

استفاده از فرآیند انعقاد در بهینه‌سازی حذف مواد آلی طبیعی در آبهای با کدورت پایین

علیرضا مصداقی‌نیا^۱ محمد طایفه رفیعی^۲ امیرحسین محوی^۳ فروغ واعظی^۴

(دریافت ۸۴/۸/۲۶ پذیرش ۸۵/۱/۲۰)

چکیده

در سالهای اخیر بهینه‌سازی فرآیند انعقاد به منظور حذف هر چه بیشتر مواد آلی طبیعی (NOM) و در نتیجه برآورده‌سازی الزامات انعقاد تشدید یافته از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار بوده است. NOM متشکل از دو بخش ذره‌ای و محلول می‌باشد که معمولاً بخش محلول آن سهم عمده‌ای از تلاش جهت حذف را به خود اختصاص می‌دهد. حذف مواد آلی طبیعی محلول از آبهای با کدورت پایین به شرطی که توجه کافی در تشکیل لخته‌های میکرونی (انعقاد) و ایجاد لخته‌های بزرگ (لخته‌سازی) صورت گیرد، می‌تواند توسط فرآیند انعقاد حاصل گردد. این مطالعه که نتایج حاصل از یک تحقیق آزمایشگاهی در مقیاس پایلوت با هدف بهینه‌سازی فرآیند انعقاد را ارائه می‌نماید، بر روی نمونه‌های آب خامی که مقدار کربن آلی کل (TOC) آنها با افزودن اسید هیومیک تجاری تنظیم شده انجام گرفته و نشان می‌دهد که pH و کدورت چگونه می‌توانند در جهت به حداکثر رساندن حذف NOM محلول تنظیم گردند. حذف NOM در دوزهای مختلف مواد منعقد کننده و در pH های مختلف با اندازه‌گیری TOC در آب خام و آب تصفیه شده مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد آبهای با کدورت پایین، سایت‌های ضروری هسته‌ساز را می‌توان با ایجاد کدورت‌های سنتتیک مثلاً توسط خاک رس تأمین نمود. تنظیم pH اولیه به حدود ۵/۵ و یا افزودن خاک رس قبل از افزودن ماده منعقد کننده امکان تشکیل لخته‌های میکرونی را که در نهایت به یکدیگر چسبیده و لخته‌های بزرگی را تشکیل می‌دهند، در دوزهای پایین منعقد کننده فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: تصفیه آب، انعقاد، مواد هیومیک، کنترل pH، تنظیم کدورت.

Using Coagulation Process in Optimizing Natural Organic Matter Removal from Low Turbidity Waters

Alireza Mesdaghinia¹, MohammadTayefeh-Rafiee², Amir Hossein Mahvi³, Forugh Vaezi⁴

(Received Nov. 17, 2005 Accepted Apr. 9, 2006)

Abstract

Optimization of coagulation process for efficient removal of Natural Organic Matters (NOM) has gained a lot of focus over the last years to meet the requirements of enhanced coagulation. NOM comprises both particulate and soluble components which the latter usually comprises the main portion. Removal of soluble NOM from low turbidity waters by coagulation is not a successful process unless enough attention is paid to stages of formation and development of both micro and macro-flocs. This study, which presents experimental results from pilot scale research studies aimed at optimizing coagulation process applied to synthetic raw waters supplemented by adding commercial humic acid with low turbidity levels, explains how pH and turbidity can be controlled to maximize soluble NOM removal. The removal of NOM at various coagulant doses and coagulation pHs has been assessed through raw and treated (coagulated-settled) water measurements of total organic carbon (TOC). For low turbidity waters, essential floc nucleation sites can be provided by creating synthetic turbidities, for example by adding clay. Adjusting the initial pH at 5.5 or adding clay before coagulant addition allows the formation of micro-flocs as well as formation of the insoluble flocs at low coagulant doses.

Keywords: Water Treatment, Coagulation, Humic Substances, pH Control, Nucleation.

1- Prof., School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences
2- Grad. Student of Environmental Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences rafiee78@yahoo.com
3- Assit. Prof., School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences
4- Assoc. Prof., School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences

۱- استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران
۲- کارشناسی ارشد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تهران - rafiee78@yahoo.com
۳- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران
۴- دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران

احتمال زیاد در عمل، شرایط بهره‌برداری بر روی هم همپوشانی داشته و بیش از یک مکانیسم مسئول حذف NOM خواهد بود. سه مکانیسم که بیشتر به آنها اشاره می‌شود عبارت‌اند از: خنثی‌سازی بار^۲، رسوب دهی^۳ کمپلکس‌های فلز-هیومیک و رسوب‌دهی همزمان^۴ با جذب مواد هیومیک بر روی رسوبات هیدروکسید فلزی [۶، ۷ و ۸].

