

Organic Matter Removal by Enhanced Coagulation Process

Vaezi, F. Ph.D., Assist. Prof., Department of Environmental Health.

Tehran University of Medical Sciences.

Mohagheghian, A., Environmental Health Engineer

Abstract

Removal of organic matter is one of the most important objective for water treatment plants. However, reduction of these pollutants either present in the form dissolved or suspended solids is not so efficient as required in conventional water treatment plants. As a result of the Disinfectant, Disinfection by - products Rule there has been increasing emphasis by the water industry on the removal of NOM because most of them are precursors of dangerous disinfection - by - products. Recognizing the goal of minimizing the organic content of drinking water as an important treatment objective needs that the control process for existing plants be reevaluated. Modifying the coagulation process in treatment plants in which iron or aluminum salts are used as coagulants, offers an interesting alternative in controlling the organohalogenated compounds in finished water. The modifying process is performed by changing the pH of treatment which is known as enhanced coagulation. In this article, the process of enhanced coagulation is described.

تنظیم شرایط انعقاد در جهت

حذف مؤثر مواد آلی از آب‌های سطحی

فروغ واعظی*

آزیتا محقیان**

چکیده

روش‌ها و فرایندهای معمول تصفیه آب همواره نمی‌توانند کیفیت آب را از نقطه نظر کاهش مواد آلی اعم از محلول و نامحلول تا حد مجاز تضمین نمایند. حذف مواد آلی که به طور طبیعی در آب‌های سطحی یافت می‌شوند به ویژه از این نقطه نظر که اغلب پیش‌ساز ترکیبات خطرناک ارگانوهایالوژنه هستند برای حفظ کیفیت آب آشامیدنی حائز کمال اهمیت است و با وضع قانون گندزداها، فرآورده‌های جانبی گندزدایی، تأکید بر حذف این ترکیبات در تصفیه‌خانه‌های آب بیشتر شده است. این مطلب لزوم ارزیابی جدیدی را از مراحل کنترل در روند تصفیه متعارف و در شرایطی که تغییر طراحی تصفیه‌خانه‌ها امکان‌پذیر نباشد مطرح می‌سازد.

یک تلاش قابل توجه برای کاهش خطر ترکیبات ارگانوهایالوژنه از تصفیه‌خانه‌های آب که از املاح آهن یا آلومینیوم برای انعقاد و از کلر به عنوان گندزدا استفاده می‌کنند، اصلاح مرحله انعقاد می‌باشد. این عمل معروف به انعقاد تنظیم شده است. در این مقاله انعقاد تنظیم یافته که می‌تواند با انجام تغییرات pH طی مرحله انعقاد آب‌های سطحی در تصفیه‌خانه‌های متعارف صورت گیرد معرفی شده است.

مقدمه

وجود مواد آلی در منابع آب همواره برای تصفیه‌خانه‌های آب شرب مسئله‌ساز بوده است. مهمترین دلایل ذکر شده عبارتند از: نقش این مواد در انتقال و تغلیظ آلاینده‌های مختلف، زمینه‌سازی در تشکیل رشد میکروبی در سیستم‌های آبرسانی و در نهایت نقشی که به عنوان پیش‌ساز تشکیل فرآورده‌های جانبی خطرناک بعد از کلرزنی دارند. بخش عمده‌ای از مواد آلی موجود در منابع آب را مواد طبیعی تشکیل

می‌دهد و هر چند توجه اولیه در حذف این دسته از مواد به خاطر رفع رنگ و بوی بد آب بوده است اما با وضع قانون گندزدا^۱ فرآورده‌های جانبی گندزدایی بیشترین توجه به رفع مشکل وجود مواد پیش‌ساز معطوف شد و به این لحاظ راهکارهای متعدد به تصفیه‌خانه‌های آب معرفی گردید. از

* - استادیار گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تهران

** - کارشناس ارشد بهداشت محیط

1- Disinfectant/Disinfection-by-Products Rule (D/DBPs Rule)

جمله روش‌های پیشنهادی که دارای قابلیت اجرا در تصفیه‌خانه‌های دایر می‌باشد انعقاد تنظیم یافته است. واژه انعقاد تنظیم یافته^۱ بر اصلاح فرایند انعقاد جهت نیل به حذف بهتر مواد آلی طبیعی از آب دلالت دارد [۱]. برای بهبود مرحله انعقاد به طرق مختلف می‌توان اقدام نمود، در این مقاله روش‌های پیشنهادی معرفی شده است.

مواد آلی به عنوان آلاینده‌های مهم آب آشامیدنی

گروه‌های مختلفی از ترکیبات آلی دارای نقش‌های متفاوت در آلوده‌ساختن آب هستند و گاه وجود حدود یک میلی‌گرم در لیتر از بسیاری از این مواد می‌تواند آب را ناسالم نماید. در حال حاضر از مهمترین دلایل حذف مواد آلی از آب آشامیدنی فهرست بلندبالای استانداردهای اعلام شده از طرف سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا است. این فهرست با توجه به اصلاحیه قانون آب آشامیدنی سالم^۲ در سال ۱۹۸۶ منتشر شده است. تا پیش از این تاریخ و در نخستین مقررات وضع شده توجه چندانی به مواد آلی ملاحظه نمی‌شد. اما سه تحول در دو دهه گذشته موجب جلب توجه به این مواد گردید که عبارتند از [۲]:

- ۱- کسب قابلیت بیشتر در تشخیص و سنجش غلظت‌های ناچیز آلاینده‌های آلی در آب
- ۲- افزایش توجه عمومی به مخاطرات حضور این مواد
- ۳- توجه به اثرات مزمن حاصل از شرب مقادیر جزئی این آلاینده‌ها.

