌گردند، پایدار نامیده می‌شوند. مهمترین عامل پایداری آنها، نسبت سطح به حجم بالای ناشی از اندازه کوچک آنها می‌باشد. پدیده سطح بر پدیده جرم غالب است. مهمترین پدیده سطح، تجمع بارهای الکتریکی در سطح ذره می‌باشد.

وقتی که دو کلوئید در مجاورت هم قرار می‌گیرند دو نیرو بر روی آنها عمل می‌کند. پتانسیل الکترواستاتیکی ایجاد شده به وسیله هاله (Halo)، یون‌های مخالف اطراف هر کلوئید ذرات را از هم دفع و بدین طریق از تماس آنها جلوگیری می‌کند. نیروی دوم، نیروی جذب موسوم به نیروی واندروالس (Vander Waals) که از تماس آنها حمایت می‌کند. این نیرو با توان ششم فاصله بین ذرات تناسب معکوس دارد و با فاصله به طور نمایی کاهش می‌یابد. این نیرو سریعتر از پتانسیل الکترواستاتیکی تحلیل می‌رود، ولی نیروی قویتری در فواصل نزدیک است.

### تئوری انعقاد

برای حذف مواد کلوئیدی آب و فاضلاب، از ترکیبات فلزاتی مانند آلومینیوم، آهن یا برخی از ترکیبات الکترولیت استفاده می‌شود. املاح فلزات که به عنوان منعقد کننده وارد آب می‌شود، در اثر هیدرولیز به صورت یونی یا هیدروکسید یا هیدروکسیدهای باردار درمی‌آید. بوجود آمدن این مولکول‌های باردار بزرگ با خنثی نمودن بار ذرات کلوئیدی و کاهش پتانسیل زتا (اختلاف پتانسیل بین فاز پخش شده و محیط اطراف آن) که عامل اصلی دافعه بین ذرات کلوئیدی می‌باشد، امکان لازم برای عمل نمودن نیروی واندروالسی که موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر می‌شود را فراهم می‌سازد. بنابراین، عامل اصلی حذف بار کلوئیدها، یونهای فلزی نیستند، بلکه محصولات حاصل از هیدرولیز آنها می‌باشد. با توجه به آزمایشات مختلف، یونهای فلزات سه ظرفیتی در عمل انعقاد، مؤثرتر از سایر یونها می‌باشند.

در تصفیه‌خانه‌های آب، انعقاد شیمیایی معمولاً با اضافه کردن نمک‌های فلزی سه ظرفیتی مانند سولفات آلومینیوم ( $Al_2(SO_4)_3$ ) یا کلرید فریک ( $FeCl_3$ ) انجام می‌شود. چهار مکانیسم انعقاد شامل: فشردگی لایه یونی،

جذب سطحی و خنثایی بار، محبوس شدن در جرم متراکم شده و جذب سطحی و پیوند پلی بین ذره‌ای می‌باشد.

در مکانیسم فشردگی لایه یونی، غلظت یونی زیاد اطراف کلئوئید، لایه‌های متشکل از یون‌های مختلف را به طرف سطح کلئوئید می‌فشارد. اگر این لایه به اندازه کافی فشرده شود، نیروی واندروالسی در کل مقطع تاثیر می‌گذارد و نیروی خالص جاذب بوده و هیچ مانع انرژی موجود نیست. اگر چه کواگولان‌هایی مانند نمک‌های آلومینیم و فریک مورد استفاده در تصفیه آب یونیزه می‌شوند، ولی در غلظت‌های معمولی، غلظت یونی را آنقدر زیاد نمی‌کنند که باعث فشردگی لایه یونی گردند.

در مکانیسم جذب سطحی و خنثایی بار، طبیعت منعقدکننده نه مقدار یون‌ها از اهمیت برخوردار است. یونیزه شدن سولفات آلومینیم و یا کلرید فریک در آب تولید آنیون‌ها و کاتیون‌ها می‌کند. یون‌های آب و فلزی که تشکیل می‌گردند، جزئی از ابر یونی اطراف کلئوئید می‌شوند و به دلیل اینکه نزدیکی زیادی به سطح دارند، در سطح کلئوئید یعنی جایی که بارهای سطحی را خنثی می‌کنند، جذب می‌شوند. بعد از خنثی شدن بار سطحی، ابر یونی تحلیل رفته و پتانسیل الکتروستاتیک ناپدید می‌شود و تماس در این موقع آزادانه صورت می‌گیرد. کاربرد بیش از حد کواگولان‌ها می‌تواند منجر به پایدار شدن مجدد سوسپانسیون شود.

مکانیسم انعقاد جارویی (Sweep): آخرین محصولی که در هیدرولیز آلوم تشکیل می‌شود، هیدروکسید آلومینیم  $(Al(OH)_3)$  است. این ترکیب در لخته‌های بی‌شکل و ژلاتینی، سنگین‌تر از آب تشکیل شده و ته‌نشین می‌گردد. کلئوئیدها ممکن است به هنگام تشکیل شدن فلوک در داخل آنها محبوس شوند و یا ممکن است به هنگام ته‌نشینی فلوک‌ها به وسیله سطوح چسبنده فلوک فشرده شوند. فرآیندی که به وسیله آن کلئوئیدها این گونه از تعلیق زدوده می‌شوند به نام کواگولاسیون جارویی مشهور است.

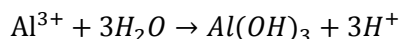
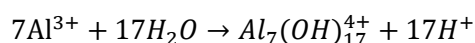
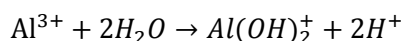
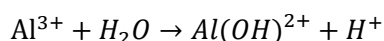
مکانیسم پلی‌زنی بین ذره‌ای: به هنگام تجزیه نمک‌های آلومینیم یا فریک ممکن است مولکول‌های بزرگی (مانند  $(Al_7(OH)_{17})^{4+}$ ) در آب تشکیل شوند. پلیمرهای مصنوعی ممکن است به جای، یا اضافه بر نمک‌های فلزی، استفاده شوند. این پلیمرها ممکن است خطی یا شاخه‌ای باشند و دارای سطح بسیار فعالی هستند. بدین ترتیب چند کلئوئید ممکن است به یک پلیمر چسبیده و چند گروه پلیمر- کلئوئید در دام بیفتند و باعث ایجاد توده ته‌نشین شونده شوند. علاوه بر نیروهای جذب سطحی، بار الکتریکی پلیمر نیز ممکن است به فرآیند کواگولاسیون کمک کند. پلیمرهای فلزی ایجاد شده در اثر اضافه کردن نمک‌های آلومینیم و فریک، دارای بار

مثبت هستند، در صورتیکه پلیمرهای مصنوعی ممکن است دارای بار مثبت یا منفی بوده یا خنثی باشند. انتخاب صحیح بارهای مناسب، اثر زیادی در بهبود کواگولاسیون دارد.

عمل انعقاد، عبارت از تجمع ذرات به منظور قابل ته‌نشینی کردن آنها تحت نیروی ثقل است. مطابق با تئوری پری‌کنتیک، وقتی ماده منعقد کننده اضافه شود، این ماده دارای بار الکتریکی است که بار الکتریکی ذرات را خنثی می‌کند. بنابراین، قوه جاذبه ذرات بیشتر شده و ذرات راحت‌تر به هم چسبیده و می‌توانند ته‌نشین گردند. اساس این کار کاهش بار سطحی ذرات است. پلی‌الکترولیت‌های باردار آنیونی و کاتیونی به عنوان منعقد کننده عمل نموده و از نظر تئوری در دسته پری‌کنتیک به حساب می‌آیند.

تئوری ارتوکنتیک، بیشتر در مورد مواد کمک منعقد کننده صادق است. وقتی یک فلوک تشکیل شده باشد، فلوک موقع ته‌نشینی به ذرات دیگر که سر راه آن قرار دارند برخورد کرده، درشت‌تر شده و ته‌نشین می‌شوند. در این تئوری، اساس کار اندازه ذرات و فلوک‌ها می‌باشد. مانند کمک منعقد کننده پلی‌الکترولیت‌های غیر یونی که دارای مولکول‌های طویل و بزرگ بوده و در حین ته‌نشینی امکان گیرکردن ذرات فلوک در آنها بیشتر بوده و سنگین‌تر شده و ته‌نشین می‌گردند.

کواگولاسیون نمک‌های فلزی علاوه بر انواع کواگولان، یون‌های هیدروژن نیز آزاد می‌کند. این یون‌های هیدروژن قلیائیت را خنثی می‌کنند. هیدروژن منتج از اضافه کردن هر میلی‌گرم بر لیتر آلوم، ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر قلیائیت آب را خنثی می‌سازد.



اگر قلیائیت اولیه آب کم باشد، کاهش بیشتر باعث از بین رفتن ظرفیت بافری آب شده و pH به سرعت پایین می‌آید. از آنجایی که برای بهترین کواگولاسیون بایستی مناسب‌ترین رقم pH حفظ شود و از آنجایی که برای تشکیل لخته هیدروکسید قلیائیت لازم است، به آب‌های با قلیائیت کم باید به طور مصنوعی بافر زده شود. این کار معمولاً با اضافه کردن آهک (Ca(OH)<sub>2</sub>) و یا کربنات سدیم (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) صورت می‌گیرد.

در رابطه با کواگولاسیون، آب‌های سطحی را می‌توان به چهار گروه به شرح زیر تقسیم نمود:

گروه ۱: کدورت زیاد- قلیائیت کم: این نوع آب با مقدار نسبتاً کم کواگولان، به سادگی بوسیله مکانیسم جذب سطحی و خنثایی بار بایستی لخته شود. پایین‌تر رفتن pH این روش را موثرتر می‌کند، چون یون‌های آب و فلزی در pH پایین‌تر موثرترند.

گروه ۲: کدورت زیاد- قلیائیت زیاد: به دلیل قلیائیت زیاد، جذب سطحی و خنثایی بار، کم تاثیرتر از آبهای کم قلیایی است. مقدار زیادتری کواگولان باید برای اطمینان از کواگولاسیون جارویی استفاده شود.

گروه ۳: کدورت کم- قلیائیت زیاد: تعداد کم کلوئیدها کواگولاسیون را مشکل می‌کند، حتی اگر بار ذره خنثی شده باشد. مکانیسم اصلی، کواگولاسیون جارویی با مقدار مناسب کواگولان است. اضافه کردن مقداری کدورت ممکن است مقدار کواگولان مورد نیاز را کاهش دهد.

گروه ۴: کدورت کم- قلیائیت کم: تعداد کم کلوئیدها کواگولاسیون را مشکل کرده و قلیائیت کم از تشکیل موثر  $Al(OH)_3$  جلوگیری می‌کند. برای تبدیل این گروه، به گروه ۱ از کدورت اضافی و برای تبدیل به گروه ۳ از قلیائیت اضافی می‌توان استفاده کرد. ممکن است اضافه کردن هر دوی قلیائیت و کدورت مفید باشد.

#### فرآیند انعقاد و لخته‌سازی در تصفیه آب و فاضلاب

بطور کلی عملیات انعقاد مشتمل بر افزودن و اختلاط سریع یک ماده منعقد کننده، خنثی‌سازی بار جامدات کلوئیدی و معلق ریز و تجمع اولیه ذرات خنثی شده و فرآیند لخته‌سازی عبارت از اختلاط آهسته یا اغتشاش ملایم برای نزدیک کردن و تجمع ذرات خنثی شده و تشکیل فلوک با سرعت ته نشینی زیاد می‌باشد. وجود ناخالصی‌های معلق و کلوئیدی در آب که باعث ایجاد رنگ و بو و طعم نامطبوع آب می‌شوند، لزوم تصفیه آب را مطرح می‌کند. این ناخالصیها به کمک صاف کردن قابل رفع نبوده و لزوم عملیات انعقاد و لخته‌سازی را ضروری می‌سازد.

زال‌سازی، شامل فرآیندهای انعقاد، لخته‌سازی و ته‌نشینی است. در عمل انعقاد، با اضافه نمودن ماده شیمیایی به آب، ذرات را آماده چسبیدن به یکدیگر و تشکیل ذرات درشت تر می‌کنند که می‌تواند به دلیل خنثی شدن بارهای الکتریکی باشد. بی بار شدن ذرات ریز سبب حذف نیروی دافعه بین ذرات می‌شود. لازم به ذکر است فرآیند انعقاد می‌تواند کدورت ناشی از حضور مواد آلی و معدنی، انواع میکروارگانیسمها، رنگ و فسفات را کاهش و یا حذف نماید. در گام بعد و در مرحله لخته‌سازی، مواد منعقد شده از طریق اختلاط آرام به یکدیگر نزدیک شده و ذرات بزرگتری را به وجود می‌آورند که به سهولت قابل ته‌نشینی می‌باشند. عملیات لخته‌سازی بسیار

حساس بوده و باید رعایت شود تا لخته‌های بوجود آمده از هم پاشیده نشوند. در طی عملیات ته‌نشینی، ذرات منعقد و لخته شده دارای شرایط مناسبی جهت رسوب کردن می‌شوند و آب زلال شده بدست می‌آید. مواد و تجهیزات مورد استفاده در فرآیند زلال‌سازی باید به شیوه مناسبی به کار گرفته شود تا این عمل کارایی خوبی داشته باشد. موفقیت در این فرآیند به موارد زیر بستگی دارد:

- مقدار صحیح مواد شیمیایی مورد استفاده (مواد منعقد کننده، مواد تنظیم کننده pH و گاهی کمک منعقدکننده)
- نقطه مناسب تزریق در سیستم
- میزان سرعت عملیات اختلاط

#### اختلاط سریع:

برای کواگولاسیون یکسان، اختلاط کامل لازم است. در نتیجه باید به طرح واحدهای اختلاط سریع توجه کافی مبذول داشت. پارامترهای طراحی واحدهای اختلاط سریع، زمان اختلاط  $t$  و گرادیان سرعت  $G$  می‌باشد. گرادیان سرعت، معیاری از سرعت نسبی دو ذره سیال و فاصله بین آنهاست. به عنوان مثال، برای دو ذره با سرعت نسبی  $1\text{m/s}$  و فاصله  $0.1\text{m}$  گرادیان سرعت برابر  $10\text{ S}^{-1}$  خواهد بود.

تانک‌های اختلاط در ارقام  $G$  بین  $700$  تا  $1000$  و با زمان ماند تقریبی  $2$  دقیقه به بهترین وجه عمل می‌کنند. در حوض اختلاط دو عامل کنترل کننده گرادیان سرعت و زمان ماند داریم. حاصلضرب این دو عامل معمولاً معیار طراحی حوض اختلاط در نظر گرفته می‌شود. زمان ماند متداول بین  $20$  تا  $60$  ثانیه است. حوض اختلاط یا به شکل دایره و یا به شکل مربع احداث می‌گردد. همزن‌های این حوض یا به شکل پارویی یا پروانه‌ای و یا توربینی هستند.

درجه انعقاد به عوامل خصوصیات فلوک، گرادیان سرعت و مقدار  $GT$  زیر بستگی دارد. اگر گرادیان سرعت خیلی زیاد باشد، نیروهای برشی مانع تشکیل فلوک‌های بزرگ شده و اگر گرادیان سرعت کافی نباشد برخورد مناسب بین ذرات صورت نمی‌گیرد و فلوک مناسب تشکیل نمی‌شود.

## لخته‌سازی

با تشکیل لخته‌های ریز، در گام بعد و از طریق اختلاط آرام، احتمال برخورد میان لخته‌های ریز افزایش یافته و به این طریق ذرات درشت‌تری ایجاد می‌شود که به این فرآیند، لخته‌سازی گفته می‌شود. عملیات اختلاط توسط پاروهای با سرعت کم صورت می‌گیرد. در برخی مواقع نصب تیغه‌ها و صفحات ثابت بین پاروها که سبب قطع گردش مایع می‌شود، عملیات هم زدن را انجام می‌دهند. عملیات اختلاط نباید به گونه‌ای باشد که تلاطم ایجاد شده به اندازه‌ای باشد که انرژی سینتیک ذرات معلق زیاد شده و در اثر برخورد با یکدیگر متلاشی شوند و به ذرات کوچکتر تبدیل گردند.