مکانیسم حذف، تابع pH انعقاد و دوز منعقد کننده می‌باشد [۹]. در pH پایین (۴/۵ - ۴) خنثی‌سازی بار، مکانیسم غالب است؛ در حالی که در pH های بالاتر (۸-۶)، جذب مکانیسم غالب، می‌باشد [۱۰]. به طور کلی، رسوب‌دهی کمپلکس‌های فلز-هیومیک مکانیسم غالب در دوزهای پایین منعقد کننده و pH پایین بوده و جذب مواد هیومیک بر روی رسوبات هیدروکسید فلز، مکانیسم غالب در دوزهای بالای منعقد کننده و pH بالا می‌باشد [۹]. معمولاً انعقاد NOM در دامنه pH بین ۶-۵ بسیار مؤثر است زیرا خنثی‌سازی بار در pH پایین‌تر بسیار مؤثر می‌باشد. pH پایین‌تر، از طریق افزودن اسید و یا دوزهای بالاتر منعقد کننده حاصل می‌شود. در دوزهای بالاتر منعقد کننده، هیدروکسید فلزی $Al(OH)_3$ یا $Fe(OH)_3$ بیشتری شکل گرفته و بنابراین وجود H^+ بیشتر در محلول، pH را پایین می‌آورد. لذا حذف کل کربن آلی (TOC) و پیش سازهای DBP می‌تواند با کاهش pH و یا افزایش دوز منعقد کننده تشدید یابد. [۱۰]

۲- مواد و روشها

جهت انجام آزمایشهای انعقاد از نمونه‌های آب خام سنتتیک با TOC های مختلف که با عبور دادن آب آشامیدنی شهری از ستون کربن فعال و افزودن اسید هیومیک تجاری (Acros) تهیه شده استفاده گردید. آزمایشها در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه جارتست توسط دو منعقد کننده آلوم و کلوروفریک آزمایشگاهی و در دو $pH = 5/5$ و pH خود نمونه آب انجام گرفتند. برای انجام جارتست ابتدا دمای نمونه‌های آب خام به دمای اتاق ($20^\circ C$) رسانده شد. به منظور حذف مواد آلی، تمامی بشرها، بطری‌های نمونه‌برداری، ظروف آزمایشگاهی مورد استفاده در انجام آزمایشها و تیغه‌های جارتست به مدت ۲۴ ساعت در محلول اسید سولفوریک ۲۰ درصد مستغرق گشته و سپس با آب آشامیدنی و در نهایت با آب مقطر آبکشی شدند. غلظتهای مورد استفاده منعقدکننده ۸۰-۵ میلی‌گرم در لیتر بوده است.

مواد آلی طبیعی (NOM)^۱ مخلوط غیر یکنواختی از ترکیبات آلی است که از گیاهان، حیوانات، میکروارگانیسم‌های زنده و مرده و مواد زائد تولیدی آنها مشتق شده و از تجزیه این منابع وارد آب می‌گردد. به طور کلی، مولکولهای NOM، بزرگ و دارای گروههای عامل بسیار زیادی است که رفتار شیمیایی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بارالکتریکی این گروههای عامل با pH تغییر می‌یابد [۱].

از میان مواد آلی موجود در آبهای طبیعی، احتمالاً مواد هیومیک رنگی که معمولاً به صورت محلول هستند سهم عمده‌ای را به خود اختصاص داده و علاوه بر دادن رنگ، مزه و بو به آب می‌توانند در اکسیداسیون و حذف فلزات سنگین از قبیل آرسنیک، آهن و منگنز مداخله نمایند. مواد آلی طبیعی، پیش‌ساز محصولات جانبی گندزایی بوده و برخی از این مواد به تنهایی یا همراه با فلزات سنگین و آفت کشها به عنوان مواد سمی یا سرطان‌زا شناخته می‌شوند. مصرف آب آشامیدنی کلرزنی شده با سرطان مثانه، سرطان دستگاه گوارشی و برخی نارساییهای تولید مثلی در ارتباط است [۲ و ۳].