اما مهمترین انگیزه در بررسی و جستجوی مواد آلی در آب‌های آشامیدنی به خاطر کشف کلروفورم و دیگر تری‌هالومتان‌ها بوده است و کلاً از سال ۱۹۷۰ به بعد دو گروه از مواد آلی مورد توجه خاص سازمان‌های بهداشتی دنیا قرار گرفت [۳]، این دو گروه عبارت بودند از:

- ۱- مواد آلی سنتتیک^۳ که عمدتاً ناشی از آلودگی آب‌های سطحی به فضولات صنعتی هستند
- ۲- آلاینده‌های آلی به وجود آمده طی مرحله گندزدایی آب یعنی فرآورده‌های جانبی گندزدایی که در تصفیه‌خانه‌های متعارف عمدتاً ناشی از اکسیداسیون مواد آلی طبیعی^۴ به وسیله

کلر هستند [۳].

مواد آلی ناشی از تخلیه آلودگی‌های صنعتی به محیط معمولاً با تنوع زیاد ولی تحت مقادیر جزئی در آب‌های سطحی یافت می‌شوند و با اجبار صنایع به رعایت قانون آب پاک^۵ از میزان این مواد در آب به نحو چشمگیر کاسته شده است. اما مواد آلی طبیعی مخلوط پیچیده‌ای است که در همه منابع آب یافت می‌شوند و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متنوعی را نشان می‌دهند. بخش عمده مواد آلی طبیعی گیاجاکی (هوموس، اسیدهای هومیک و فولویک و هیما توملانیک) است که از تجزیه گیاهان در خاک حاصل می‌شود. این مواد از مهمترین ترکیبات پیش‌ساز فرآورده‌های جانبی گندزدایی^۶ محسوب می‌شوند. لذا می‌توان گفت فرآورده‌های جانبی دسته‌ای خاص از مواد سنتتیک هستند که عمدتاً از مواد آلی طبیعی سرچشمه گرفته و در تصفیه‌خانه‌های متعارف بعد از اکسیداسیون مواد آلی به وسیله کلر به وجود می‌آیند. این ترکیبات اکثراً منصوب به سرطان‌زایی هستند [۳].

مشکلات حذف مواد آلی در سیستم معمول تصفیه آب

حذف مواد آلی از آب در تصفیه‌خانه‌های آب شرب به علت تنوع خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و وجود غلظت‌های ناچیز غالباً مشکل و پرخارج است. این مواد که در آب‌های طبیعی آلوده نشده به فاضلاب‌ها در نتیجه تجزیه گیاهان در خاک‌ها سرچشمه گرفته‌اند به علت نقش مشخص شده در تشکیل خطرناک‌ترین فرآورده‌های جانبی در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتر قرار گرفته‌اند [۲]. در یک تصفیه‌خانه متعارف، انعقاد مهمترین مرحله از نقطه نظر حذف آلاینده‌های آلی محسوب می‌شود که به روش معمول با استفاده از املاح آهن یا آلومینیوم و با هدف اصلی حذف کدورت از آب‌های سطحی انجام می‌شود. در این مرحله بخشی از مواد آلی طبیعی

1- Enhanced Coagulation 2- Safe Drinking Water Act
3- Synthetic Organic Chemicals (SOCs)
4- Natural Organic Matters (NOMs)
5- Clean Water Act. (CWA)
6- Disinfection - by - Products (DBPs)

نیز حذف می‌شود. هر چند به روش معمول (تنظیم pH آب و میزان منعقد کننده جهت حذف حداکثر کدورت) کمتر از نصف میزان آلاینده‌های آلی برطرف می‌شود اما چون نوع این آلاینده‌ها به خاطر درشتی و شکل مولکول آنها به گونه‌ای است که معمولاً به راحتی به وسیله گرانول کربن فعال^۱ قابل رفع نیستند [۴]، اهمیت مرحله انعقاد در بالا بردن کارایی تصفیه مشخص می‌گردد. این آلاینده‌ها شامل رنگ، تعدادی از مواد پیش ساز فرآورده‌های جانبی، مواد آلی سنتتیک از نوع هیدروفوب و برخی از فلزات سمی هستند [۴]. در جدول ۱ خصوصیات مؤثر از این مواد از لحاظ حذف از طریق انعقاد و جذب روی کربن فعال معرفی شده است. باید توجه داشت که مواد آلی طبیعی حتی اگر به صورت نامحلول باشند به علت این که عمدتاً به شکل کلوئیدی از نوع آب دوست ظاهر می‌شوند حذف مورد انتظار را نشان نمی‌دهند [۲]. مسئله‌ای که موجب تغییر وضعیت مواد

آلی از حالت یک ذره واحد می‌شود، پدیده هیدراتاسیون می‌باشد، به این ترتیب لایه‌ای از آب به ضخامت یک مولکول اطراف کلوئیدهای آلی را احاطه می‌کند و البته این امکان نیز وجود دارد که تعداد بیشتری از مولکول‌های آب، دور ذره را بگیرند که ارتباط آنها مانند اولین لایه آب محکم نخواهد بود. هیدراتاسیون موجب افزایش حجم و قطر ذرات آلی و تغییر دانسیته آنها می‌شود. با نزدیک شدن دانسیته ماده آلی به دانسیته آب، جداسازی سوسپانسیون کلوئیدی از طریق شناور یا ته‌نشین سازی مشکل می‌گردد [۲]. به هر ترتیب باید قبول کرد که کارایی انعقاد معمول که با هدف حذف حداکثر مواد معلق صورت می‌گیرد بیشتر محدود به حذف مواد آلی با وزن مولکولی بالا، هیدروفوب و اسیدی بوده است [۵].