فرآیند فلوکولاسیون برای بهبود برخورد بین ذرات به تلاطم تکیه دارد. گرادیان‌های سرعت نیز روش مناسبی برای اندازه‌گیری این تلاطم هستند. زمان، فاکتور مهمی است و پارامتر طراحی برای فلوکولاسیون عدد بدون بعد  $Gt$  است. ارقام  $Gt$  متداول بین  $10^4$  تا  $10^5$  بوده و زمان  $t$  گستره‌ای از ۱۰ تا ۳۰ دقیقه را دارد. مقادیر زیاد  $G$  با زمان‌های کوتاه به تولید لخته‌های کوچک و فشرده تمایل دارد، در صورتیکه ارقام کم  $G$  و زمان‌های طولانی، لخته‌های سبک‌تر و بزرگتر تولید می‌کند. چون لخته‌های بزرگ و فشرده در حوض‌های ته‌نشینی ساده‌تر حذف می‌گردند، ممکن است تغییر مقدار  $G$  در طول حوض فلوکولاسیون سودمند باشد. در لخته‌سازی، میکروفلوک‌ها باید به هم بچسبند و برای این کار باید آب آرام بچرخد. همزن‌های مکانیکی از همزن پنوماتیک متداول‌تر هستند. همزن‌های مکانیکی بکار گرفته شده نیز معمولاً از نوع پارویی بوده، هرچند از نوع توربینی و پروانه‌ای نیز می‌توان استفاده نمود. غالباً حوض‌های لخته‌سازی بصورت پله‌ای طراحی می‌گردند (کاهش یا بند Tapered). در این سیستم  $G$  به تدریج در طول حوض کاهش می‌یابد. این عمل باعث می‌گردد در ابتدا لخته‌های کوچک و کم وزن بوجود آید و با کاهش تدریجی  $G$  لخته‌های کوچک به هم چسبیده و فلوک‌های بزرگ ایجاد گردد که به راحتی بتوانند در حوض ته‌نشینی شوند. توانی که توسط این همزن‌ها در فلوکولاسیون به آب داده می‌شود به شرح زیر است:

$$P = F_D \cdot V_P$$

$P$ : توان یا انرژی ورودی وات (N.m/s)

$V_P$ : سرعت پارو (m/s). سرعت پره باید کمتر از 1m/s بوده و حداقل فاصله بین سر پره و دیگر ساختارها در فلوکولاتور باید ۰/۳ باشد تا از بوجود آمدن محل‌های با گرادیان سرعت بیش از حد جلوگیری شود.

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{V_P^2}{2} \quad (N) \quad \text{نیروی دراگ - نیروی بازدارنده روی پره‌ها}$$



CD: ضریب دراگ که به خصوصیات پارو بستگی دارد. برای تیغه مسطح ۱/۸ گرفته می‌شود

A: مساحت پارو یا تیغه‌های پره (m<sup>2</sup>). مساحت تیغه‌ها مربوط به مساحت کل تخته‌هایی است که عمود بر سیلندر در حال گردش هستند. این مساحت نباید از ۴۰ درصد کل مساحت احاطه شد به وسیله پره بیشتر باشد.

ρ: دانسیته آب (kg/m<sup>3</sup>)

$$P G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \rightarrow$$

G=Sec<sup>-1</sup>

وات  $P = \frac{N \cdot m}{s}$

V=m<sup>3</sup>

$\mu = \frac{N \cdot S}{m^2}$

#### عوامل مؤثر در انعقاد

pH و قلیائیت: به علت حذف H<sup>+</sup> از محیط، برای ایجاد هیدروکسیدهای فلزی باید pH قلیایی باشد. برای تنظیم pH، اغلب از آب آهک استفاده می‌شود، ولی نباید در حدی باشد که باعث افزایش بی‌رویه سختی آب بشود.

مقدار ذرات معلق: هرچه ذرات معلق بیشتر باشد، مصرف منعقدکننده‌ها هم بالایی‌تر رود.

اثر عوامل فیزیکی: با کاهش دما و نزدیک شدن به صفر، مشکلات جدی در امر انعقاد بوجود می‌آید و لخته شدن کاهش می‌یابد. به همین دلیل، مقدار مصرف منعقدکننده‌ها در تصفیه‌خانه‌ها در زمستان بیشتر از تابستان است.

مواد منعقدکننده: قدرت انعقاد بالا، انعقادکنندگی در گستره pH وسیع و همچنین مناسب بودن قیمت از خواص یک منعقدکننده خوب می‌باشد.

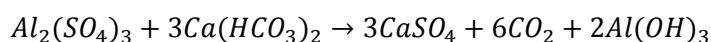
#### منعقد کننده‌های مهم

مواد منعقد کننده باید شرایط زیر را داشته باشند:

- از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشند.
- در مواردی که آب به مصرف شرب می‌رسد، ایجاد مسمومیت ننمایند.
- در مواردی که آب به مصرف صنعت می‌رسد، ایجاد املاح ناخواسته ننمایند.

#### منعقدکننده‌های آلومینیوم‌دار:

سولفات آلومینیوم ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ ): نام تجاری‌اش آلوم یا زاج سفید می‌باشد. با بی‌کربنات کلسیم و آب واکنش داده و هیدروکسید آلومینیوم ایجاد می‌کند. در صورت ناکافی بودن قلیائیت محیط برای ایجاد هیدروکسید آلومینیوم، از آب آهک و کربنات سدیم استفاده می‌شود. چون  $H^+$  مانع تشکیل هیدروکسید آلومینیوم می‌شود. عیب مهم استفاده از زاج، ایجاد سختی کلسیم و  $CO_2$  (عامل خوردگی) می‌باشد. سولفات آلومینیوم به عنوان متداول‌ترین کواگولان مورد استفاده در تصفیه آب، بین گستره pH برابر ۵ تا ۷/۵ بیشترین اثر را دارد.



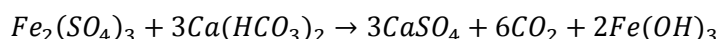
رسوب این ماده در pH قلیایی بهتر صورت می‌گیرد. در آب معمولاً بی‌کربنات وجود دارد و سختی آب مقداری افزایش می‌یابد. مقدار مورد استفاده آلوم بسته به طبیعت آب، ممکن است بین ۵ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد. در کدورت کم و مقدار مورد استفاده زیاد، به احتمال زیاد  $Al(OH)_3$  تشکیل شده و مکانیسم حذف کدورت، کواگولاسیون جارویی باشد. در کدورت زیاد و مقدار مورد استفاده کمتر، اگرچه پیوند بین ذره‌ای احتمالاً نقش زیادی بازی می‌کند، ولی مکانیسم حاکم، جذب سطحی و خنثایی بار هستند. فشردگی لایه یونی در این غلظت قابل ملاحظه نیست. سیلیس اکتیو به عنوان یک کمک منعقدکننده همراه آلوم بکار می‌رود.

آلومینات سدیم ( $Na_3AlO_3$ ): اینترکیب هم در اثر واکنش با بی‌کربنات کلسیم، ایجاد هیدروکسید آلومینیوم می‌کند. به علت خاصیت قلیایی، احتیاج به مصرف باز اضافی ندارد.

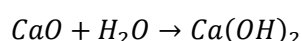
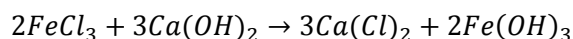
#### منعقدکننده‌های آهن‌دار:

سولفات فرو ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ): با ایجاد هیدروکسید آهن III، باعث انعقاد ذرات کلوئیدی می‌شود. همراه آهک هیدراته استفاده می‌شود.

سولفات فریک: می‌تواند همراه یا بدون آهک هیدراته مصرف شود و از لحاظ اقتصادی با صرفه‌تر از زاج است. مزیتش نسبت به زاج این است که در میدان وسیعی از pH عمل می‌کند. زمان لازم برای تشکیل لخته‌ها کم‌تر است و لخته‌ها درشت‌تر و وزین‌تر هستند. با استفاده از سولفات فریک در pH حدود ۹، منگنز موجود در آب حذف می‌شود و باعث از بین رفتن طعم و بوهای خاص آب می‌شود. سولفات آهن در pH بالای ۹/۵ موثرتر است.



کلرور فریک ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ): از پرمصرف‌ترین منعقدکننده‌هاست و به صورت پودر، مایع یا متبلور به فروش می‌رسد. در اثر واکنش با بی‌کربنات کلسیم یا هیدروکسید کلسیم، ایجاد هیدروکسید آهن III می‌کند که مرکزی برای تجمع مواد کلوئیدی به شمار می‌رود. کلرید فریک تا pH معادل ۴/۵ موثر است. این کواگولان اگرچه از آلوم ارزانتر هستند، ولی در صورت حذف نشدن کامل رسوب، می‌توانند مشکلات رنگ ایجاد کنند. این ماده معمولاً با آهک بکار می‌رود.



#### کمک منعقد کننده‌ها

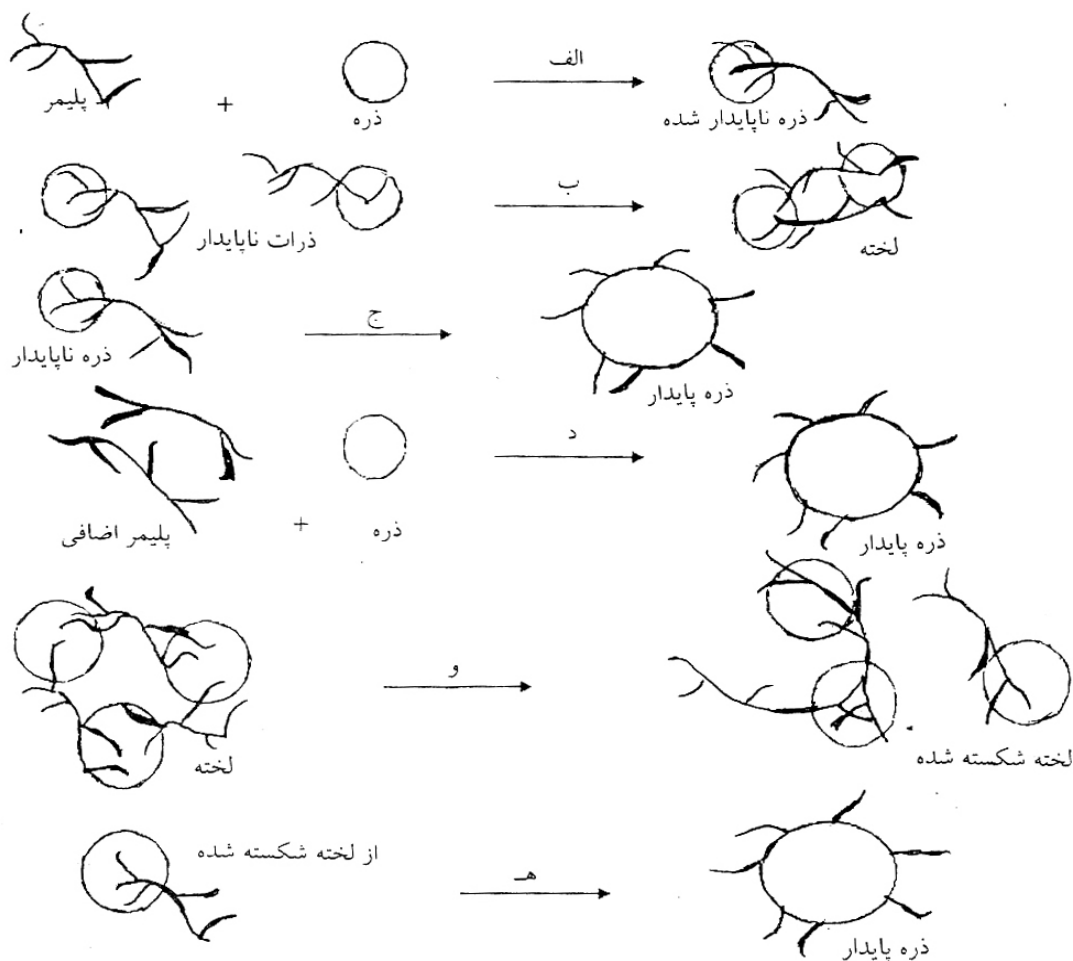
کمک منعقدکننده‌ها با ایجاد پل بین ذرات ریز لخته حاصل از کار منعقد کننده‌ها، آنها را به صورت لخته‌های درشت و سنگین در آورده، عمل ته‌نشینی را سرعت می‌بخشند. همچنین محدوده pH بهینه را گسترش داده، مقدار مصرف ماده منعقد کننده را کاهش می‌دهند. چند نمونه از کمک منعقدکننده‌های مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌ها به شرح زیر می‌باشد:

کربنات سدیم: با تثبیت pH آب و افزایش یونهای  $\text{OH}^-$ ، عمل انعقاد را بهبود می‌بخشد، مخصوصاً اگر منعقد کننده مورد مصرف زاج باشد.

آهک هیدراته: برای جبران کمبود قلیائیت محیط و از بین بردن  $\text{CO}_2$  و کاهش سختی آب استفاده می‌شود.

گاز کلر: برای از بین بردن مواد آلی موجود در آب که عامل ممانعت کننده در انعقاد هستند.

پلی‌الکترولیتها: دارای خواص پلیمر و الکترولیتی بوده، می‌توانند اندازه لخته‌ها را درشت‌تر نمایند. از دیگر موارد مورد استفاده، سیلیس فعال یا سدیم سیلیکات و بنتونیت می‌باشد.



رفتار منعقدکننده‌های پلیمری در شرایط مختلف

### آزمایش جار (Jar) برای مناسب‌ترین مقدار کواگولان

بطور کلی عوامل مختلفی همچون: چگونگی عملیات انعقاد و لخته‌سازی (سرعت و زمان اختلاط)، pH آب، قلیائیت، کدورت، TDS آب و درجه حرارت در کارایی یک منعقدکننده تأثیرگذار می‌باشند. به علاوه سایر پارامترهای محیطی و کیفی نیز بر عملیات تأثیرگذارند که سبب اختلاف در دوز بهینه ماده منعقدکننده برای هر آب می‌شود. از این رو انتخاب منعقد کننده مناسب و تعیین دوز بهینه آن از طریق کمی و فرمولاسیون قابل محاسبه نبوده و از طریق تجربی و با آزمایش جار تعیین می‌گردد.

در مورد هر منعقد کننده pH خیلی مهم است. جارتست به عنوان یک پایلوت کار هر سه حوضچه اختلاط سریع، انعقاد و ته‌نشینی را انجام می‌دهد. برای تعیین میزان ماده منعقدکننده لازم و همچنین pH بهینه برای عمل

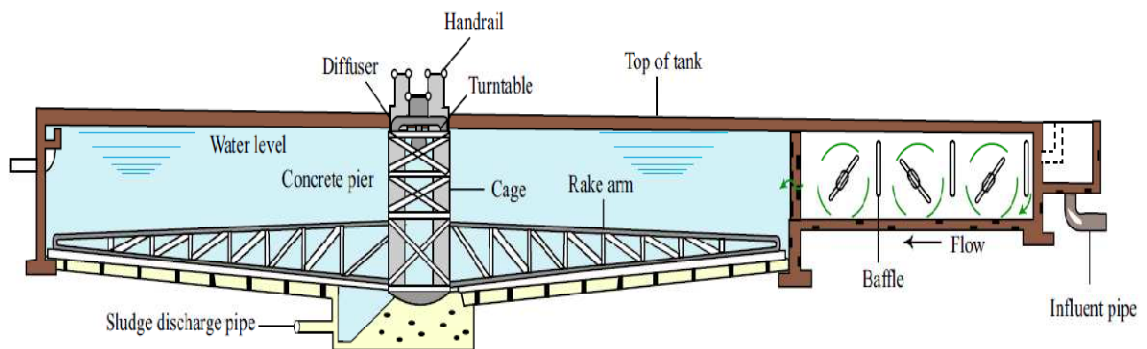
انعقاد، از آزمایش جار استفاده می‌شود. آزمایش جار، با استفاده از یکسری ظروف شیشه‌ای هم شکل و هم اندازه که ظرفیت حداقل ۱ لیتر را دارند انجام می‌شود. در حالت عادی، شش جار همراه با همزن‌هایی که با قدرت یکسان محتویات هر جار را بطور همزمان به هم می‌زنند، استفاده می‌شود. هر کدام از این ۶ جار به میزان یک لیتر با آبی که کدورت، pH و قلیائیت آن قبلاً تعیین شده، پر می‌شود. یک جار به عنوان کنترل استفاده می‌شود و به ۵ جار باقی‌مانده مقادیر مختلف کواگولانت در pHهای مختلف اضافه می‌شود، تا زمانی که حداقل میزان کدورت باقیمانده به دست آید. بعد از اضافه کردن مواد شیمیایی، آب به مدت یک دقیقه برای اطمینان از پخش کامل مواد شیمیایی، سریعاً مخلوط می‌گردد. سپس برای ۱۵ تا ۲۰ دقیقه برای تشکیل لخته‌ها عمل اختلاط به آرامی ادامه می‌یابد. سپس به مدت ۳۰ دقیقه جهت ته‌نشینی تا زلال شدن به حال خود گذاشته می‌شود. سپس از آب نمونه‌برداری شده و آزمایش کدورت بر روی آن انجام می‌شود. از نتایج آزمایش، برای محاسبه نوع و مقدار کواگولانت لازم در تصفیه‌خانه آب استفاده می‌گردد. آزمایش‌های جار همچنین در روشن ساختن مکانیسم کواگولاسیون نیز به کار گرفته می‌شود. برای تعیین pH بهینه به هر ۶ بشر دستگاه جارتست از نمونه مورد نظر بطور مساوی ریخته، pH را به ترتیب ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ در نظر می‌گیریم. به هر بشر به مقدار مساوی از منعقدکننده و کمک منعقدکننده مورد نظر ریخته می‌شود و در دمای معین به مدت ۲۰ دقیقه بشرها هم زده می‌شود. بعد از این مدت، آب هر یک را به استوانه‌های مدرج انتقال داده، منتظر ته‌نشین شدن آنها می‌مانیم. بهترین جواب، بیشترین رسوب تشکیل شده و زلال‌ترین محلول رویی می‌باشد. با این ترتیب گستره pH بهینه معلوم می‌شود.