1- Granular Activated Carbon (GAC)

جدول ۱ - خصوصیات مؤثر مواد آلی از نقطه نظر حذف طی انعقاد و جذب روی کربن فعال [۵]

آلاینده	روش تصفیه	نتایج تصفیه
NOM	تصفیه متداول، فیلتراسیون مستقیم، سختی‌گیری	مواد با وزن مولکولی بیشتر دارای قابلیت حذف بهتر، بخش دارای بیشترین اسید کربوکسیلیک مشکل تر حذف می‌شود. انواع مواد آب گریز بهتر حذف می‌شوند. مواد با وزن مولکولی کمتر از ۵۰۰ به خوبی حذف نمی‌شوند. پیش سازهای THM حذف خوبی نشان می‌دهند.
NOM	انعقاد با آلوم	پیش سازهای THM و انواع با وزن مولکولی بیشتر راحتتر حذف می‌شوند.
NOM	انعقاد با آلوم و سولفات فریک	انواع با وزن مولکولی بیشتر بهتر حذف می‌شوند.
NOM	انعقاد (آلوم، املاح آهن، پلیمر، آب آهک)	حذف بهتر مواد با وزن مولکولی بیشتر، آب گریز و دارای اجزای خنثی، حذف ضعیف پیش سازهای THM با وزن مولکولی کم
NOM	انعقاد (سولفات فریک)	حذف بهتر مواد با وزن مولکولی بیشتر، حذف بهتر ترکیبات یونی در برابر ترکیبات خنثی، حذف بهتر اجزای آب گریز و آب دوست در برابر ترکیبات خنثی، باقی ماندن ترکیبات خنثی با وزن مولکولی کم در آب تصفیه شده
گیاخاک	انعقاد (آلوم)	حذف مشکلتر مواد با وزن مولکولی کمتر و با مصرف بیشتر منعقد کننده
گیاخاک	جذب روی GAC	حذف مشکل تر مواد با وزن مولکولی بیشتر، ارتباط معکوس جذب با اسیدیته کاربوکسیلیک
اسید هیومیک	انعقاد با آلوم، با و بدون افزایش آن	حذف بهتر مواد با وزن مولکولی بیشتر افزایش گروه‌های اسیدی و کاهش حذف DOC طی ازن زنی

مقررات وضع شده برای محدود سازی میزان مواد آلی در آب

با انتشار اصلاحیه قانون آب آشامیدنی سالم برای ۵۰ ماده آلی (۱۳ ماده فرار و ۳۷ ماده سنتتیک) حداکثر میزان آلاینده‌ها^۱ اعلام و متعاقباً انجام عملیات تصفیه جهت کاهش مقادیر آنها در آب الزامی گردید. تا پیش از این تاریخ یعنی سال ۱۹۸۹، رعایت این حداکثر صرفاً برای ۲۲ نوع آلاینده اجباری بوده است [۴]. از مهمترین مواد آلی فهرست مزبور که آب تصفیه شده با کلر به عنوان عامل اصلی تماس آنها با انسان قلمداد می‌شوند ترکیبات ارگانو هالوژنه نظیر تری هالومتانها^۲ هستند. پیش ساز اکثر ترکیبات ارگانو هالوژنه، ترکیبات گیاخاک می‌باشند. هم زمان در رهنمودهای سازمان جهانی بهداشت نیز بی‌خطر بودن آب برای مصرف کنندگان حتی برای ترکیباتی که در درازمدت بیماری‌زا هستند مورد توجه قرار گرفت.

سرانجام با وضع قانون گندزداها/فرآورده‌های جانبی گندزدایی در مرحله نخست حداکثر میزان آلاینده برای مجموع تری هالومتانها از ۱/۰ به ۰/۰۸ میلی‌گرم در لیتر کاهش مقدار یافت و برای مجموع اسیدهای هالواستیک نیز میزان ۰/۰۶ میلی‌گرم در لیتر مقرر گردید [۶]. قانون اخیر بر خلوص آب از نظر مواد آلی پیش از ورود به مرحله اکسیداسیون با گندزدایی با کلر تأکید دارد و فرایند انعقاد تنظیم شده را به عنوان راهکار کنترل مناسب جهت حذف مواد آلی طبیعی و در نتیجه کنترل فرآورده‌های جانبی گندزدایی توصیه می‌نماید [۱].

راهکارهای معرفی شده برای کنترل مواد آلی

حذف مواد آلی طبیعی که مهمترین ترکیبات پیش ساز فرآورده‌های جانبی گندزدایی هستند در ردیف مهمترین تلاش‌های صورت گرفته جهت بهبود کیفیت آب در دو دهه اخیر محسوب می‌شود. بخشی از مواد پیش ساز محلول هستند (کربن آلی محلول^۳) و بهینه‌سازی حذف این مواد پیش از افزودن گندزدا^۱ اکسید کننده به عنوان منطقی‌ترین راهکار کنترل فرآورده‌های جانبی گندزدایی در سیستم‌های متداول معرفی می‌شود. سایر راهکارها عبارتند از تغییر نوع گندزدا^۱ اکسید کننده و حذف فرآورده‌های جانبی بعد از شکل‌گیری در

تصفیه‌خانه.

در حال حاضر روش‌های حذف مواد پیش ساز شامل اصلاح تصفیه متعارف، فرایندهای اکسیداسیون، جذب و غشایی می‌باشند.

تصفیه متعارف^۴ (انعقاد / لخته‌سازی / ته‌نشین سازی / فیلتراسیون) را می‌توان جهت حذف مواد پیش ساز از طریق تبدیل مواد آلی محلول آب به ترکیبات قابل رسوب یا صاف شدن اصلاح نمود.

روش‌های افزایش کارایی مرحله انعقاد آب‌های سطحی به این منظور عبارتند از [۷]:

۱- انتخاب نوع و تنظیم میزان مناسب منعقد کننده
۲- کاهش pH انعقاد
۳- کاربرد پلیمرها به عنوان منعقد کننده و یا به عنوان کمک فیلتر

۴- افزایش پودر کربن فعال به مرحله اختلاط سریع با هدف اصلی حذف مواد آلی
۵- تنظیم شرایط اختلاط.

اصلاح مرحله انعقاد جهت حذف هر چه بهتر مواد آلی موجود در آب است و به نام انعقاد تنظیم شده شناخته می‌شود. به این منظور میزان منعقد کننده و یا pH انعقاد ضمن مراقبت بر عدم بروز زیان در حذف مواد کدورت‌زا جهت حذف هر چه بیشتر مواد آلی تنظیم می‌گردد.

انجام انعقاد تنظیم شده و بیشتر روش‌های فوق بدون نیاز به تخصیص هزینه هنگفت امکان‌پذیر است و لذا توسل به این روش‌ها می‌بایست پیش از اتخاذ راهکارهای دیگر مورد توجه قرار گیرد [۷].

محل افزایش منعقد کننده به آب نیز می‌تواند بر نتیجه نهایی تصفیه مؤثر باشد. چنانچه عمل اکسیداسیون با ازن پیش از انعقاد صورت گیرد نتایج کار رضایت بخش تر خواهد بود، چون اکسید کننده‌هایی نظیر ازن موجب تغییر خصوصیات

1- Maximum Contaminant Level (MCL)
2- Trihalomethanes (THMs)
3- Dissolved Organic Carbons (DOCs)
4- Conventional Water Treatment

آلاینده‌های آلی می‌شوند. اما چنانچه کلر در پیش تصفیه آب استفاده می‌شود، بهتر است انعقاد قبل از کلرزنی صورت گیرد تا از میزان موادی که ممکن است بعد از کلرزنی به ترکیبات خطرناک تبدیل شوند کم گردد [۴].

ضرورت بهبود فرآیند انعقاد جهت حذف بهتر مواد آلی

تعداد نسبتاً کمی از تصفیه‌خانه‌ها در کشورهای پیشرفته این تجربه را به دست آورده‌اند که اصلاح روش‌های انعقاد جهت حذف بیشتر مواد آلی طبیعی برای آنها از نظر اقتصادی به صرفه است و به بیان دیگر در هزینه‌ای که صرف می‌شود منافع زیادی حاصل می‌شود.

همان‌طور که ذکر شد، وضع قوانین متعدد شرایط سختتری را به تصفیه‌خانه‌های آب تحمیل نموده است که مستلزم مراقبت بیشتر در نحوه انجام انعقاد می‌باشد. مسلماً تصفیه‌خانه‌هایی که قادر به افزایش کارایی حذف آلاینده‌های آلی صرفاً با اعمال نوعی تغییر در روند متعارف انعقاد باشند موفق به صرفه جویی در مخارج مربوط به کاربرد سایر روش‌ها نظیر حذف توسط گرانول کربن فعال خواهند بود [۵].

تصفیه‌خانه‌هایی می‌توانند خود را با مقررات فرایند انعقاد تنظیم شده هماهنگ نمایند که بتوانند کل کربن آلی را پیش از کاربرد گندزدا تا درصد معین حذف کنند و رقم را به کمتر از ۲ میلی‌گرم در لیتر برسانند. برای این تصفیه‌خانه‌ها استفاده از ازن و دی‌اکسید کلر پیش از انجام انعقاد مشروط به این که شاخص‌هایی خاص وجود داشته باشد مجاز است.

به عنوان مرحله یک از قانون پیشنهادی

گندزدا/فراورده‌های جانبی گندزدایی از یک ماتریس کلیانیت ۳×۳ با توجه به خصوصیات آب منبع مورد تصفیه استفاده می‌شود (جدول ۲).

کاهش TOC^۱ (به عنوان جایگزین در معرفی پیش‌سازهای فراورده‌های جانبی) تا حدود مقرر در قانون مزبور با تخصیص حداقل هزینه‌های لازم با انجام انعقاد تنظیم یافته در نظر گرفته شده است. درصد حذف مواد آلی وقتی بیشتر است که TOC اولیه آب خام بیشتر بوده باشد.