اهداف جارتست عبارتند از:

- تعیین نوع ماده منعقد کننده
- تعیین مقدار ماده منعقد کننده
- تعیین وضعیت ته‌نشینی
- تعیین زمان ته‌نشینی
- تعیین ضرورت فیلتراسیون



دستگاه جارتست



Flocculator & square sedimentation tank for water clarification, illustrating co-cross-flow operation.

### استخرهای ته‌نشینی مرکب

در ظرفیت‌های زیاد، معمولاً سه عمل انعقاد و لخته‌سازی و ته‌نشینی با هم در یک حوض انجام می‌گیرد. برای این کار از استخرهای ویژه‌ای استفاده می‌شود که انواع آن و طرز کارشان متفاوت است. در این حوض‌ها از تماس مجدد لجن برای افزایش قدرت ته‌نشینی مواد معلق موجود در آب استفاده می‌شود. در این گونه استخرها معمولاً جریان در منطقه ته‌نشینی از پایین به بالا رخ می‌دهد. در چنین جریانی ابتدا مواد معلق لخته شده همراه جریان آب به سمت بالا حرکت کرده و سپس به علت کاهش سرعت حرکت آب به نقطه‌ای می‌رسند که سرعت ته‌نشینی برابر سرعت حرکت آب گشته و در نتیجه ذره از حرکت باز می‌ایستد و بعد در جهت معکوس یعنی به سمت کف استخر شروع به ته‌نشینی می‌کند. مدت زمان توقف آب در این حوض‌ها ۱ تا ۳ ساعت است. در صورتیکه استفاده از مواد شیمیایی برای کاهش سختی آب باشد، یک ساعت توقف کافی است. بار سطحی در این استخرها  $\frac{2}{3}$  تا  $\frac{4}{2}$  متر در ساعت می‌باشد. حداکثر دبی سرریزهای خروجی در این استخرها، زمانی که هدف انعقاد باشد برابر با ۱۷۵ متر مکعب در شبانه روز برای هر متر طولی بوده و زمانی که هدف کاهش سختی باشد این مقدار تا ۳۵۰ متر مکعب در شبانه روز در هر متر طولی سرریز می‌تواند باشد.

در انواع زلال‌سازهای با روش برخورد لجن، عمل اختلاط، انعقاد و ته‌نشینی در زلال‌ساز انجام می‌گیرد. در زلال‌سازهای با تماس لجن، آب ورودی بعد از اختلاط با مواد شیمیایی به منظور سرعت بخشیدن به تشکیل لخته‌ها، در تماس با لجن‌هایی که قبلاً از تصفیه آب به‌دست آمده‌اند و در زلال‌ساز موجودند، قرار می‌گیرد. این نوع زلال‌سازها به نام‌های مختلفی وجود دارند. دو نوع معروف این استخرها، استخرهای ته‌نشینی اکسیلاتور و پولساتور می‌باشد. مزایا و معایب این زلال‌سازها به شرح زیر می‌باشند.

#### معایب:

- طراحی و اجرای ساختمان این نوع زلال‌ساز پیچیده است.
- بهره‌برداری از آن‌ها نسبتاً مشکل بوده و نیاز به تخصص خاص دارد.
- با تغییرات مداوم شرایط آب خام در هنگام بهره‌برداری، این نوع زلال‌سازها نیاز به مراقبت خاص دارند.

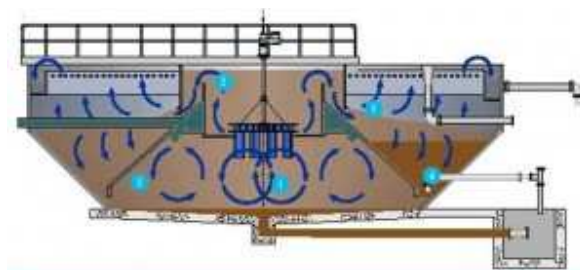
#### مزایا:

- تجربه بهره‌برداری از آن در ایران وجود دارد.
- در مقابل تغییرات دبی، مواد معلق و درجه حرارت، قابلیت انعطاف نسبتاً خوبی دارد.
- جمع‌آوری و تخلیه لجن در زلال‌سازهای با لجن‌روب ساده‌تر است.

### سیستم اکسیلاتور (Accelerator)

در این گونه کلاریفایرها، آب ورودی بعد از اختلاط با مواد شیمیایی، به منظور سرعت بخشیدن به پدیده انعقاد (Coagulation) و سرعت بخشیدن به تشکیل لخته‌ها، در تماس با لجن‌هایی قرار می‌گیرند که قبلاً از تصفیه آب به‌دست آمده‌اند و در حوض ته‌نشینی موجودند. لجن ته‌نشین شده در این حوض‌ها به‌طور مکانیکی یا هیدرولیکی از ناحیه ته‌نشینی به ناحیه اختلاط راه‌یافته و به تشکیل لخته‌ها کمک می‌کنند. این حوضچه‌ها که با نام تجاری اکسیلاتور در تصفیه‌خانه‌های کشور مورد استفاده قرار گرفته است، دارای زمان ته‌نشینی حداقل ۱ ساعت برای سختی‌گیری آب و حداقل ۱/۵ تا ۲ ساعت برای تصفیه معمولی آب می‌باشد.

قسمت اختلاط و لخته‌سازی در این حوضچه‌ها به‌وسیله ناحیه ته‌نشینی احاطه شده است، ولی نواحی سه‌گانه از قسمت بالا و پایین حوض به هم مرتبط هستند. قسمتی از لجن‌های ته‌نشین شده در اثر چرخش آب که ناشی از حرکت به‌هم‌زن می‌باشد، به ناحیه اختلاط و سپس به ناحیه انعقاد راه‌یافته و در فعل و انفعال فلوکولاسیون شرکت می‌نماید. غلظت لجن در گردش حوض، به حدود ۵ گرم در لیتر می‌رسد و غلظت لجن خروجی از نظر مواد جامد، حدود ۱ تا ۲٪ می‌باشد. قطر قسمت اختلاط ثانویه در این حوض‌ها، ۱۵ تا ۲۰٪ قطر اصلی حوض و سطح آن بین ۴ تا ۵٪ سطح کلی می‌باشد. کارکرد این‌گونه حوض‌های ته‌نشینی برای آب‌های قلیایی کم و کدورت پایین، خوب گزارش نشده است. اگر غلظت مواد معلق آب خام از حدود معینی تجاوز کند، حوض ته‌نشینی قادر به جداساختن این مواد از آب نخواهد بود. در طراحی این واحد برای کارکرد بهتر، سعی می‌شود بار سطحی از حدود ۵۰ مترمکعب در مترمربع در روز تجاوز نکند.

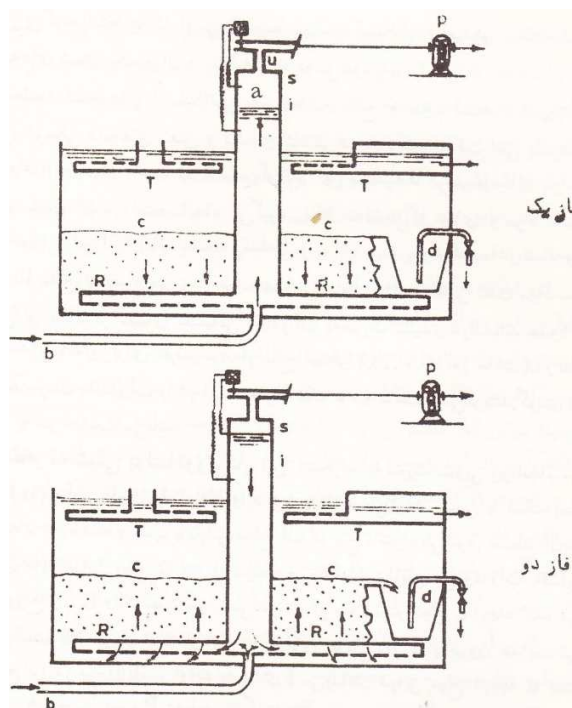


زالال‌ساز اکسیلاتور



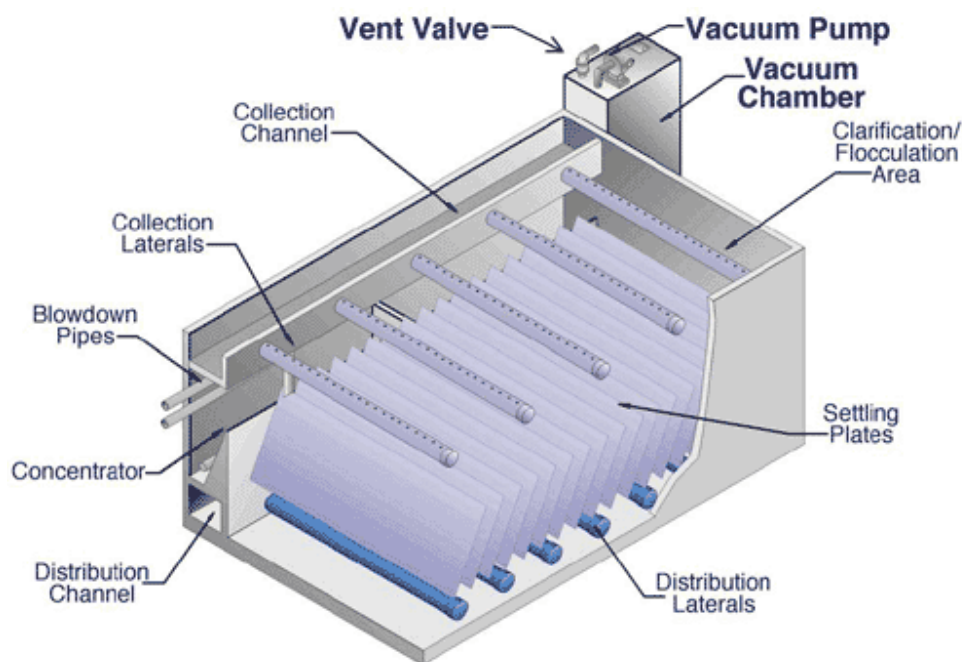
### سیستم پولساتور (Pulsator)

در زلال‌سازهای ضربانی که نمونه‌های آن در تهران، کرمانشاه و بندرعباس مورد استفاده قرار گرفته است، آب مخلوط شده با مواد منعقدکننده از زیر بستر لجن و از طریق لوله‌های مشبکی وارد حوض می‌شود که در سرتاسر حوض تعبیه شده‌اند. بر روی روزنه‌ها نیز پالونک‌هایی جهت کنترل سرعت آب قرار می‌گیرند. جهت کنترل میزان لجن نیز، هوپرهایی در قسمت بستر وجود دارد که در صورت زیاد شدن حجم لجن، لجن به داخل هوپر سرریز می‌کند و خارج می‌شود. آب زلال‌شده نیز در قسمت سطحی این واحد توسط کانال‌های مشبک جمع‌آوری می‌گردد. پمپ خلاء موجود در این نوع زلال‌سازها نیز با عمل خلاء و رفع خلاء خود سبب نوسانات بستر لجن گشته و سبب سهولت در امر حرکت آب از بین بستر خواهد شد. مدت زمان فاز یک که مربوط به ایجا خلاء می‌باشد، حدود ۲۰ تا ۴۰ ثانیه طول می‌کشد که طی آن مواد معلق فرصت پیدا می‌کنند در بستر لجن ته نشین شوند. مدت زمان فاز دو که رفع خلاء صورت می‌گیرد، ۵۰ تا ۱۰ ثانیه است. برای اینکه سرعت جریان آب در فاز دو به کف استخر محدود شده و باعث به هم زدن بستر لجن نشود، اختلاف سطح آب در برج در یک دوره تناوب ۱/۵ تا ۱/۶ متر گرفته می‌شود. بار سطحی پولساتور حدود ۷۵ تا ۱۰۰ متر مکعب آب در شبانه روز برای هر متر مربع سطح حوض (۳/۱۲۵ تا ۴/۱۷ متر در ساعت) گرفته می‌شود.



شمای یک پولساتور

در زیر شکل زیر یک سوپر پولساتور نشان داده شده است. در این زلال‌سازها برای افزایش بازده ته‌نشینی از صفحات مورب پلاستیکی و یا فلزی استفاده می‌شود. این صفحات با زاویه حدود ۶۰ درجه نسبت به افق با فواصل ۲ تا ۱۰ سانتی‌متر از همدیگر در استخر و به فاصله ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر زیر سطح آب کار گذاشته می‌شوند. فاصله کف استخر تا این صفحات باید حداقل ۱/۲ متر باشد. ذرات معلق در آب، نخست روی این صفحات ته‌نشین شده و پس از تشکیل لخته، روی صفحات سر خورده و با سرعتی بیشتر از سرعت سقوط خود ذرات به کف استخر می‌رسند. به دلیل تسریع در عمل ته‌نشینی، بار سطحی این حوضچه‌ها به ۲/۵ تا ۵ متر در ساعت افزایش یافته و زمان ماند به ۱ تا ۳ ساعت کاهش یافته و بار سرریزها تا نزدیک به دو برابر می‌رسد.



#### ۴- سختی زدایی: ته‌نشین‌سازی عوامل سختی به کمک مواد شیمیایی، سختی‌زدایی با روش تبادل یونی

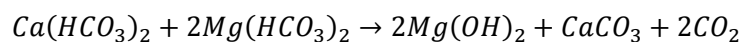
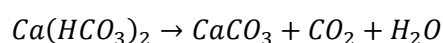
مقادیر مواد محلول آنها متفاوت است. کاتیون‌های فلزی دو ظرفیتی محلول عامل سختی آب‌ها می‌باشند. دو کاتیون کلسیم و منیزیم عامل اصلی سختی آب می‌باشند، اگرچه استرانسیوم، آلومینیوم، باریم، آهن، منگنز و روی نیز در ایجاد سختی آب شرکت می‌کنند، ولی معمولاً به مقدار کافی در آب وجود ندارند تا اثر آنها در سختی قابل ملاحظه باشد. مقدار سختی آب‌ها بر حسب نوع تشکیلات زمین و طول زمان تماس با این تشکیلات متفاوت است. آب ضمن عبور از زمین‌های آهکی، کلسیم و ضمن عبور از لایه‌های دولومیت‌دار و سایر مواد معدنی منیزیم‌دار، منیزیم را در خود حل می‌کند. چون طول مدت تماس آب‌های زیرزمینی با این طبقات بیشتر از آب‌های سطحی است، بنابراین معمولاً سختی آب‌های سطحی از زیرزمینی کمتر است. سختی آب را معمولاً بر حسب غلظت کربنات کلسیم (میلی گرم در لیتر) بیان می‌کنند. عدم قبول آب‌های سخت به عادت مصرف کنندگان بستگی دارد.

#### انواع سختی آب

سختی آب را به سختی کلسیم و منیزیم و سختی کربناتی و غیرکربناتی طبقه‌بندی می‌کنند. کاتیون کلسیم شامل سولفات کلسیم، کلرور کلسیم و سایر نمک‌های کلسیم، سختی کلسیم را تشکیل می‌دهند. و کاتیون منیزیم باعث سختی منیزیم می‌گردد. با توجه به اینکه کلسیم و منیزیم ترکیبات معدنی هستند که باعث سختی آب می‌شوند. بنابراین بطور کلی فرض می‌گردد که سختی کل معادل مجموع سختی کلسیم و سختی منیزیم است.

بی‌کربنات و کربنات کلسیم و منیزیم باعث سختی کربناتی آب می‌گردند. سایر نمک‌های کلسیم و منیزیم مانند سولفات‌ها و کلرورهای کلسیم و منیزیم موجب سختی غیرکربناتی آب می‌شوند. به ندرت ممکن است که نمک‌های نیترات کلسیم و منیزیم در سختی غیرکربناتی دخالت نمایند.