انعقاد بهتر توسط آلوم در دامنه ۵-۶ pH است و برای نیل به این دامنه pH تصفیه‌خانه‌هایی که آب‌هایی با کلیانیت زیاد را تصفیه می‌کنند می‌بایست محتمل مخارج بیشتری از مواد شیمیایی شوند. لذا مشکلات حذف TOC با افزایش کلیانیت آب افزایش می‌یابد. تصفیه‌خانه‌ها می‌توانند از طریق افزایش مقادیر بیشتر از یک منعقدکننده یا افزایش یک اسید در کنار منعقدکننده خود را با قانون گندزدا / فراورده‌های جانبی گندزدایی هم‌آهنگ نمایند [۱].

تنظیم انعقاد برای حذف بهتر مواد آلی با انتخاب نوع و میزان مناسب منعقدکننده

اولین قدم جهت بهینه‌سازی مرحله انعقاد این است که بهترین نوع منعقدکننده و میزان مناسب آن تحت شرایط استاندارد اختلاط برای تصفیه نمونه آب مورد نظر مشخص شود. تمامی منعقدکننده‌های معرفی شده می‌توانند هم‌زمان با حذف کدورت بخشی از مواد آلی موجود در نمونه‌های آب را حذف کنند [۵].

1- Total Organic Carbon

جدول ۲- درصد‌های حذف مقرر از مواد آلی (TOC) در مرحله اول از فرایند انعقاد تنظیم یافته [۱]

کلیانیت آب (میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم)			TOC بر حسب میلی‌گرم در لیتر
>۱۲۰	>۶۰-۱۲۰	۰-۶۰	
%۲۰	%۳۰	%۴۰	>۲/۰-۴/۰
%۲۵	%۳۵	%۴۵	>۴/۰-۸/۰
%۳۰	%۴۰	%۵۰	>۸/۰

با این حال در حذف اختصاصی مواد آلی باید توجه داشت که گاه عملکرد دو منعقدکننده که به طور یکسان قادر به کاهش کدورت هستند در حذف مواد آلی کاملاً محلول می‌تواند به طور بارزی متفاوت باشد. مثلاً به نظر می‌رسد املاح فلزی در مقایسه با پلیمرهای کاتیونی کارایی بیشتری در حذف مولکول‌های دارای وزن کمتر که حاوی گروه‌های اسیدی هستند داشته باشند [۵]. به طور کلی فلاک‌های ژلاتینی ایجاد شده از افزودن املاح آهن و آلومینیوم قابلیت زیادی در جداسازی مواد آلی محلول و نامحلول دارا هستند. در این حالت مکانیزم حذف انواع محلول ترکیبی از جذب سطحی روی هیدروکسیدهای جامد و ترسیب شیمیایی خواهد بود [۸]. عوامل مؤثر در برتری یک نوع منعقدکننده بر نوع دیگر عبارتند از: pH نمونه آب و طریقه کنترل آن، مجموعه یون‌های آلی و معدنی موجود در آب‌های مورد تصفیه و آنیون همراه فلز منعقدکننده [۱]. به عنوان مثال املاح آلومینیوم غالباً در pH‌های ۵-۶ برتری مشخصی بر املاح آهن نشان می‌دهند. البته تحقیقات متعدد در زمینه تعیین بهترین نوع منعقدکننده جهت کاهش TOC آب‌های سطحی نشان داده است که املاح فریک در حذف کلی مواد طبیعی به طور بارزی مؤثرتر از آلوم عمل نموده‌اند. دامنه میزان کل کربن آلی در نمونه‌های آب مورد بررسی ۱۱-۲ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است [۶].

در نظر گرفتن خصوصیات آب خام مؤثرترین طریقه در کاربرد صحیح منعقدکننده‌هاست. حذف مواد آلی طبیعی توسط املاح فلزی معمولاً از یکی از دو الگوی شکل ۱ تبعیت می‌کند. در الگوی اول عمل حذف بسیار سریع و به تناسب با کاربرد مقداری خاص از منعقدکننده افزایش می‌یابد یا تدریجاً با افزایش مقدار منعقدکننده افزایش یافته و سپس به حداکثر خود می‌رسد (الگوی دوم).

رفتار نوع اول نمایانگر مکانیسم ترسیب است و برای نمونه‌های آب با pH کم (حدود ۵-۶) و دارای غلظت‌های زیاد مواد طبیعی از نوع نسبتاً هموزن ملاحظه می‌شود. حذف از نوع اول استوکیومتری یک شناخته شده است یعنی مقدار لازم از منعقدکننده متناسب با غلظت مواد آلی طبیعی موجود خواهد بود. اما انعقاد از نوع دوم برای نمونه‌های آب با pH بالا و

همچنین غلظت‌های نسبتاً کم مواد طبیعی که از نوع ناهمگن‌تر (هتروژن) هستند، ملاحظه می‌شود و به ویژه باید توجه نمود که رفتار حذف نمونه‌هایی از مواد آلی که شامل مواد غیر هموسی است از الگوی نوع دوم تبعیت می‌کند [۵]. در این حالت نیز نیاز به افزایش منعقدکننده با افزایش غلظت مواد طبیعی بیشتر می‌شود اما این ارتباط الزاماً استوکیومتری یک نخواهد بود، لذا الگوی حذف خود را با یک افزایش بطی در کارایی حذف نشان می‌دهد. در این حالت معمولاً استفاده بیش از حد منعقدکننده ضرورتی ندارد و کارایی حذف را خیلی جزئی ارتقاء می‌دهد. رفتار نوع دوم برای منابع آب‌های سطحی خصوصاً آنهایی که کدورت و کلیانیت متوسط تا زیاد دارند رایج‌ترست [۵]. مواد سنتتیک نیز معمولاً از الگوی دوم حذف تبعیت می‌کنند [۴].

تعیین نوع منعقدکننده لازم جهت حذف مواد آلی هم‌زمان با تعیین میزان لازم در حذف کدورت و مواد آلی آب از طریق جارتست صورت می‌گیرد. در این آزمایش میزان منعقدکننده و pH به طور مستقل تغییر داده می‌شوند و مقدار مطلوب منعقدکننده و pH مناسب تصفیه تعیین می‌شود. جهت تکمیل بررسی‌ها می‌بایست آزمایشات در مقیاس صنعتی نیز انجام پذیرد. در انجام تست‌های آزمایشگاهی لازم است که خطای قابل بروز بر اثر تبخیر مواد آلی و یا جذب روی شیشه و کاغذ صافی مورد توجه قرار گیرد [۴].

تنظیم pH مرحله انعقاد جهت حذف بهتر مواد آلی

pH آب طی انعقاد اثر زیادی بر کارایی حذف مواد آلی دارد تا آنجا که باید گفت برای تصفیه‌خانه‌های دایر افزایش کارایی انعقاد با تنظیم pH به عنوان یک روش مناسب حذف مواد پیش‌ساز فراورده‌های جانبی گندزدایی پیشنهاد می‌شود [۹].

غالباً شرایط بهینه حذف کدورت متفاوت از شرایط مطلوب حذف مواد آلی است. به طور معمول بهترین pH برای حذف کدورت ۷-۶ است حال آن‌که حذف مواد آلی از آب توسط آلوم در ۵-۶ pH بهترین وضعیت را دارد. ضمناً در آزمایشگاه‌هایی که با سنجش پتانسیل زتا نتایج جارتست را

ارزیابی می‌کنند نیز گاه اختلاف‌هایی برای شرایط بهینه حذف کدورت و مواد آلی ملاحظه می‌شود. به عنوان مثال شرایط بهینه حذف کدورت اغلب در پتانسیل کمی منفی رخ می‌دهد حال آن‌که در مورد حذف مواد آلی شرایط بهینه اغلب نزدیک به نقطه صفر بار است [۱۰].

دلایل مناسب بودن pHهای کمتر برای حذف مواد آلی طی انعقاد بشرح زیر است [۱۰]:

مواد آلی با بار سطحی منفی به وسیله یون‌های با بار مثبت هیدروژن که در pHهای کمتر فراوانترند خنثی می‌شوند. این قضیه بار منفی را که می‌بایست به وسیله آهن یا آلومینیوم خنثی می‌شد کمتر می‌نماید. کاهش pH همچنین می‌تواند موجب کاهش حلالیت بسیاری از مواد هیومیک گردد و آنها را به طرق مختلف ترسیب نماید.

با کاهش pH بار مثبت بیشتری از آهن و آلومینیوم به وجود می‌آید. این میزان بار در دسترس برای خنثی‌سازی، مواد هموسی با بار منفی را ترقی داده و تشکیل رسوبات فلز هموس را بهبود می‌بخشد. در pHهای کمتر همچنین حذف هموس از طریق مکانیسم جذب سطحی روی هیدروکسیدهای فلزی در نواحی انعقاد جارویی^۱ بهتر صورت می‌گیرد که به علت افزایش بار مثبت روی این سطوح می‌باشد.

به این ترتیب ملاحظه می‌شود که حذف رنگ و مواد پیش‌ساز توسط املاح آهن و آلومینیوم در دامنه pHهای کمی کمتر از آنچه کاهش بهینه کدورت است بهبود می‌یابد. حذف بخش محلول مواد هیومیکی نیز که غالباً مسئولیت بیشتری در تشکیل فرآورده‌های جانبی دارند با کاهش pH بهبود می‌یابد [۱۰]. در مورد حذف SOC باید گفت ارتباط مشخصی با pH ملاحظه نشده است و برای هر نوع ماده آلی سنتتیک دامنه بهینه pH ممکن است متفاوت باشد. تجربه نشان می‌دهد مواد سنتتیک با بار منفی در pH=۵-۶ و با بار مثبت در pH=۷-۸/۵ راحت‌تر قابل حذف بوده است [۴]. لازمه حذف مواد سنتتیک هیدروفیل طی انعقاد این است که این آلاینده‌ها قادر به جذب سطحی روی ذرات موجود یا تولید شده ضمن انعقاد باشند [۵]. در خلال ارزیابی فرایندهای انعقاد همچنین باید توجه داشت که به دلیل اسیدی بودن املاح، افزایش املاح فلزی منعقدکننده

خود می‌تواند موجب اثر بر pH آب شود. این قضیه می‌تواند pH را قدری پایین آورد که خود به نفع حذف مواد آلی است. از آنجا که ممکن است تحت میزان مطلوب منعقدکننده pH آب آنچنان افت کند که از حدود کافی برای حذف مواد آلی هم پایین‌تر رود، لذا در آب‌های با قلیائیت کم باید دقت کافی وجود داشته باشد. از طرف دیگر وقتی که میزان کافی از منعقدکننده برای حذف کدورت برای رسیدن به حد دلخواه کاهش pH حذف مواد آلی نا کافی باشد، که غالباً برای آب‌های با قلیائیت زیاد رخ می‌دهد، می‌توان از افزایش یک اسید کمک گرفت و با این اقدام می‌توان از مصرف میزان زیادتر از منعقدکننده (جهت تنظیم pH) جلوگیری نمود. این اقدام هم‌چنین از تولید لجن بیشتر که با افزایش میزان منعقدکننده مصرفی همراه است، جلوگیری می‌نماید. به هر ترتیب افزایش میزان بیشتر از منعقدکننده جهت کاهش pH عمل مطلوبی نیست چون علاوه بر ایجاد لجن بیشتر این اقدام همچنین می‌تواند منجر به فلوکولاسیون بعدی در آب وارد شده به شبکه توزیع گردد [۱۰]. اقدام مطلوب‌تر افزایش اسید به مرحله انعقاد است (شکل ۲).