مجموع سختی کربناته و سختی غیرکربناته، سختی کل آب را تشکیل می‌دهند. سختی بی‌کربناته آب‌ها در اثر حرارت تجزیه شده و گاز دی‌اکسیدکربن از آب خارج شده و کربنات‌های کلسیم و منیزیم رسوب می‌نمایند. چون سختی کربناتی بوسیله حرارت از آب جدا می‌شود، از این رو به آن سختی موقت گویند و بر عکس به سختی غیرکربنات که حرارت در آن اثری ندارد، سختی دائم گفته می‌شود. سختی موقت به علت وجود بی‌کربنات‌های کلسیم و منیزیم است که در اثر حرارت دادن آب حذف می‌شود.



اگر H سختی کل و M کلیائیت کل آب بر حسب معادل کربنات باشد.		
M < H باشد	H = سختی دائم	= سختی موقت
H = M باشد	سختی دائم	نتی موقت H = M
M > H باشد	: سختی موقت	کربنات سدیم M - H

#### سختی زدایی

انواع مختلف سختی میزان حلالیت متفاوتی دارند. اشکالی که کمترین میزان حلالیت را دارند کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم می‌باشند. ته‌نشینی شیمیایی به وسیله تبدیل سختی کلسیم به کربنات کلسیم و تبدیل سختی منیزیم به هیدروکسید منیزیم انجام می‌شود. این عمل را می‌توان به وسیله فرآیند آهک- کربنات سدیم یا فرآیند سود سوزآور انجام داد. دو روش متداول سبک کردن آب‌ها شامل: سبک کردن به کمک آهک و خاکستر کربنات سدیم و سبک کردن با مبادله کننده‌های یونی است.

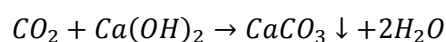
#### سبک کردن آب با آهک و خاکستر کربنات سدیم

آب آهک (Ca(OH)<sub>2</sub>) و کربنات سدیم (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) با نمک‌های کلسیم و منیزیم ترکیب شده و رسوبات نامحلول کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم تشکیل می‌شود که بوسیله ته‌نشینی و صاف کردن از آب جدا می‌شوند. چون این رسوبات خیلی کم در آب محلول هستند، بنابراین مقداری از این سختی معادل ۵۰ تا ۸۵ میلی‌گرم در لیتر بر حسب کربنات کلسیم در آب باقی می‌ماند.

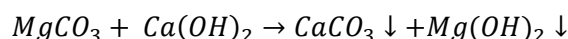
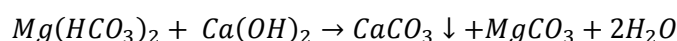
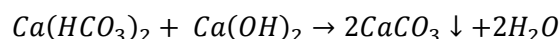
هیدروکسید سدیم را می‌توان به جای آب آهک و خاکستر کربنات سدیم برای جدا کردن سختی کربنات و غیرکربنات بکار برد. مزیت عمده آن تولید لجن کمتر می‌باشد. در هر صورت هیدروکسید سدیم از آب آهک و خاکستر کربنات سدیم گرانتر است.

واکنشهایی که انجام می‌شود:

اگرچه دی‌اکسیدکربن در سختی آب دخالت ندارد، ابتدا CO<sub>2</sub> با آب آهک ترکیب می‌گردد. بنابراین در محاسبه مقدار آهک مورد نیاز برای سبک کردن آب، غلظت CO<sub>2</sub> باید منظور گردد. مقدار کافی آهک باید برای تبدیل CO<sub>2</sub> به کربنات کلسیم نامحلول به آب اضافه شود. این واکنش در pH ۸/۳ کامل می‌گردد.

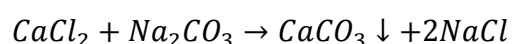
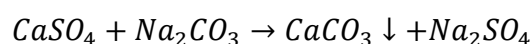


در برخی مواقع از هوادهی برای زدودن گاز دی‌اکسیدکربن استفاده می‌شود تا مقدار مصرف آهک را کاهش دهند. سپس مواد معدنی مسبب سختی کربنات، به صورت رسوب کربنات کلسیم یا هیدروکسید منیزیم از آب خارج می‌شوند.

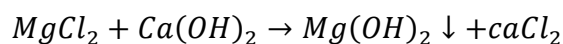
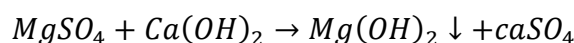


برای رسوب کربنات کلسیم pH ۹/۴ لازم است و برای رسوب هیدروکسید منیزیم باید آهک اضافه شود تا pH به بالاتر از ۱۰/۶ برسد.

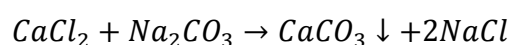
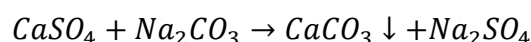
خاکستر کربنات سدیم (سودا)، مواد معدنی عامل سختی غیرکربنات کلسیم را از آب‌های سخت خارج می‌نماید. برای حذف  $Ca^{++}$  از سودا،  $Na_2CO_3$ ، استفاده می‌شود.



برای حذف مواد معدنی عامل سختی غیرکربناتی منیزیم  $Mg^{++}$  سودا و آب آهک لازم است.

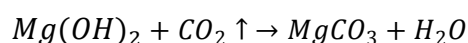
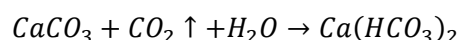


در این واکنش‌ها ترکیباتی مانند سولفات کلسیم و کلرور کلسیم که عامل سختی غیرکربناتی هستند تشکیل می‌شود. بنابراین، خاکستر کربنات سدیم باید به آب اضافه شود تا آنها را بصورت کربنات کلسیم رسوب دهد.

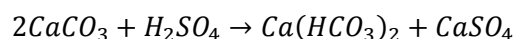


برای حذف یک اکی‌والان منیزیم، یک اکی‌والان سودا و یک اکی‌والان هیدروکسید کلسیم لازم است.

چون pH آب سبک شده نزدیک به ۱۱ بوده و مقدار زیادی کربنات کلسیم دارد، آب باید تثبیت گردد تا کربنات کلسیم بر روی صافی و در شبکه توزیع آب رسوب ننماید. به این منظور دی‌اکسیدکربن به آب اضافه می‌گردد تا بی‌کربنات کلسیم محلول تشکیل شده و pH به حدود ۸/۶ کاهش یابد. در این pH از تشکیل رسوب و یا اثر خوردگی آب جلوگیری می‌شود. باقیمانده رسوب هیدروکسید منیزیم نیز به کربنات منیزیم محلول تبدیل می‌گردد.



بعضی اوقات برای تثبیت آب از اسید سولفوریک استفاده می‌شود. ولی چون به سختی غیرکربناتی آب اضافه می‌شود (CaSO<sub>4</sub>) و نگهداری و حمل و نقل آن مشکل‌تر می‌باشد، از این رو بیشتر از گاز دی‌اکسیدکربن برای تثبیت آب استفاده می‌شود.



در فرآیند آهک و سودازنی، از نظر تئوری کلسیم می‌تواند به ۳۵ppm کاهش یابد. عملاً کلسیم در بهترین حالت به حدود ۵۰ ppm کاهش می‌یابد.

ذرات کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم حاصل، بسیار ریز است و به سختی ته‌نشین می‌شوند. برای درشت کردن و تسریع ته‌نشینی آنها مواد منعقد کننده باید اضافه کرد. آهک و سودازنی گرم باعث کاهش بیشتر سختی می‌شود. آهک و سودازنی برای حجم زیاد آب توصیه می‌شود.

محاسبه مقدار مواد شیمیایی مورد نیاز در فرآیند آهک و سودازنی

مقدار آهک، Ca(OH)<sub>2</sub>، لازم بر حسب ppm معادل کربناتی، برابر مجموع چهار مورد زیر است:

- CO<sub>2</sub> آزاد بر حسب معادل کربناتی
- بی‌کربناتی که باید به کربنات تبدیل شود.
- هیدروکسید اضافی مورد نظر در آب خروجی از سیستم (۵ تا ۱۰ ppm)
- مقدار سختی منیزیمی که باید حذف شود.

توجه: تمام مقادیر بر حسب ppm معادل کربناتی است.

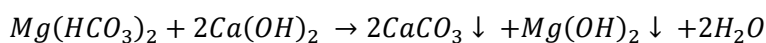
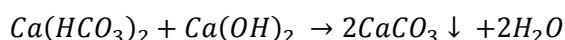
سودای مورد نیاز برای فرآیند آهک و سودازنی

سودا (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) مورد نیاز بر حسب ppm معادل کربناتی برابر مجموع دو مورد زیر است:

- مقدار سختی غیرکربناتی که باید حذف شود.
- مقدار آهک اضافی که در آهک‌زنی مصرف می‌شود.

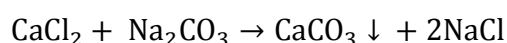
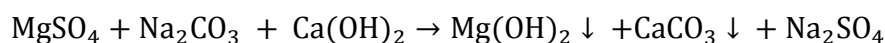
مثال: در فرآیند آهک و سودازنی، آیا قلیائیت ساده افزایش می‌یابد یا کاهش؟ مقدار سولفات و کلرید چطور؟

حل: با توجه به واکنشهای آب آهک با سختی موقت:



ملاحظه می‌شود که غلظت بی‌کربنات کم می‌شود، یعنی قلیائیت کاهش می‌یابد.

و با توجه به واکنشهای سودا با سختی دائم



قلیائیت تغییر نمی‌کند. مقدار سولفات و کلرید نیز تغییر نمی‌کنند.

#### سبک کردن آب با مبادله‌کننده‌های یونی

در روش تبادل یون، یون سدیم جانشین یون‌های مسبب سختی آب می‌شود. مواد مبادله‌کننده یون، مانند رزین‌های پلی‌استیرن را در دستگاه تبادل یون قرار داده و آب را از آن عبور می‌دهند، در نتیجه کاتیون‌های کلسیم و منیزیم جانشین کاتیون سدیم می‌شوند. مبادله‌کننده‌های یونی بعد از مدتی ظرفیت تبادل یون‌ها را از دست می‌دهند که اصطلاحاً می‌گویند اشباع شده‌اند. برای بازیابی رزین، محلول کلرور سدیم را از دستگاه مبادله‌کننده یون می‌گذرانند تا یون سدیم جانشین کاتیون‌های کلسیم و منیزیم گردد.

روش تبادل یون، بیشتر برای سبک کردن آب مصرفی منازل و تصفیه‌خانه‌های اجتماعات کوچک که آب زیرزمینی مصرف می‌کنند، بکار می‌رود. مبادله‌کننده‌های یونی برای سبک کردن آب‌هایی که سختی غیرکربناتی درصد زیادی از سختی آنها را تشکیل می‌دهد، بکار می‌رود، زیرا که هزینه مواد شیمیایی مصرفی برای خارج ساختن ترکیبات غیرکربناته با آهک-کربنات سدیم گرانتر از مبادله‌کننده‌های یونی است. از مبادله‌کننده‌های یونی به آسانی نمی‌توان برای سبک کردن آب‌های سطحی استفاده نمود.

تبادل یونی، آب نرمتری از ته‌نشینی شیمیایی تولید کرده و از تولید مقادیر زیاد لجن که در فرآیند آهک-کربنات سدیم با آن مواجه می‌شویم جلوگیری می‌کند. نرم کردن آب زیرزمینی صاف باید آنی (قبل از وقوع هوادهی) باشد، در صورتیکه آب‌های سطحی باید تمام مراحل تصفیه لازم از قبیل فیلتر شدن را قبل از نرم کردن به وسیله تبادل یونی دریافت کنند. آب نباید قبل از نرم کردن تبادل یونی، کلرزی شود.

### ۵- صاف کردن و زلال‌سازی آب: مشخصات فیلترها، هیدرولیک فیلترها، اجزاء فیلترها

فیلتر کردن اغلب یک مرحله تصفیه برای حذف لخته‌های ریز یا ذرات رسوب شوند حذف نشده در ته‌نشینی آب‌هایی محسوب می‌گردد که کوآگولاسیون برای آن انجام شده یا آب سختی‌گیری شده است. در بعضی موارد از فیلتر به عنوان فرایند حذف کدورت، یعنی فیلتر کردن مستقیم آب خام استفاده می‌شود. اگرچه فیلتر کردن بسیاری از ارگانیسیم‌های پاتوژنی را از آب حذف می‌کند، ولی برای حفاظت کامل سلامتی نباید به فیلتر اعتماد کرد.

متداولترین فرآیند فیلتر کردن، گذراندن آب از میان یک بستر ثابت گرانولی است. در این روش جامدات آب در ماده فیلتر باقی می‌ماند. معمولترین نوع فیلتر از این نوع فیلتر کردن جاذبه‌ای در حالت پایین‌رو (Downflow) بوده و وزن ستون آب بالای فیلتر نیروی محرک را فراهم می‌کند.

عملیات حذف جامدات به وسیله فیلتر با بسترهای دانه‌ای شامل چند فرآیند پیچیده می‌شود. صاف کردن (Straining) فیزیکی ذرات بزرگتر از منافذ صافی، واضح‌ترین فرآیند است. اکثر مواد جامد در آب ته‌نشین شده، ریزتر از آن است که بوسیله صاف کردن حذف شود. حذف ذرات و لخته‌ها در بستر فیلتر به عواملی از قبیل: مکانیسم حمل جامدات به سطح فیلتر و نگهداشتن جامدات به وسیله بستر بعد از وقوع تماس بستگی دارد. مکانیسم‌های حمل شامل: ته‌نشینی (سوراخ منفذ همانند حوض ته‌نشینی کوچک عمل می‌کند)، برخورد اینرسی، پخش کلوئیدها به داخل محل‌هایی با غلظت کمتر و یا برش هیدرولیکی (Hydraulic Shear) و به مقدار کمتری حرکت براونی و نیروی واندروالسی بستگی دارد. باقی ماندن جامدات بعد از تماس را می‌توان عمدتاً به نیروهای الکتروشیمیایی، نیروهای واندروالس و جذب سطح فیزیکی نسبت داد.

با آماده‌سازی شیمیایی آب از قبل، فیلتر خوب طراحی و بهره‌برداری شده، باید تقریباً تمام جامدات تا اندازه زیر میکرونی را حذف کند. حذف از قسمت بالای فیلتر آغاز می‌شود. با پر شدن منافذ فیلتر به وسیله مواد فیلتر شده، برش هیدرولیکی افزایش یافته و ذرات را بیشتر به درون بستر می‌راند. وقتی که ظرفیت فیلتر به این طریق تمام می‌شود، فیلتر را باید تمیز کرد. در روش‌های مدرن، فیلتر به وسیله شستشوی معکوس هیدرولیکی تمیز می‌شود. آب شستشوی معکوس، جامدات جمع شده را حذف کرده و فیلتر به کار بازگردانده می‌شود.

متغیرهای بسیاری، بهره‌برداری از فیلترهای بستر گرانولی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. فهم هیدرولیک فیلتر، خصوصیات بسترها و روش‌های بهره‌برداری برای طراحی فیلترهای بستر گرانولی موثر، لازم است.



### هیدرولیک فیلتر

هیدرولیک فیلتر به دو قسمت مجزا تقسیم می‌شود: فرآیند فیلتر کردن که به وسیله آن آب تمیز می‌گردد و عمل شستشوی معکوس که بوسیله آن فیلتر تمیز می‌شود.

### اجزای فیلتر

اجزای فیلتر شامل: سازه محصور کننده (Containment)، سیستم زهکشی زیرین (Underdrain) و بستر فیلتر است. علاوه بر این سیستم‌های لوله‌کشی، پمپ‌ها، شیرها، تجهیزات شستشوی معکوس و دیگر ملزومات برای کنترل جریان آب ورودی و خروجی فیلتر لازم است.

از قدیم، ماسه سیلیس ماده مورد استفاده در فیلترهای بستر دانه‌ای بوده است. در کاربردهای جدید فیلتر، از زغال آنتراسیت و ماسه به عنوان جانشین و یا همراه با ماسه سیلیس استفاده می‌کنند. خصوصیات مهم این مواد اندازه، توزیع اندازه و دانسیته آنها است. هرچه اندازه ماده دانه‌ای کوچکتر باشد، اندازه منافذی که آب باید از آن عبور کند کوچکتر می‌شود. مافذ کوچک بازدهی فیلتر را هم به خاطر صاف کردن و هم به خاطر دیگر مکانیسم‌ها زیاد می‌کنند. با این وجود، با کاهش اندازه منافذ، افت فشار در بستر صافی افزایش یافته و منجر به کاهش دبی می‌شود. مواد بزرگتر، اندازه منفذ را افزوده، افت فشار را کاسته و دبی را زیاد می‌کند، اما همه اینها باعث کاهش بازدهی فیلتر می‌شود.

انتخاب اندازه، توزیع اندازه و دانسیته ماده فیلتر جنبه مهم طراحی فیلتر است. با استفاده از این متغیرها، طراح سعی در تطبیق فیلتر با خصوصیات آبی که باید فیلتر شود و به کیفیت و کمیت آب خروجی دارد.