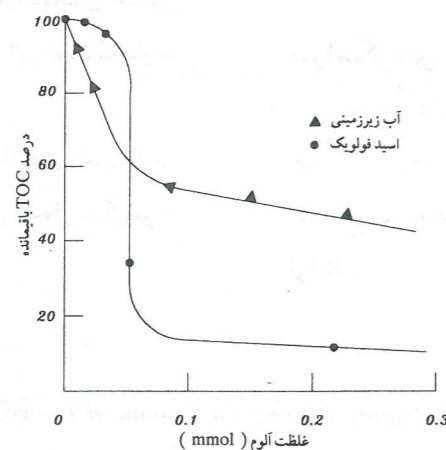
افزایش یک ماده شیمیایی تنظیم pH که غالباً شرایطی بهتر را ایجاد می‌نماید، همچنین می‌تواند پیچیدگی طرح را تشدید سازد. در بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها از آب آهک و یا هیدروکسید سدیم برای کنترل خوردگی استفاده می‌شود و همین نوع قلیا نیز گاه برای تنظیم pH انعقاد مصرف شده است. اما افزایش اسیدها که غالباً در تصفیه‌خانه‌های آب وجود ندارد رایج نیست. لذا لازم است برای افزایش این مواد علی‌رغم مخاطراتی که در حمل و نقل و نگهداری آنها وجود دارد برنامه‌ریزی‌های لازم صورت گیرد [۱۰].

تحقیقات صورت گرفته نشان داده است که در انجام انعقاد تنظیم یافته کلرور فریک از همه مناسب‌تر است و در این حالت عامل تعیین‌کننده در حذف حداکثر مواد آلی طبیعی خواهد بود. حذف کلی مواد طبیعی را با کاربرد کلرور فریک می‌توان با تنظیم اولیه pH به میزان $0/2+$ از ۶ تا حدود ۶۵٪ افزایش و هم‌زمان نیاز به مصرف منعقدکننده را تا حدود ۶۰٪ کاهش داد [۶].

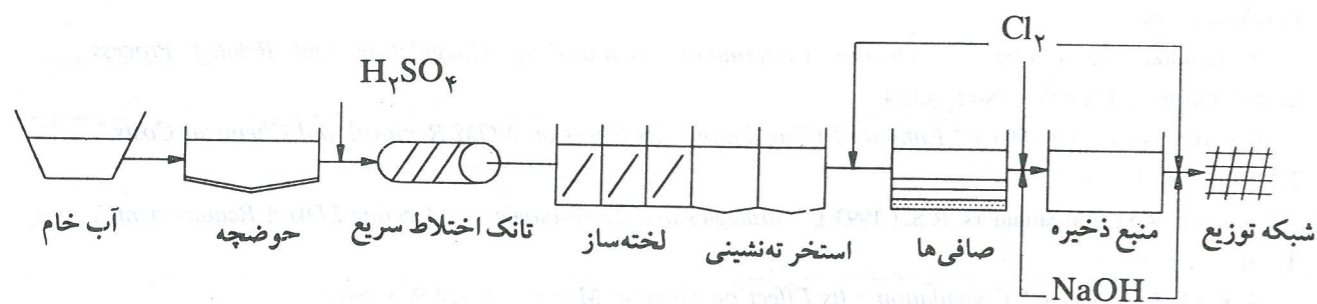
1- Sweep Floc

شرایط بهینه pH جهت حذف مواد آلی پیش‌ساز بستگی به خصوصیات این مواد دارد. چنانچه مواد مذکور نسبتاً هموزن باشند یک دامنه مشخص‌تر از pH برای حذف آنها کفایت خواهد نمود. به علاوه آب‌های با قلیائیت کم که به تغییرات pH ناشی از افزودن منعقدکننده حساس‌ترند، معمولاً یک حالت بهینه مشخص‌تر و محدودتری را نشان داده‌اند [۱۰].

بهینه‌سازی فرایندهای انعقاد با آلوم جهت حذف مواد آلی طبیعی ممکن است مغایر با اهداف به حداقل رساندن آلومینیوم در آب شرب گردد. مسلماً در چنین شرایطی تصفیه‌خانه‌ها می‌بایست pH تصفیه آب را در حدی انتخاب کنند که باقی‌مانده آلومینیوم در آب زیان‌آور نباشد (کمترین حلالیت آلومینیوم در دامنه pH=۶-۶/۵)، اما کم‌کان حذف مواد آلی صورت گیرد. روش‌های دیگر نظیر کاربرد املاح فریک یا املاح آلومینیوم در کنار پلیمرها هم می‌تواند مؤثر واقع



شکل ۱- دو الگوی ملاحظه شده برای حذف NOM موجود در آب‌های زیرزمینی و اسید فولویک استخراج شده از آب‌های زیرزمینی طی انعقاد با آلوم [۵]