فیلتر شنی کند: اولین فیلترهایی است که به طور وسیع برای تصفیه آب مورد استفاده قرار گرفته است. این فیلترها از ماسه‌های ریز با اندازه موثر حدود ۰/۲ میلی‌متر درست شده بود. اندازه موثر، اندازه منفذ بیزش (Sieve) می‌باشد که ۱۰ درصد بستر را نگه می‌دارد. این اندازه کوچک منجر به حذف اکثر مواد معلق در سطح فیلتر می‌شد. به علاوه، لایه‌ای از موجودات بیولوژیکی اجازه رشد می‌یافتند و این نمو به فرآیند فیلتر کردن کمک می‌کرد. افت فشار زیاد باعث میزان جریان کم (۰/۱۲ تا ۰/۳۲ متر بر ساعت) می‌شد. شستشوی فیلتر معمولاً ماهی یک بار با خالی کردن آب فیلتر و حذف مکانیکی چند سانتی متر از ماسه بالای فیلتر همراه با جامدات جمع شده و لایه بیولوژیکی انجام می‌شد.

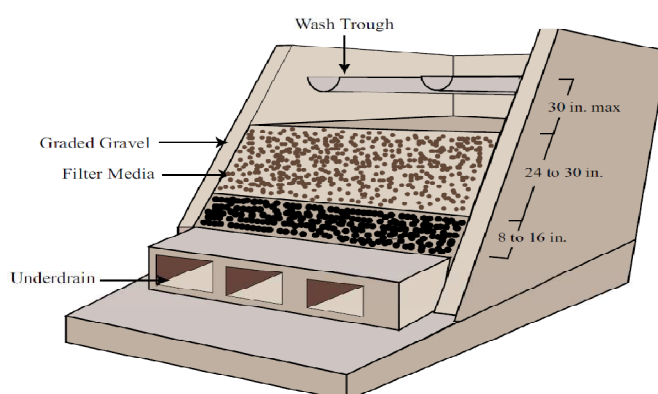
فیلتر شنی سریع: این فیلتر، بستر ماسه سیلیس با گستره ۰/۶ تا ۰/۷۵ متر عمق را به کار می‌گیرد. اندازه دانه‌ها می‌تواند گستره‌ای از ۰/۳۵ تا ۱ میلی‌متر و حتی بزرگتر و اندازه موثر از ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ میلی‌متر را داشته باشد.

این اندازه‌های بزرگتر با شستشوی مکرر و عدم وجود لایه بیولوژیکی، منجر به میزان فیلتراسیون تا ۱۰ برابر بیشتر از فیلتر ماسه‌ای کند می‌شود. میزان فیلتراسیون متداول در فیلترهای ماسه‌ای تند، گستره‌ای از ۲/۵ تا ۵ متر بر ساعت دارد.

فیلترهای دو بستری معمولاً از ماسه سیلیس و زغال سنگ آنتراسیت ساخته می‌شود. عمق ماسه سنگ گستره‌ای از ۰/۱۵ تا ۰/۴ متر را داشته و عمق زغال سنگ آنتراسیت از ۰/۳ تا ۰/۶ متر در نوسان است. برای تولید جدایی مشخص یا میزان اختلاط بعد از شستشوی معکوس، می‌توان ضریب یکنواختی و اندازه موثر دو بستر را انتخاب کرد. وجود منافذ بزرگ در لایه آنتراسیت، باعث حذف ذرات بزرگتر و لخته‌ها می‌گردد. در صورتیکه اکثر مواد کوچکتر در لایه ماسه جذب می‌شوند. مزیت فیلترهای دو بستری، بکارگیری موثرتر فضای منفذ برای ذخیره است. این امر منجر به کارکرد طولانی‌تر فیلتر و میزان فیلتراسیون بیشتر می‌شود، چون افت فشار کمتر است. جنبه منفی دو بستری این است که مواد فیلتر شده به حالت سست در لایه آنتراسیت نگهداری می‌شوند. هرگونه افزایش ناگهانی در بارگذاری هیدرولیکی باعث کنده شدن مواد و حمل آنها به سطح لایه ماسه‌ای شده که باعث بسته شدن سریع در این سطح می‌شود.

فیلترهای بستر مختلط: فیلتر ایده‌آل متشکل از بستری است که به طور یکسان از بالا تا پایین از درجه بزرگ تا کوچک طبقه‌بندی شده باشد. این موضوع را می‌توان با استفاده از ۳ ماده یا بیشتر و انتخاب دقیق اندازه، دانسیته و ضریب یکنواختی برآورده ساخت.

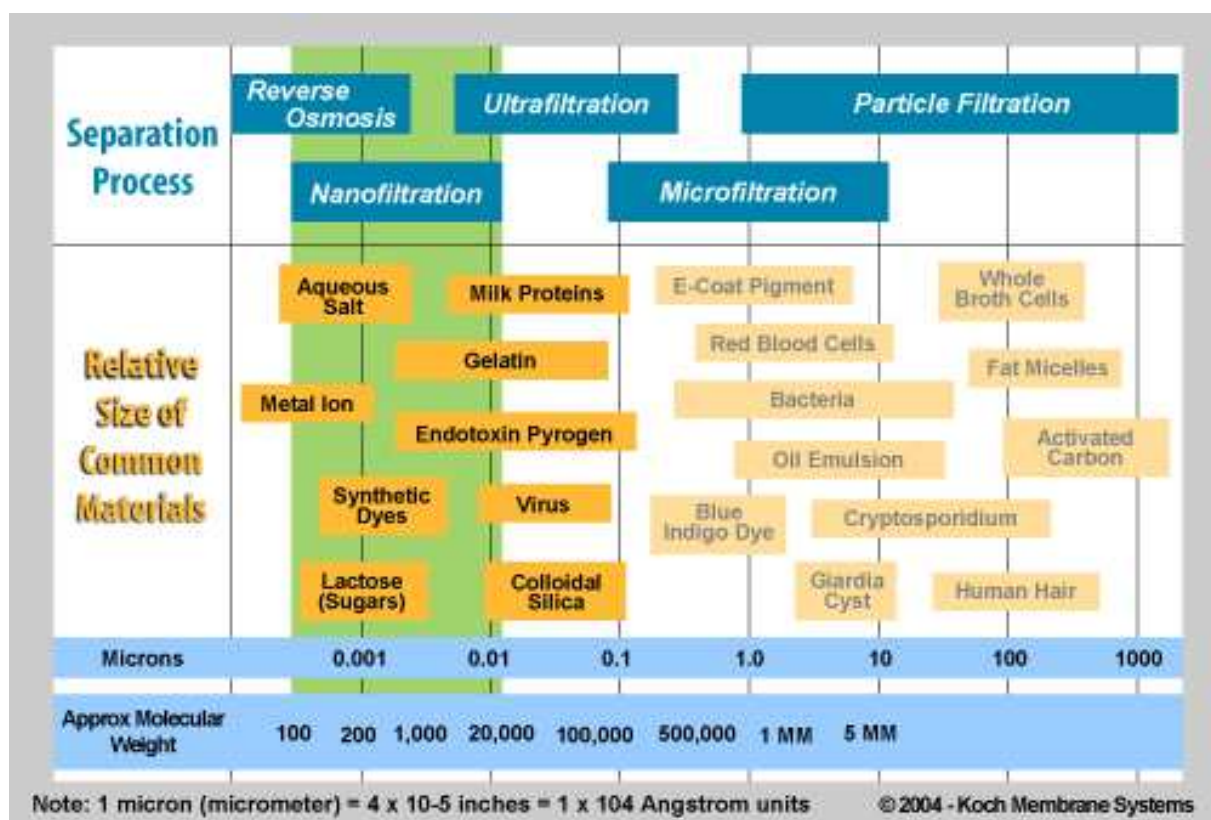
فیلترهای دو یا چند بستری، صاف کردن مستقیم آب با کدورت کم را بدون عملیات ته‌نشینی ممکن می‌سازد و مواد شیمیایی لخته کننده غالباً در آب ورودی به صافی اضافه می‌شوند تا با تولید لخته‌های ریز و محکم، حذف کدورت افزایش یابد. در شکل زیر شماتیک یک فیلتر نشان داده شده است.



تصویر شماتیک یک فیلتر

فیلتر با توجه به عملکرد و بر اساس قطر منافذ خود طبقه بندی می گردد:

- ✓ فیلتر شنی
- ✓ میکروفیلتراسیون
- ✓ اولترافیلتراسیون
- ✓ نانوفیلتراسیون
- ✓ اسمز معکوس



#### طبقه بندی فیلتراسیون

در فیلتراسیون دو موضوع افت فشار و کیفیت آب تصفیه شده مورد اهمیت است. در فیلتراسیون ذرات معلق از آب به سطح فیلتر یا داخل دانه های فیلتر انتقال می یابد. غلظت مواد معلق به طور تصاعدی با ازدیاد عمق فیلتر کاهش می یابد. لذا حذف ناخالصی ها نه تنها به عمق فیلتر بستگی دارد، به زمان فیلتراسیون نیز بستگی دارد. بنابراین، در فیلتر هر کدام از تغییر کیفیت آب خروجی از فیلتر یا افت فشار ایجاد شد در بستر زودتر تحقق یافت باید مبنای شستشوی فیلتر باشد.

سیستم زهکش فیلتر با دو هدف توزیع یکنواخت آب هنگام شستشوی معکوس فیلتر و همچنین جمع‌آوری همگن آبهای فیلتر شده صورت می‌گیرد.

بر طبق مقررات باید هر ۲۴ ساعت فیلتر شستشو شود. در حین شستشو باید توسعه بستر فیلتر (Bed Expansion) به میزان ۲۰ تا ۵۰ درصد بازشدگی صورت گیرد. آنقدر شستشوی معکوس فیلتر باید ادامه یابد که از نظر ظاهری آب کیفیت خوبی داشته باشد. دبی آب شستشو از دو طریق پمپاژ و یا از طریق منبع هوایی تامین می‌گردد. دبی شستشو بزرگتر از فیلتراسیون است، لذا سایز و اندازه سیستم زهکش بر اساس دبی شستشو صورت می‌گیرد. چون دبی آن ۲ تا ۳ برابر دبی فیلتراسیون است. برای کنترل خروجی صافی می‌توان از شیر کنترل کننده دبی و یا سیفون استفاده کرد که فیلتراسیون با دبی ثابت انجام گیرد.

### ۶- گندزدایی آب: استفاده از کلر، استفاده از دیگر روش‌های ضدعفونی کردن آب

گندزدایی، به عملیاتی گفته می‌شود که جهت کشتن یا بی‌ضرر کردن میکروارگانیسم‌های پاتوژن به کار گرفته می‌شود. اثر ضدعفونی کردن در کاهش بیماری‌های منتقله از آب کاملاً مشهود است. دیگر فرآیندهای تصفیه آب نیز در حذف پاتوژن‌ها کمک می‌کنند. بیش از ۹۰ درصد باکتری‌ها و ویروس‌ها به وسیله انعقاد، ته‌نشینی و فیلتر کردن حذف می‌شوند. نرم کردن با استفاده از آهک نیز به علت ایجاد pH بالا، ضدعفونی کننده موثری است.

ضدعفونی کننده خوب باید در غلظت‌های بسیار پایین‌تر از آنچه برای انسان‌ها و حیوانات سمی است، برای میکروارگانیسم‌ها سمی باشد. همچنین میزان کشتار آن باید سریع باشد و به اندازه کافی دوام داشته باشد تا از رشد مجدد ارگانیسم‌ها در سیستم توزیع آب جلوگیری کند. میزان کشتار غالباً واکنش درجه اول قلمداد می‌گردد.

$$\frac{dN}{dt} = -kN$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -kt$$

$$N_t = N_0 e^{-kt}$$

ضدعفونی کامل را نمی‌توان انجام داد، چون  $N_t$  (یعنی تعداد ارگانیسم‌های باقی‌مانده در زمان  $t$ ) فقط در زمان‌های بسیار طولانی به طرز جانبی به صفر می‌رسد. با وجود این، چون تعداد ارگانیسم‌های موجود در آغاز ( $N_0$ ) کم است، ۹۹/۹ درصد کشتار را در یک زمان مناسب می‌توان انجام داد. مقدار ثابت  $k$  باید به طریق تجربی تعیین شود.

عواملی که علیه ضدعفونی موثر کار می‌کنند، کدورت آب و ارگانیسم‌های مقاوم می‌باشند. کلوئیدهای مولد کدورت برای ارگانیسم‌ها پناهگاه به شمار می‌روند و بدین طریق آنها را از اثرگذاری کامل ضدعفونی کننده محافظت می‌کنند. مواد ذره‌ای ممکن است ضدعفونی کننده را جذب سطحی کنند. ویروس‌ها، کیست‌ها و تخم انگل‌ها بیشتر از باکتری‌ها نسبت به ضدعفونی کننده مقاومت نشان می‌دهند. زمان در معرض بودن اضافی و غلظت‌های بیشتر ضدعفونی کننده برای کشتار موثر این ارگانیسم‌ها لازم است.

تحت هیچ شرایطی نباید گندزدایی آب را حذف کرد، زیرا ریشه‌کنی واقعی امراض کشنده مثل بیماری وبا و حصه که عامل اصلی آنها آب است، با استفاده از مواد گندزدا امکانپذیر می‌باشد. در کشورهای فقیر که تصفیه

آب در آنها اغلب نامنظم است، هر ساله انسان‌های زیادی (مخصوصاً کودکان) بوسیله امراضی که عامل آنها آب آلوده است، جان خود را از دست می‌دهند.

### کلرزی

کلرزی ساده (Plain Chlorination)، به کلرزی اطلاق می‌گردد که کلر به آبی که هیچ تصفیه‌ای بر روی آن انجام نشده و می‌خواهد وارد شبکه توزیع گردد، اضافه می‌شود. در خیلی از شهرهای کوچک فقط همین عمل انجام می‌گیرد.

کلرزی مقدماتی (Pre Chlorination)، کلرزی قبل از شروع تصفیه است که با هدف کنترل آگ‌ها، افزایش انعقاد و افزایش عمر صافی‌ها صورت می‌گیرد.

دوباره کلرزی (Re Chlorination)، اضافه کردن کلر را در نقاطی از تاسیسات شبکه توزیع نشان می‌دهد. این عمل بیشتر در شبکه‌های طویل صورت می‌گیرد.

کلر باقیمانده، مقدار کلری است که بعد از اضافه کردن کلر به آب و بعد از گذشتن زمان تماس در آب باقی می‌ماند. کلر باقیمانده معادل مجموع کلر موثر آزاد ( $\text{HClO}$  ,  $\text{ClO}^-$ ) و کلر ترکیبی است.

### مبانی کلرزی

برای حصول اطمینان از درستی کلرزی قواعد زیر بایستی رعایت شود:

- آب مورد گندزدایی، صاف و بدون کدورت باشد.
- کلر مورد نیاز آب مشخص گردد، نقطه شکست کلر و کلر باقی مانده آزاد، حائز اهمیت است.
- زمان تماس حدود یک ساعت برای از بین بردن ارگانسیم‌های حساس در مقابل کلر منظور گردد.
- حداقل کلر باقیمانده پس از یک ساعت،  $0/5$  میلی‌گرم در لیتر پیشنهاد می‌شود. این مقدار در همه‌گیربهای بیماری‌های روده‌ای تا  $1$  میلی‌گرم در لیتر نیز توصیه شده است.
- مقدار کلر مورد نیاز هر نوع آب، برابر خواهد بود با مقدار کلری که به آب اضافه می‌شود تا پس از یک ساعت، مقدار  $0/5$  میلی‌گرم در لیتر کلر باقی مانده داشته باشد.

### روش کلرزی

با توجه به حجم آب مورد گندزدایی و وسعت پروژه، روش کلرزی تعیین می‌گردد. کلر ممکن است به یکی از اشکال زیر در دسترس باشد:

➤ گاز کلر

➤ کلرامین NHCl

➤ پرکلرین High Test Hypochlorit (H.T.H)

➤ دی اکسید کلر

کلر، اولین ماده انتخابی در گندزدایی آب است. زیرا ارزان، موثر و کاربرد آن بسیار ساده است. برای جلوگیری از آثار سمی آن، توسط دستگاه کلرزی به آب اضافه می‌شود. ترکیب آمونیاکی کلر نیز برای گندزدایی آب به کار می‌رود، لیکن اثر آن کندتر از اثر کلر است. این امر باعث محدودیت استفاده از آن شده است. پرکلرین یا H.T.H هیپوکلریت پر قدرت، یکی از ترکیبات کلسیم است که ۶۰-۷۰ درصد کلر دارد. محلول ساخته شده از H.T.H و ترکیبات دیگر کلردار برای گندزدایی آب بکار می‌رود. پرکلرین به صورت پودر یا کریستال ریز در بسته‌هایی با وزن مشخص تهیه و توزیع می‌گردد.

گاز کلر را می‌توان به وسیله فشردن به صورت مایع در آورده و در سیلندرهای مخصوص به محل استفاده منتقل کرد. این شکل از کلر، به دلیل اینکه به آسانی می‌توان آن را مجدداً تبدیل به گاز کرد و قابلیت انحلال تقریبی ۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر در آب با pH و دمای متداول در تصفیه‌خانه‌های آب را دارد، معمولاً ترجیح داده می‌شود. کاربرد هیپوکلریت‌ها pH را افزایش داده و واکنش بیشتر به طرف فرم کم تاثیر OCl<sup>-</sup> رانده می‌شود. هیپوکلریت کلسیم موجود در بازار تقریباً ۷۰ تا ۸۰ درصد کلر دارد، در صورتیکه هیپوکلریت سدیم فقط محتوای ۳ تا ۱۵ درصد کلر است. همچنین مشکلات عملی در حل هیپوکلریت کلسیم وجود دارد که حدود ۱۰ درصد از کلر آن به لجن تولیدی آن منتقل می‌گردد. در هر حال هر دو هیپوکلریت بر اساس معادل گران‌تر از Cl<sub>2</sub> مایع شده می‌باشند. به هر حال، علیرغم ترکیبات جانبی کلر با مواد آلی آب و خطرات احتمالی آن برای سلامت، هنوز کلر به عنوان یک ماده شیمیایی گندزدا برای بهسازی آب آشامیدنی مورد استفاده است.

#### چگونگی اثر گندزدایی کلر

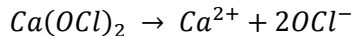
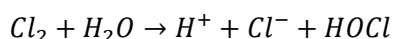
در غلظت‌های پایین، کلر احتمالاً با نفوذ به سلول و واکنش با آنزیم‌ها و پروتوپلاسم، میکروارگانیسم‌ها را می‌کشد. در غلظت‌های بالاتر، اکسیداسیون دیواره سلولی ارگانیسم را نابود می‌کند. عوامل موثر در این فرآیند شامل شکل کلر، pH، غلظت، زمان تماس، نوع ارگانیسم و دما می‌باشد.

کلر افزوده شده به آب، منجر به تشکیل اسید کلریدریک و اسید هیپوکلرو می‌شود. اسید هیپوکلروس، موثرترین ترکیب کلردار برای گندزدایی آب می‌باشد. هرچه قدر pH آب پایین‌تر باشد، اثر گندزدایی آن بیشتر می‌شود.

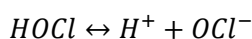
زیرا در pH نزدیک ۷ اسید هیپو کلروس بیشتری تولید می‌گردد و در pH حدود ۸/۵ اثر گندزدایی کلر، ضعیف خواهد شد. خوشبختانه بیشتر آب‌ها دارای pH ۶-۷/۵ هستند.

متداولترین عامل تصفیه آب که در اکثر کشورهای پیشرفته استفاده می‌شود، استفاده از اسید هیپوکلروس است. این ترکیب با عبور از درون غشاء موجودات ذره‌بینی، آنها را می‌کشد. در تصفیه‌خانه‌های بزرگ آب، هیپوکلروس اسید را با حل کردن گاز کلر در آب در pH متوسط تولید می‌کنند. چنانچه pH محیط زیاد باشد، اسید هیپوکلروس به یون هیپوکلریت که خاصیت گندزدایی کمتری دارد، تبدیل می‌شود. اثر اسید هیپوکلروس دو برابر یون هیپوکلریت است. برای جلوگیری از تجزیه اسید، باید pH محیط به دقت کنترل شود تا بیش از اندازه قلیایی نباشد. نقطه تعادل در واکنش تبدیل یون هیپوکلریت به اسید هیپوکلروس باید طوری تنظیم شود که برتری با اسید هیپوکلروس که خاصیت گندزدایی بالاتری دارد، باشد. در pH های بین ۷ تا ۹ تعادل به سمت تولید یون هیپوکلریت جابجا می‌شود.

کلر ممکن است در شکل گازی یا به عنوان محصول یونیزه شده جامدات (Ca(OCl)<sub>2</sub>, NaOCl) استفاده شود. هیپوکلریت سدیم (NaClO) همان آب ژاول است.

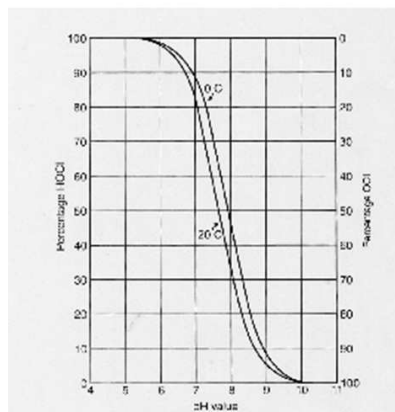


اسید هیپوکلروس (HOCl) و یون هیپوکلریت (OCl<sup>-</sup>) به وسیله معادله زیر به هم مربوط می‌گردند.



این رابطه تحت تاثیر دما و pH می‌باشد. جمع HOCl و OCl<sup>-</sup> موسوم به کلر آزاد باقیمانده است و ضدعفونی کننده اصلی می‌باشد. HOCl ضدعفونی کننده موثرتری است. در نمودار زیر تاثیرات دما و pH بر تغییرات این دو عامل نشان داده شده است.





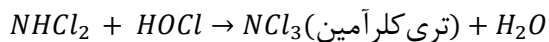
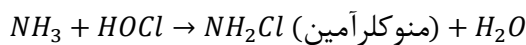
Underchloric acid (left) : hypochlorite ions (right)

مقدار کلر لازم برای گندزدایی آب به درجه pH بستگی دارد. چون خاصیت گندزدایی HClO بیشتر از ClO- است، اگر آب دارای خاصیت قلیایی باشد اسید مزبور خنثی شده و از خاصیت گندزدایی کلر کاسته می‌شود. عامل دیگری که در میزان مصرف کلر موثر است، درجه گرمای آب است. مثلاً کلر در محیطی با درجه اسیدی ثابت، در گرمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد سه برابر موثرتر از گرمای ۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. علاوه بر دو عامل نامبرده شده درجه آلودگی آب نیز در تعیین کلر لازم تاثیرگذار است. وجود کلر زیاد در آب خروجی از تصفیه‌خانه رنگ و بوی آب را تغییر داده و آن را بدرنگ و بدبو می‌سازد. در صورتیکه در حین تصفیه کلر زیادی به آب زده شده باشد، باید آن را از آب بیرون آورد. این کار با کمک هوادهی و یا بوسیله افزودن مواد شیمیایی از قبیل تیوسولفات سدیم ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) و یا گاز  $\text{SO}_2$  انجام می‌شود.

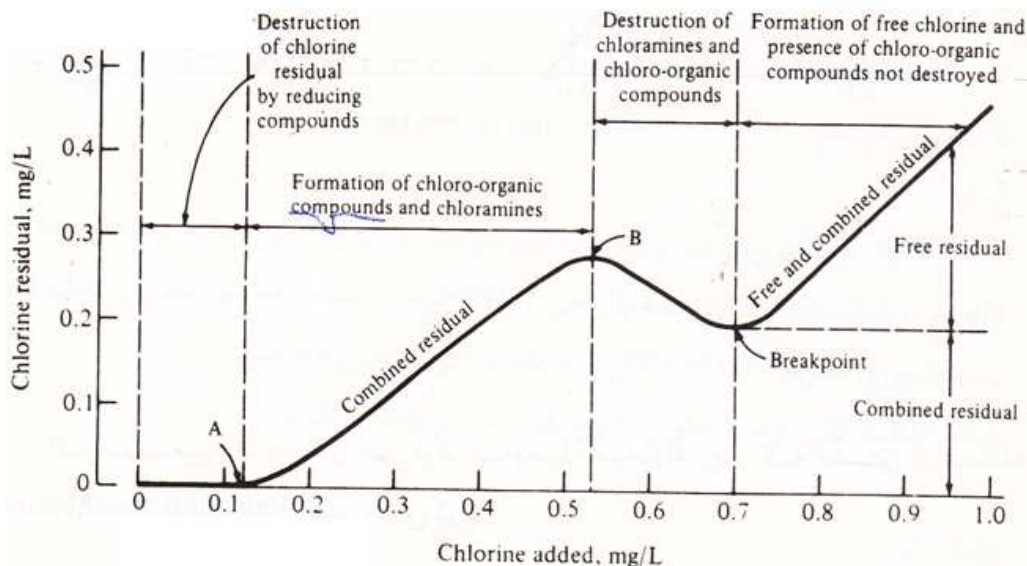
کلر ماده‌ای است اکسید کننده و لذا در تعیین مقدار مصرف آن باید توجه نمود که آنقدر کلر به آب افزود تا علاوه بر اکسید کردن مواد اکسیدپذیر آب، به مصرف کشتن میکروب‌ها نیز رسیده و مقداری هم در آب باقی بماند. به علاوه باید در نظر داشت که کلر در کار بعضی از واحدهای تصفیه‌خانه (مثلاً واحدهای تصفیه زیستی و یکان‌های کم کردن آهن و منگنز) اختلال ایجاد می‌کند. لذا محل کلرزی نیز باید با توجه به این موضوع انتخاب گردد.

کلر به علت اکسیدان قوی بودن، تقریباً با هر ماده‌ای که در حالت احیا باشد واکنش می‌کند. در آب، این مواد معمولاً متشکل از  $\text{Fe}^{2+}$ ،  $\text{Mn}^{2+}$  و  $\text{H}_2\text{S}$  و مواد آلی می‌باشد. آمونیاک ( $\text{NH}_3$ ) در بعضی مواقع به مقدار کم موجود است و یا بصورت دستی به آب اضافه می‌گردد. این مواد اکسید شونده کلر را قبل از اینکه بتواند به عنوان ضدعفونی کننده عمل کند، مصرف می‌کنند. مقدار کلر لازم برای این منظور به طریق تجربی تعیین گردد.

مواد حاصل از اکسید شدن مواد آلی غالباً مطلوب نیستند. اسیدهای آلی (هیومیک و فولیک) ترکیبات هیدروکربن کلرینه شده تشکیل می‌دهند که مظنون به سرطان‌زایی است. مقادیر ناچیز ترکیبات فنلی با کلر واکنش کرده و مشکلات جدی طعم و بو ایجاد می‌کند. مواد آلی اولیه باید قبل از کلریناسیون و ترکیبات نامطلوب باید بعد از کلریناسیون حذف گردند یا اینکه از اول باید از تشکیل آنها جلوگیری کرد. این ترکیبات را می‌توان به وسیله جذب سطحی بر روی کربن فعال حذف نمود یا با جایگزینی کلر آمین‌ها (که با مواد آلی یا فنل‌ها واکنش نمی‌دهند) به جای کلر، از تشکیل آنها جلوگیری کرد. کلر آمین‌ها با اضافه کردن مقدار کمی آمونیاک به آب و کلر تشکیل می‌شوند. واکنش‌های کلر با آمونیاک به قرار زیر است:



این واکنش‌ها وابسته به چند عامل بوده که مهمترین آنها  $pH$  دما و مقدار واکنش کننده می‌باشد. در  $pH$  های بالای ۶/۵ مونوکلرآمین نوع غالب می‌باشد. چون باقیمانده‌های ترکیب کننده، ضدعفونی کننده کم‌تاثیرتری هستند، غلظت ۲ تا ۳ میلی‌گرم در لیتر با زمان تماس بیش از ۳۰ دقیقه غالباً لازم است. کلر آمین‌ها پایدار بوده در سیستم توزیع آب، پیوسته از رشد مجدد باکتری‌ها جلوگیری می‌کنند.



منحنی نقطه شکست کلریناسیون

### کلر باقیمانده سه قسمت دارد: ۱- ترکیبی ۲- آزاد ۳- کل

مجموع کلر باقیمانده ترکیبی و کلر باقیمانده آزاد، کلر باقیمانده کل می‌باشد. وقتی کلر مورد نیاز مطلوب باشد، کلر باقیمانده ترکیبی افزایش یافته، احتمالاً با ترکیبات آلی یا آمونیاک در آب ترکیب شده و کلر آلی و کلر آمین‌ها را تشکیل می‌دهند. افزودن کلر بیشتر، مطابق منحنی نقطه شکست کلر در آب، آب تصفیه شده را بالاتر یا آن سوی نقطه شکست منحنی می‌برد و موجب ایجاد کلر باقیمانده آزاد قابل استفاده می‌شود.

### مزیت استفاده از ترکیبات کلردار

در این روشها، مقداری از کلر بعد از تصفیه آب به صورت حل شده باقی می‌ماند، بطوری که اگر آب پیش از اینکه مصرف شود، از آلودگی‌های بعدی با باکتری یا ویروس محافظت شود.

### مضرات کلرزنی آب

مواد هوموسی که به صورت طبیعی در آبهای سطحی یافت می‌شوند، مواد پیش‌سازی هستند که در کلرزنی آب آشامیدنی، ترکیبات جانبی ایجاد می‌کنند که برخی از این ترکیبات مشکوک به ایجاد سرطان می‌باشند. در اثر واکنش بین کلر و ترکیبات هوموسی بیش از ۷۸۰ ترکیبات جانبی ایجاد می‌گردد که درصد عمده این ترکیبات هالوژنه می‌باشند.

مهمترین مانع برای کلرزنی به منظور گندزدایی آب، تولید مواد کلردار آلی است که جزء آلاینده‌ها هستند و برخی نیز جزء ترکیبات سمی می‌باشند. اگر آبجوی فنل یا ترکیبی از آن باشد، کلر جانشین اتم‌های حلقه شده باعث ایجاد ترکیبات سمی با بو و مزه زننده می‌شود.

مشکل دیگر، تولید تری‌هالومتانها می‌باشد. ترکیب نگران کننده اصلی، کلروفرم، می‌باشد که از واکنش هیپوکلرو اسید با ماده آلی حل شده در آب تولید می‌گردد. برخی دانشمندان عقیده دارند که کلروفرم در انسان، تولید سرطان کبد می‌کند. برای جلوگیری از این خطرات، برخی از کشورها از ازن یا دی‌اکسید کلر برای گندزدایی استفاده می‌کنند، زیرا این عوامل گندزدا کلروفرم تولید نمی‌کنند یا به میزان ناچیز تولید می‌کنند.

### مدیریت کلرزنی آب آشامیدنی

گندزدایی آب آشامیدنی با هدف انهدام عامل‌های میکروبی بیماری‌زا، کنترل میکروارگانیسم‌های مزاحم، ممانعت از رشد مجدد میکروبی در شبکه‌های آبرسانی و حذف یا تقلیل رنگ، طعم و بوی آب به انجام می‌رسد. نیل به

موفقیت در این امر، تمهیدات ویژه‌ای از حوضه آبریز تا مصرف‌کننده را طلب می‌کند. نخستین شرط تحقق آن، پیش‌بینی تمهیدات مدیریتی و فنی برای ممانعت و یا تقلیل ورود آلاینده‌ها به منابع آب است.

به دلیل مزایای متعدد کلرزنی در تحقق سلامت میکروبی آب، سازمان جهانی بهداشت به صراحت اعلام کرده است که پیامدهای بهداشتی ناشی از فرآورده‌های جانبی کلرزنی، در مقایسه با عدم انجام آن، بسیار جزئی است و کلرزنی آب بدون توجه به کنترل فرآورده‌های جانبی حاصل از آن باید انجام شود. مطالعات اپیدمیولوژی محققان نیز نشان می‌دهد که احتمال ابتلا به سرطان ناشی از فرآورده‌های جانبی کلرزنی در استخرهای شنا ۲۵ و در آب آشامیدنی، ۶ در میلیون است.

### روشهای دیگر گندزدایی

#### استفاده از ازن در گندزدایی آب

برای انجام عمل گندزدایی با ازن، هوای غنی شده از ازن را از درون آب عبور می‌دهند. حدود ۱۰ دقیقه تماس کافیست تا ازن بر روی آلودگی تاثیر کرده و آنها را از بین ببرد. از آنجا که طول عمر مولکولهای ازن کوتاه است، هیچگونه حفاظت زمینه‌ای برای محافظت آب از آلوده شدن در شبکه توزیع وجود ندارد. یکی دیگر از اشکالات این روش، عمر کوتاه ازن است که نمی‌توان آن را ذخیره کرد و یا از مکانی به مکان دیگر حمل کرد. باید آن را در محل استفاده، بوسیله فرآیندی نسبتاً گران شامل تخلیه الکتریکی در هوای خشک تولید کرد.