شکل ۲- افزایش اسید سولفوریک به خط معمول تصفیه آب‌های سطحی جهت اجرای انعقاد

تنظیم یافته [۱۰]

شود [۱۰]. نقش کمک منعقدکننده‌ها در انعقاد مواد آلی کمک منعقدکننده‌ها موادی هستند که خصوصیات ذرات لخته شده را بهتر نموده و کدورت را کاهش می‌دهند. اما کاربرد صرف این مواد (به جز اسیدها و بازها) اثر مشخص بر کارایی حذف مواد آلی ندارد. البته ترکیب کاربرد مواد شیمیایی می‌تواند بارزترین اثر را داشته باشد. چهار توصیه زیر قابل ذکر است [۴]:

- ۱- افزایش اسید را پیش از افزایش املاح منعقدکننده انجام دهید تا pH به حد دلخواه پایین آمده و یون‌های با بار مثبت ایجاد شوند.
- ۲- افزایش بازها را بعد از افزایش املاح منعقدکننده انجام دهید تا حدود بهینه pH حفظ شده از رسوب‌گذاری مخلوط جلوگیری شود.

- ۳- افزایش خاک رس و پودر کربن فعال را پیش از افزایش املاح منعقد کننده انجام دهید تا امکان جذب مواد آلی طبیعی و مصنوعی پیش از انعقاد فراهم شود.
- ۴- افزایش پلیمرها به ویژه انواع آنیونی را بعد از افزایش املاح منعقد کننده انجام دهید.

نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱- انعقاد تنظیم شده یک راهکار کنترل مناسب برای حذف مواد آلی طبیعی و نتیجتاً تمامی فرآورده های جانبی گندزدایی محسوب می شود. به عبارت دیگر نه تنها ترکیباتی که برای آنها حداکثر مجاز وضع شود قابل رفع هستند بلکه سایر فرآورده های جانبی گندزدایی نیز قابل جداسازی می باشند [۸].
- ۲- برای تصفیه خانه های دایر اتخاذ فرایند انعقاد تنظیم یافته با تنظیم pH به عنوان روشی مناسب در تأمین اهداف قوانین آب های آشامیدنی سالم و گندزدا / فراورده های جانبی گندزدایی معرفی و پیشنهاد می شود. این در حالی است که نیاز به سرمایه گذاری کلان وجود ندارد [۱ و ۶].
- ۳- مقایسه مواد منعقد کننده مختلف نشان داده است که به کارگیری کلرورفریک برای انجام انعقاد تنظیم شده از دیگر مواد مناسب تر است [۶].

منابع و مراجع

- 1- White, M.C. et al. (1997). " *Evaluating Criteria for Enhanced Coagulation* ", Compliance, J.AWWA, No.5, 64-77.
- 2- Berger, B.B. (1987). " *Control of Organic Substances in Water and Wastewater* ", nce.
- 3- AWWA, (1990). " *Water Quality and Treatment* ", 4th Edition, McGraw Hill.
- 4- Smith, J.E. and Renner, R.C. (1991). " *Upgrading Existing or Designing New Drinking Water Treatment Facilities*", ndc.
- 5- Randtke, S.J. (1988). " *Organic Contaminant Removal by Coagulation and Related Process Combination* ", J.AWWA, No.5, 40-54.
- 6- Crozes, G. et al. (1995). " *Enhanced Coagulation ; Its Effect on NOM Removal and Chemical Costs* ", J.AWWA. No.1.
- 7- Clark, R.M. and Summers, R.S. (1993), " *Strategies and Technologies for Meeting SDWA Requirements*", Technomic Pub.
- 8- Keith, E. (1996). " *Coagulation : Its Effect on Organic Matter* ", J. AWWA. No.4.
- 9- AWWA, (1983). " *Strategies for the Control of THMs* ", AWWA Conference Proceedings, No. 20174.
- 10- Bryant, E.A. and Fulton, G.P. and Budd, G.C. (1992). " *Disinfection Alternatives for Safe Drinking Water* ", VNR.

- ۴- مشخص شده است که با به کارگیری روش انعقاد تنظیم یافته غالب تصفیه خانه ها قادر به تأمین اهداف مقررات مرحله اول رفع کل کربن آلی هستند. البته در مواردی میزان بسیار زیادی از منعقد کننده یا ادغامی از منعقد کننده و اسید برای رسیدن به سطوح هدف لازم خواهد بود [۱].
- ۵- دامنه شرایط بهینه انعقاد را می توان با کاربرد تلفیق های مختلف از اسید و منعقد کننده مصرفی تا حد زیادی توسعه داد و لذا انعطاف پذیری بیشتری جهت بهینه سازی عملکرد فرایند انعقاد در حذف مواد آلی اعم از محلول یا نامحلول برای نمونه آب های با مقادیر مختلف از مواد آلی و قلیائیت تأمین نمود [۱۰].
- ۶- در مراحل به کارگیری فرایند انعقاد تنظیم یافته در تصفیه خانه ها باید مراقبت نمود که اصلاح صورت گرفته موجب بروز زیان و خطر از لحاظ حذف کدورت، باقی ماندن آلومینیوم بیش از حد در آب یا تولید لجن مازاد نمی شود [۱].

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند که از استاد محترم خود جناب آقای دکتر ناصر رازقی که منت نهادند و کار هدایت و تصحیح این مقاله را عهده دار شدند صمیمانه سپاسگزاری نمایند.