گاز ازن قوی‌ترین اکسید کننده مجاز در صنایع تصفیه آب به‌شمار می‌رود. گاز ازن در هنگام تزریق به آب، روی مواد موجود در آب (مواد زیستی، آلی و معدنی) تاثیر گذاشته و آنها را تجزیه می‌کند. همچنین موجب از بین رفتن کامل باکتری‌ها، انگل‌ها، آمیب‌ها و ویروس‌ها شده و آنها را متلاشی می‌کند. مقدار ازن لازم برای گندزدایی آب ۰/۵ تا یک گرم ازن در هر متر مکعب آب و مدت زما گندزدایی ۱۰ تا ۱۵ دقیقه می‌باشد. امتیاز کاربرد ازن در این است که پس از گندزدایی در آب نمی‌ماند و ضمناً بو و مزه آب را بر خلاف کلر تغییر نمی‌دهد، ولی گران قیمت‌تر است. هزینه ازن‌زنی دو تا سه برابر هزینه کلریناسیون است. چون هیچ ازنی باقی نمی‌ماند، لازم است که بعد از ازن‌زنی برای حفاظت شبکه توزیع از رشد مجدد، مقدار کمی کلر نیز اضافه گردد.

علاوه بر موارد فوق، ازن به منظور بهبود طعم و بو، رنگ‌بری، تجزیه مواد آلی سنگین، انعقاد و ته‌نشینی، حذف آهن و منگنز محلول و آمونیاک در آب به کار رفته و از نظر قدرت اکسیداسیون نسبت به سایر مواد شیمیایی به زمان تماس کمتری احتیاج دارد. از طرف دیگر ازن، مواد آلی را به مولکول‌های سبک تجزیه کرده و در نتیجه

مواد جانبی مضرهالوفرمی که در هنگام بکارگیری اکسیدکننده‌های با پایه کلر (یا سایر هالوژن‌ها) ایجاد می‌شوند، به وجود نمی‌آیند.

### دی اکسید کلر

دی اکسید کلر ( $\text{ClO}_2$ ) از لحاظ بسیاری از خصوصیات مشابه ازن می‌باشد. دی اکسید کلر، اکسید کننده‌ای قوی است که تشکیل کلروفرم یا کلرآمین نداده و در اکسید کردن مواد فنلی کاملاً موثر است. خصوصیات ضدعفونی کننده دی اکسید کلر شبیه کلر بوده و استفاده از آن منجر به تولید باقیمانده قابل اندازه‌گیری می‌گردد. اگرچه کاربرد اصلی آن در ضدعفونی کردن فاضلاب است، ولی در تصفیه آب آشامیدنی برای اکسید کردن آهن و منگنز و برای حذف ترکیبات طعم و بو استفاده محدودی داشته است. احیای احتمالی آن به کلرات (ماده‌ای که برای انسان‌ها سمی است) استفاده از آن را در آب آشامیدنی زیر سوال قرار می‌دهد.

### استفاده از اشعه UV

استفاده از پرتو فرابنفش، یک روش فیزیکی به منظور حذف میکروارگانیسم‌ها به شمار می‌رود. نور فرابنفش در طول موج ۲۰۰ تا ۲۸۰ نانومتر خاصیت گندزدایی و عقیم کردن میکروارگانیسم‌ها را دارد. بالاترین راندمان نور UV در طول موج ۲۵۴ نانومتر اتفاق می‌افتد. در سیستم‌های UV، آب در یک محفظه از جنس فولاد ضدزنگ از مجاورت نور فرابنفش عبور کرده و استریل می‌شود. مدت گندزدایی با اشعه ماورای بنفش ۳ ثانیه و مصرف برق حدود ۴۰ وات ساعت برای هر متر مکعب آب می‌باشد.

در خصوص اصول گندزدایی با پرتو فرابنفش بطور خلاصه می‌توان گفت که لامپ‌های کم فشار جیوه‌ای با راندمان بالا و یا لامپ‌های پر فشار جیوه‌ای با راندمان کمتر ولی شدت تابش بیشتر، در اسید نوکلئیک (مولکولهای حاوی اطلاعات ژنتیکی) میکروبه‌ها تغییرات فتوشیمیایی ایجاد می‌کند. این تغییرات مانع تکثیر سلولی و تولید مثل آنها می‌گردد. مقدار تخریب ایجاد شده توسط پرتو فرابنفش و در نتیجه میزان تاثیر فرآیند ضدعفونی با شدت نور و مدت زمان مجاورت با تابش متناسب می‌باشد. از این نظر، دوز UV برابر است با حاصل ضرب مقدار متوسط شدت تابش پرتو UV در طول موج ۲۵۴ نانومتر در داخل محفظه دستگاه UV (بر حسب  $\text{mW/cm}^2$ ) در مدت زمان عبور آب از داخل دستگاه (بر حسب ثانیه). دوز UV بر اساس ژول بر متر مربع ( $\text{J/m}^2$ ) و یا میلی وات ثانیه بر سانتیمتر مربع ( $\text{mW.s/cm}^2$ ) محاسبه می‌شود. دوز متداول پرتو افشانی UV برای ضدعفونی آب شرب، بر اساس کیفیت آب و هدف ضدعفونی مورد نظر بین ۴۰۰ و ۱۲۰۰ ژول بر متر مربع (۴۰ تا ۱۲۰ میلی وات ثانیه بر سانتیمتر مربع) قرار دارد.

اشعه ماورای بنفش با ایجاد رادیکال آزاد، باعث از بین رفتن موجودات بیماری‌زای آب می‌شود. دلایل اصلی انتخاب گندزدایی به روش UV عبارتند از:

- تاثیرگذاری (در مقایسه با کلر، UV می‌تواند با دوز مصرف نسبتاً پایینی طیف وسیعی از میکروب‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها را نابود کند)
- حداقل ریسک برای سلامتی (ترکیبات جانبی آن بسیار کم است)
- به جا نگذاشتن باقیمانده که با مواد آلی موجود در آب ایجاد واکنش نموده و در نتیجه رنگ، عطر و طعم محصولات غذایی را تغییر دهد)
- ایمنی مصرف کنندگان، مسئولان و جامعه (عدم حمل و نگهداری و کار با مواد شیمیایی سمی)
- سادگی و هزینه پایین در کاربری و نگهداری (دستگاه‌های UV نسبت به دستگاه‌های مولد ازن و دی اکسید کلر از پیچیدگی بسیار کمتری برخوردارند)
- عدم نیاز به مخازن بزرگ تماس (ضد عفونی با UV در ظرف چند ثانیه کامل می‌شود در حالیکه سایر روش‌های گندزدایی به ۱۰ تا ۶۰ دقیقه زمان نیاز دارند)
- هزینه پایین سرمایه‌گذاری دستگاه‌های UV (در طراحی تاسیسات جدید، ضدعفونی با UV کمترین هزینه سرمایه‌گذاری را دارد)

#### کاربرد ید و برم

برای گندزدایی آب به اندازه‌های کم می‌توان از ید و برم استفاده نمود. کار با آنها آسان است و قرص‌هایی از این مواد در بازار برای گندزدایی آب وجود دارد.

#### جوشانیدن آب

باکتری‌ها در درجه گرمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آب می‌میرند، ولی از نظر اطمینان باید آب را جوشانید. گندزدایی آب به روش جوشانیدن خیلی گران تمام می‌شود و برای مقادیر کمی در خانه‌ها قابل استفاده است.

#### استفاده از صافیهای نانومتری

روش جدیدتر، استفاده از صافیهای نانومتری می‌باشد که مانع از عبور مولکولهای آلی زیستی و دیگر مولکولهای آلی بزرگ می‌شود که اندازه آنها بزرگتر از نانومتر است.

### بهترین استراتژی ضدعفونی

بهترین استراتژی ضدعفونی آب، روشی است که هیچ نوع ترکیبات آلی جانبی ایجاد نکند و با کارایی بالا باکتریها و ویروسها را از بین برده و پرتوزوا را تصفیه نماید و همچنین به مواد شیمیایی باقیمانده در خطوط شبکه توزیع نیاز نداشته باشد. هیچ شیوه ضدعفونی به تنهایی نمی‌تواند کلیه این اهداف را برآورده نماید، لیکن طراحی فرآیندی که اجزاء آن در کنار یکدیگر موفق به دستیابی به این اهداف گردند امکان‌پذیر است. یک چنین فرآیندی شامل اجزاء زیر می‌باشد:

- پیش تصفیه آب به انضمام حذف ذرات آلی تا حد دستیابی به کیفیت مطلوب، توسط فیلتراسیون
- حذف مواد محلول آلی غذایی توسط فیلترهای بیولوژیکی فعال، شنی و کربن فعال
- ضد عفونی با دوز صحیح توسط UV به منظور از بین بردن باکتریها و ویروسهایی که از فیلترها عبور می‌کنند
- انتقال آب پالایش شده به شبکه توزیع مجهز به سیستم تعمیر و نگهداری بدون استفاده از مواد شیمیایی باقیمانده

این شیوه‌ای است که امروزه در اروپا بکار می‌رود و سیستمی است که از طرف بعضی محافل تخصصی به عنوان روند تکاملی در تصفیه آب شناخته شده است. امروزه در بعضی شهرهای بزرگ اروپا و برخی شهرهای کوچک در ایالات متحده از هیچ نوع ماده ضدعفونی کننده باقیمانده در آبهای آشامیدنی استفاده نمی‌کنند. کیفیت آب در این شهرها بسیار خوب است و شمارش میکروبی پایین‌تر از حد مجاز می‌باشد.

## ۷- روش‌های حذف مواد معدنی و آلی محلول در آب

منظور از TDS کل مواد جامد محلول در آب است که برابر مجموع غلظت همه یونهای موجود در آب می‌باشد. مواد محلول در آب ممکن است از نظر ماهیت آلی یا معدنی باشند. مواد غیرآلی حل شده در آب شامل: مواد معدنی، فلزات و گازها می‌باشند. بعضی از مواد آلی به صورت ذرات کلوییدی هستند، اما بیشتر مواد آلی به صورت محلول هستند. آلاینده‌های آلی ممکن است باعث بو، رنگ و طعم نامطبوع آب شوند. مواد حاصل از تجزیه گیاهان، مواد شیمیایی آلی و گازهای آلی، اجزای آلی محلول در آب را تشکیل می‌دهند. بسیاری از مواد حل شده در آب نامطلوب هستند. برخی از ترکیبات شیمیایی ممکن است سمی باشند و برخی از اجزای آلی محلول به اثبات رسیده است که سرطانزا هستند. البته باید توجه داشت که تمامی مواد محلول در آب نامطلوب نیستند. اما میزان مواد محلول مطلوب در آب بسیار اندک است.

میزان کل جامدات محلول در آب از دو نظر قابل بررسی است:

مقدار مجاز: حداکثر مقدار مجاز TDS آب آشامیدنی در استاندارد آب شرب ذکر شده است. این مقدار در استاندارد آب شرب ایران ۱۵۰۰ و در شرایط ویژه ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر ذکر شده است.

مقدار مطلوب: مقدار مطلوب کل جامدات محلول در آب در استاندارد ذکر نشده است. اما آنچه که مسلم است هرچقدر ناخالصی‌های محلول در آب (خصوصاً آن دسته از ناخالصی‌ها که برای بدن مضر هستند نظیر نیترات) کمتر باشد آب گواراتر و سالم‌تر خواهد بود. از طرفی کاهش TDS ممکن است تغییر طعم آب را به دنبال داشته باشد و از آنجا که طعم و مزه آب یک پارامتر نسبی است و برای مصرف‌کنندگان مختلف متفاوت است، آستانه تغییر مزه نیز قابل اندازه‌گیری نبوده و لذا در استاندارد ذکر نشده است.

ممکن است مقدار ناخالصی‌های محلول در یک نمونه آب، از مقدار استاندارد تجاوز نکرده باشد، اما از نظر مصرف کننده آن نمونه مطلوبیت لازم جهت مصرف را نداشته باشد. بطور مثال TDS آب قم حدود ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر است. مصرف این آب از نظر استاندارد آب شرب مجاز محسوب می‌شود، اما مطلوبیت لازم را جهت مصرف ندارد. ممکن است میزان نیترات در یک نمونه از آب مشهد، ۴۵ میلی‌گرم در لیتر گزارش شود. این میزان از حداکثر مجاز عنوان شده در استاندارد (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) کمتر است. به عبارتی این مقدار خط قرمز است و هر چه میزان نیترات در آب از این میزان کمتر باشد، بر سلامت آب افزوده می‌شود.



## حذف جامدات محلول

آلاینده‌های مورد نظر در فرآیندهای حذف جامدات محلول ممکن است مواد غیرآلی یا ترکیبات آلی تجزیه‌پذیر باشد. چند فرآیند برای کاهش غلظت این ترکیبات در آب آشامیدنی وجود دارد. انتخاب فرآیند باید بر اساس عوامل اقتصادی و قابلیت اعتماد صورت گیرد.

### حذف مواد غیرآلی

حذف مواد معدنی (Demineralization) و نمک‌زدایی (Desalinization) واژه‌های مترادفی است که در مورد مواد غیرآلی معدنی از آب به کار گرفته می‌شود. این کار در بیشتر مواقع به وسیله واحدهای تبادل یونی مرحله‌ای یا فرآیندهایی که از غشاهای نیمه‌نفوذی (Semipermeable) استفاده می‌کنند، انجام می‌شود. در هر دو روش پیش حذف تقریباً کامل جامدات معلق ضروری است.

### روش تبادل یون

در فرآیند تبادل یون مربوط به نرم کردن آب، یون‌های سدیم با یون‌های کلسیم و منیزیم تبادل می‌شود و هیچ کاهش خالصی در جامدات محلول به وجود نمی‌آید. اگر این عمل را با تبادل هیدروژن برای کاتیون‌های محلول و هیدروکسید برای آنیون‌های محلول انجام دهیم، سپس این دو با هم ترکیب شده و تشکیل آب می‌دهد و باقیمانده‌ای بجا نمانده و pH تغییر داده نمی‌شود. رزین‌ها به ترتیب با اسید و باز احیاء می‌شوند. فرآیند تبادل یون باید در دو یا چند مرحله انجام شود. به طور کلی، ابتدا کاتیون‌ها و آنیون‌ها حذف می‌شوند. به دلیل اینکه آبی که مواد معدنی آن کاملاً حذف شد مطلوب نیست، قسمتی از آب از کانال انحرافی گذرانده می‌شود و با آب خروجی فرآیند، مخلوط شده تا آب پایدار به وجود آید.

### غشاهای سوراخ ریز (Microporous membranes)

دو روش عمده بهره‌برداری مورد استفاده در حذف مواد معدنی آب به وسیله غشاهای نازک سوراخ ریز شامل: روش اسمز معکوس و روش الکترودیالیز می‌باشد.

### سیستم اسمز معکوس

اگر یک غشاء نیمه تراوا بین دو محلول با غلظت‌های متفاوت قرار گیرد، مقداری از حلال از یک غشاء به طرف دیگر منتقل می‌شود. جهت طبیعی حرکت حلال به گونه‌ای است که محلول غلیظ‌تر رقیق می‌شود. اگر به

سیستم اجازه رسیدن به تعادل داده شود، در آن صورت سطح آب نمک (محلول غلیظ‌تر) از سطح آب خالص بالاتر خواهد رفت. این اختلاف سطح در دو طرف غشاء را فشار اسمزی می‌گویند.

در اسمز معکوس، آب خام توسط پمپ به داخل محفظه‌ای که دارای غشاء نیمه تراوا است رانده می‌شود و چون ناخالصی‌ها قادر به عبور از غشاء نیستند، از این رو در یک طرف غشاء آب تقریباً خالص و در طرف دیگر، آب تغلیظ شده وجود خواهد داشت. این فرآیند برای تهیه آب آشامیدنی از آبهای که حاوی املاح معدنی زیاد و ناخالصی‌های آلی باشند، بسیار مناسب بوده است. غشای متداول در اسمز معکوس متشکل از استات سلولوز بوده و حدود ۱۰۰ میکرومتر ضخامت دارد.

در سیستم‌های اسمز معکوس سه شکل اساسی غشا استفاده می‌شود:

سیستم مارپیچی (Spiral-Wound): در آن غشا و ماده حمایت کننده در لایه‌های متناوب قرار داده می‌شود و به شکل استوانه‌ای پیچیده شده و در لوله‌هایی با ماده مناسب گذاشته می‌شود. ماده حمایت کننده متخلخل است و برای جریان‌ای مایع به عنوان حمل کننده عمل می‌کند. جدا کردن آب حاصله غلیظ به وسیله داخل لوله‌ای انجام می‌شود.

سیستم‌های لوله‌ای (Tubular): غشاء و سیستم متخلخل حمایتی به گونه‌ای شکل داده می‌شود که در داخل لوله‌ای تا قطر ۱۲۵ میلیمتر جای بگیرد. آب حاصله از حمایت کننده متخلخل برداشت می‌شود، در صورتیکه ماده غلیظ از داخل مرکز غشاء عبور می‌کند.

غشاهای فیبر خالی (Hollow-Fiber Membranes): معمولاً لوله‌های بسیار کوچک با قطر ۱ میکرومتر یا کمتر است. نسبت ضخامت دیواره به قطر، قدرت شعاعی خوبی فراهم کرده و فیبرها را می‌توان در سیال، بدون استفاده از ماده حمایت کننده، معلق کرد. آب خام در بیرون فیبر است، در صورتیکه آب حاصله از داخل مرکز برداشت می‌شود.

به طور کلی، سیستم‌های مارپیچی و فیبر توخالی میزان جریان‌های بالاتری را فراهم می‌کند، ولی بیشتر از سیستم‌های لوله‌ای احتمال گرفتگی دارد و بیشتر مواقع برای زدایش مواد معدنی آب آشامیدنی استفاده می‌شود. واحدهای لوله‌ای برای تصفیه فاضلاب مفیدتر است، چون گرفتگی غشاء را می‌توان به وسیله افزایش میزان جریان داخل لوله به حداقل رسانید.

روش اسمز معکوس قادر به جداسازی مواد آلی غیرمحلول، مواد آلی محلول، اندوکسین‌ها، ویروس‌ها، باکتریها و ذرات می‌باشد. روش اسمز معکوس به هایپرفیلتراسیون نیز معروف می‌باشد. یعنی با استفاده از این روش ذراتی

به کوچکی یونها را نیز می‌توان جداکرد. همچنین جهت زدودن نمکها و سایر ناخالصی‌های آب و بهبود رنگ، طعم و مزه می‌توان از این روش بهره گرفت. لازم به ذکر است که بیش از یک قرن است که این تکنولوژی شناخته شده است، ولی در ۶۰ سال اخیر یعنی تا زمانیکه غشاهای خاص توسعه نیافته بودند، این تکنولوژی گسترش چندانی پیدا نکرده بود.

بازدهی سیستم‌های اسمز معکوس در جامدات محلول کل، ۹۰ درصد یا بیشتر است. علاوه بر یون‌های معدنی، مولکول‌های آلی پسمانده، کدورت، باکتریها و ویروس‌ها را نیز غشاء حذف می‌کند.

### سیستم الکترودیالیز

در فرآیند الکترودیالیز برای راندن یونها به داخل غشاهای یون - گزینشی (Ion-Selective) از نیروی الکتریکی استفاده می‌شود. فرآیند الکترودیالیز، از یک سری غشاهای ساخته شده از رزین تبادل یون استفاده می‌کند. این غشاها به طور گزینشی یونها را انتقال می‌دهد. یک نوع غشای قابل نفوذ برای کاتیونها می‌باشد، یعنی به کاتیونها اجازه عبور داده و آنیونها را متوقف می‌کند و نوع دیگر برای آنیونها قابل نفوذ است و کاتیونها را متوقف می‌کند. غشاهای واحد الکترودیالیز تقریباً ۰/۵ میلی‌متر ضخامت داشته و با جدا کننده‌های متخلخل با ضخامت ۱ میلی‌متر جدا می‌شوند. آب از داخل جداکننده‌های متخلخل جاری می‌شود.

برای بازدهی حذف ۲۵-۶۰ درصد، زمان تماس ۱۰ تا ۲۰ ثانیه لازم است. برای افزایش بازدهی، سلول‌ها به دنبال هم و برای ایجاد جریان لازم به موازات یکدیگر قرار داده می‌شوند. در شرایط ایده‌آل، تقریباً ۹۰ درصد آب ورودی، یون‌زدایی شده و یونها در ۱۰ درصد باقیمانده متمرکز می‌شوند.

هر دو نوع اسمز معکوس و الکترودیالیز قبل از کاربرد، به درجه بالایی از تصفیه نیاز دارند. حذف جامدات معلق کاملاً لازم بوده و حذف مواد آلی محلول برای جلوگیری از گرفتگی (Fouling) ضروری است. اصلاح pH به گستره تقریباً اسیدی برای جلوگیری از ته‌نشینی مواد معدنی لازم است. به طور کلی، اسمز معکوس نسبت به الکترودیالیز آب خروجی با کیفیت بهتری تولید می‌کند، اگرچه هزینه آن نیز زیادتر است. هر دو روش، پساب آلوده‌ای که گستره‌ای از ۱۰ تا ۲۵ درصد آب ورودی را دارد، تولید می‌کند. در هر دو سیستم تصفیه آب و فاضلاب، جریان‌های فاضلاب غلیظ باید به طور مناسب دفع شود.

### حذف مواد آلی

مواد آلی مقاوم را می‌توان به وسیله فرآیندهای جذب سطحی و اکسیداسیون شیمیایی حذف کرد. این فرآیندها تقریباً برای تصفیه آب و فاضلاب یکسان است.

#### ۷-۱-۲-۱- جذب سطحی

جذب سطحی را می‌توان به تجمع مواد در سطح مشترک بین دو فاز تعریف کرد. در تصفیه آب و فاضلاب، این سطح مشترک بین مایع و جامدی است که بطور مصنوعی ایجاد شده است. ماده حذف شده از مایع، جذب شده (Adsorbate) و ماده فراهم کننده سطح جامد، جذب کننده (Adsorbent) نامیده می‌شود. کربن فعال، متداول‌ترین جاذب مورد استعمال در تصفیه آب و فاضلاب است.

#### ۷-۱-۲-۲- اکسیداسیون شیمیایی

اکسیداسیون شیمیایی ترکیبات آلی مقاوم را می‌توان به عنوان یگ گزینه حذف مواد آلی در سیستم آب و فاضلاب استفاده کرد. مولکول‌های بزرگ و پیچیده آلی و دترجنت‌های حلقوی و ترکیبات فنلی و هیومی را می‌توان با مواد اکسید کننده قوی نظیر ازن یا کلر به ترکیبات ساده‌تری تبدیل کرد. اکسیداسیون اضافی‌تر به وسیله روش‌های شیمیایی یا بیولوژیکی ممکن است منجر به محصولات پایانی پایدار شود. از امتیازات این فرآیند، حذف آمونیاک، اکسیداسیون مواد غیرآلی همچون آهن و منگنز و ضدعفونی کردن را می‌توان نام برد. کاربرد ازن برای اکسیداسیون شیمیایی و ضدعفونی کردن در سیستم‌های تصفیه آب، به صورت توأمان انجام می‌گیرد. در سیستم‌های تصفیه فاضلاب، اکسیداسیون شیمیایی از لحاظ قیمت در صورتیکه بعد از تصفیه ثانویه یا بعد از تصفیه پیشرفته باشد، موثر است.

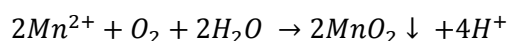
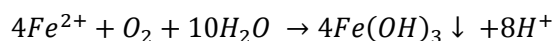
## ۸- هوادهی و اصول و کاربرد آن در تصفیه آب

افزایش سطح مابین آب یا هوا را به منظور انتقال گاز، هوادهی گویند. هوادهی به دو منظور، جداسازی گازهای نامطلوب محلول و نامحلول در آب و افزایش اکسیژن محلول به آب به منظور اکسیداسیون مواد نامطلوب، صورت می‌گیرد. آب زیرزمینی ممکن است مقادیر قابل توجهی از گازهای دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ ) و هیدروژن سولفید ( $H_2S$ ) را در خود داشته باشد. مهمترین گازهایی که ممکن است در آب‌ها و یا فاضلاب‌ها وجود داشته باشند:

$CO_2$ : باعث افزایش اسیدیته آب (آب حالت خورندگی پیدا می‌کند) شده و می‌تواند در فرآیندهای دیگر تصفیه تداخل ایجاد نماید. مثلاً در ترکیب با آهک در فرآیند سختی زدایی شیمیایی مقدار زیادی از آهک را خنثی می‌کند، لذا موجب مصرف بیشتر آهک در این فرآیند می‌گردد.

$H_2S$ : گازی بسیار سمی که باعث مسمومیت انسان می‌شود. با کلر آزاد ترکیب شده و میزان مصرف کلر را در فرآیند گندزدایی افزایش می‌دهد. میزان خورندگی آب را افزایش داده و باعث خوردگی تاسیسات آب می‌شود. این گاز حتی در غلظت کم نیز باعث ایجاد طعم و بوی نامطبوع در آب می‌شود. اگر چه این گاز به مقدار کم در شرایط اتمسفری قابل حل است، ولی آب زیرزمینی ممکن است محتوای مقادیر بیشتری در فشارهای معمول حاکم در لایه‌های آب زیرزمینی باشد.

آهن و منگنز عناصر معمولی هستند که به میزان زیادی در طبیعت پخش شده‌اند. در عدم حضور مواد اکسید کننده، هر دوی این عناصر در آب قابل حل می‌باشند. به علت ترکیب با یون‌های محلول دیگر، آهن و منگنز فقط در حالت اکسیداسیون +۲ یعنی ( $Mn^{+2}$  &  $Fe^{+2}$ ) به مقدار قابل ملاحظه‌ای قابل حل می‌باشند. آهن و منگنز به هنگام تماس با اکسیژن یا هر ماده اکسید کننده دیگر به ظرفیت‌های بالاتری اکسید می‌شوند و تشکیل مجموعه‌های یونی نامحلول را می‌دهند. بدین ترتیب آهن و منگنز بعد از هوادهی به صورت رسوب حذف می‌گردند.



در هر دو واکنش، pH محلول به وسیله تولید یون‌های هیدروژن پایین می‌آید. هوادهی، اکسیژن لازم برای تبدیل این دو عنصر به فرم غیر قابل حل را تامین می‌کند. اکسید کننده‌های شیمیایی، همچون پرمنگنات پتاسیم نیز می‌توانند برای این منظور استفاده شوند. این مواد در برخی مواقع همراه با هوادهی جهت تسریع

فرآیند استفاده می‌شوند. وقتی که هوادهی برای رسوب‌دهی آهن و منگنز استفاده می‌شود، تصفیه اضافی دیگری برای حذف جامدات رسوب شده لازم است.

گازدایی و اکسیداسیون، تابع قواعد انتقال گاز هستند. لذا فهم قواعد انتقال گاز برای طراحی هواده لازم است. حلالیت یک گاز در تعادل با مایع، به وسیله قانون هنری تعیین می‌شود و از لحاظ ریاضی به طریق زیر نشان داده می‌شود.

x: جزء مولی تعادل از گاز محلول در ۱ اتمسفر

P: فشار گاز بالای مایع

x

H: ضریب جذب (ضریب هنری که برای هر سیستم

گاز-مایع فرق می‌کند)

$$x = \frac{\text{تعداد مول گاز } (n_g)}{\text{تعداد مول گاز } (n_g) + \text{تعداد مول مایع } (n_l)}$$

عوامل دیگری که بر روی x تاثیر می‌گذارد شامل دما (با کم شدن دما قابلیت انحلال افزایش پیدا می‌کند) و غلظت دیگر گازها و جامدات محلول (با افزایش دیگر مواد محلول در مایع، قابلیت انحلال کم می‌شود) می‌باشند. اگر محیط گازی مجاور مایع، حاوی مخلوطی از گازها باشد، هر گاز، جزء مولی تعادلی‌اش را خواهد داشت. بر طبق قانون دالتون، هر گاز موجود در مخلوط، فشار جزئی‌اش به نسبت درصد حجمی‌اش در مخلوط بستگی دارد. یعنی:

$$PV = (P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n)V \text{ یا } P = \sum P_i$$

با جایگزین کردن در قانون هنری، می‌بینیم که x برای گاز i موجود در مخلوط عبارت است از:

x<sub>i</sub>: جزء مولی تعادل

$$x_i = \frac{P_i}{H_i}$$

P<sub>i</sub>: فشار جزئی گاز

H<sub>i</sub>: ضریب جذب

در هوادهی میزان انتقال گاز پارامتر مهمی است. میزان انتقال گاز تحت تاثیر چند عامل قرار می‌گیرد و از لحاظ ریاضی به طریق زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{dC}{dT} = (C_s - C) \cdot K_a$$

dC/dT: میزان لحظه‌ای تغییر غلظت گاز در مایع

$C_s$ : غلظت اشباع

$C$ : غلظت واقعی

$K_a$ : ثابت مربوط به موقعیت‌های فیزیکی

خروج گاز از مایع موقعی صورت می‌گیرد که  $C$  بیشتر از  $C_s$  است. مقدار  $K_a$  به دمای سیستم، مساحت سطح مشترک موجود بین انتقال گاز و مقاومت در برابر حرکت از یک فاز به فاز دیگر بستگی دارد.

در اکثر آب‌های طبیعی، جنبش کافی در فازها وجود دارد و لایه‌ها عوامل محدود کننده می‌شوند. به طور کلی، گازهایی که قابلیت حل آنها در آب خیلی زیاد است مانند آمونیاک، در عبور از لایه گاز با مقاومت بیشتری مواجه می‌شوند که به این فرآیند کنترل شونده به وسیله لایه گاز گفته می‌شود. بر عکس، گازهایی مانند نیتروژن و اکسیژن که قابلیت حل آنها در آب ناچیز است، در طرف لایه مایع با مقاومت بیشتری مواجه می‌شوند و به آن سیستم کنترل شونده به وسیله لایه مایع در رابطه با این گازها گفته می‌شود. گازهای قابلیت انحلال متوسط، مانند سولفید هیدروژن در عبور از دو لایه با مقاومت یکسانی مواجه شده و به این سیستم‌ها کنترل شونده به وسیله آمیختگی لایه‌ها گفته می‌شود.

سیستم‌های تماس مایع-گاز برای حرکت هر چه سریعتر مخلوط آب-گاز به طرف حالت تعادل به منظور گاززدایی و جهت فراهم کردن حالت فوق اشباع اکسیژن به منظور اکسیداسیون طراحی می‌شود. تحقق این اهداف ممکن است به وسیله پخش آب در هوا یا پخش هوا در داخل آب صورت گیرد. در تصفیه‌خانه‌های آب، سیستم‌های آب در هوا شامل فواره‌ها، برج‌های آبشاری (Cascade) یا برج‌های بشقابی (Tray) می‌باشد. فواره‌ها شامل لوله مشبک معلق بر فراز مخزن گیرنده می‌باشند. افشانک‌های قرار داده شده در تقاطع لوله‌ها برای هدایت تخلیه آب به طرف بالا ثابت می‌گردند. زمان تماس هوا-آب به وسیله فشار داخل لوله‌ها تعیین می‌شود، در صورتیکه نحوه پخش به وسیله خصوصیات افشانک تعیین می‌شود. قطر افشانک بین ۲ تا ۴ سانتی‌متر می‌باشد. پارامترهای طراحی برای هوادهی فورانی شامل فشار سیستم، فاصله‌گذاری افشانک‌ها و میزان دبی هر افشانک می‌باشد.

برج‌های آبشاری شامل یک سری آبریزها می‌باشند که در مخازن کوچک می‌ریزند. در این مورد آب به شکل قطره پخش نمی‌شود، اما با اتمسفر به شکل لایه‌های نازک به هنگام پایین آمدن از هر پله تماس پیدا می‌کند. هر پله در برج آبشاری معمولاً ۰/۳ متر ارتفاع دارد و ممکن است تا ۱۰ پله در هر برج وجود داشته باشد.

برج‌های بشقابی مشابه برج‌های آبشاری هستند. در این سیستم‌ها آب بالا برده می‌شود و به ارتفاع پایین‌تر ریزش می‌کند. برج‌های بشقابی با سطوح جامدی که آب در حرکت به طرف پایین از روی آنها می‌گذرد به جای برخورد با مخزن‌ها، با جریان برخورد می‌کنند. برج‌های بشقابی، بیشتر برای اکسیداسیون آهن و منگنز مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً پرانه‌های بشقابی قطعه‌های بزرگ کک (Cock) بوده که قبلاً به وسیله اکسید کننده‌هایی مانند پرمنگنات پتاسیم پوشش داده شده‌اند و این برای کمک به شروع فرآیند اکسیداسیون است.

روش دیگر هوادهی آب، پخش هوا در داخل آب است. جذب و واجذبی با به ماکزیمم رساندن مساحت سطح مشترک که در این مورد به معنی به حداقل رساندن اندازه حباب هوا می‌باشد، انجام می‌گیرد. سیستم‌های هوا در آب غالباً از تانک‌های با عمق ۲ تا ۵ متر تشکیل شده است که هوا از طریق کف تزریق می‌گردد. ظرفیت دمنده باید برای رساندن حجم مورد نیاز هوا در فشار تعیین شده به وسیله افت فشار در مکانیسم توزیع کننده، به اضافه عمق آب کافی باشد. این نوع هوادهی بیشتر در تصفیه فاضلاب کاربرد دارد.