فرآیند انعقاد، به عنوان متداول‌ترین سیستم تصفیه آب همان گونه که در بسیاری از سیستم‌های تصفیه آب در ایران بهره‌برداری می‌شود برای حذف کدورت، بهینه می‌گردد. مواد آلی طبیعی نیز توسط انعقاد حذف می‌گردند، اما راندمان حذف بسته به مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب و شرایط بهره‌برداری، متفاوت می‌باشد. شرایط بهینه برای حذف کدورت همواره با شرایط بهینه حذف NOM یکسان نیست اما به شرطی که کدورت آب خیلی زیاد نباشد، نیاز به منعقد کننده تحت تأثیر غلظت NOM قرار می‌گیرد. این بدین معنی است که در جایی که NOM آلاینده اصلی می‌باشد فرآیند تصفیه باید در جهت حذف NOM، بهینه گردد [۳ و ۴].

کنترل pH فرآیند انعقاد یکی از فاکتورهای بسیار مهم در حذف NOM می‌باشد. در مورد اکثر تصفیه خانه‌های آب، pH فرآیند انعقاد/لخته سازی معمولاً نتیجه دوزهای متفاوت منعقد کننده در پاسخ به کدورت‌های مختلف آب می‌باشد و عملاً تنظیم pH صورت نمی‌گیرد. این امر منجر به مقادیر مختلف pH و لذا راندمانهای متغیر در حذف NOM می‌گردد [۴ و ۵]. در این مطالعه، اهمیت کنترل pH و تأمین سایت‌های هسته‌ساز برای حذف NOM در آبهای با کدورت پایین مورد بحث قرار می‌گیرد.

در توصیف حذف NOM توسط فرآیند انعقاد به چندین مکانیسم اشاره می‌شود و هر کدام از این مکانیسم‌ها بسته به ترتیب خاصی از شرایط بهره‌برداری نسبت به سایر مکانیسم‌ها برتری می‌یابند. به

² Charge Neutralization

³ Precipitation

⁴ Coprecipitation

⁵ Total Organic Carbon

¹ Natural Organic Matter

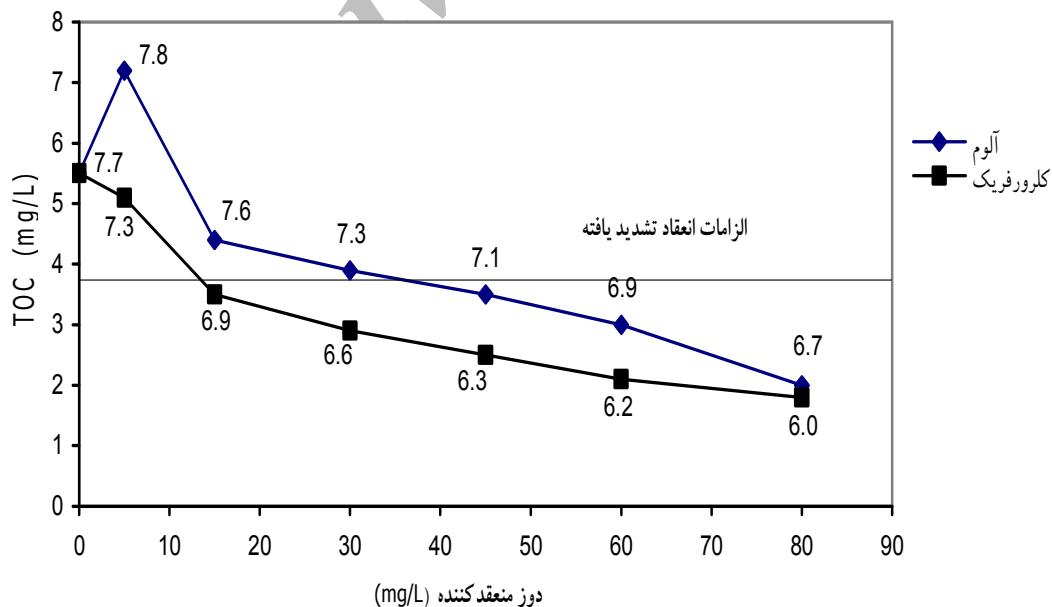
لذا، افزودن منعقد کننده در کاهش pH، به دستیابی به شرایط بهینه کمک خواهد نمود. البته کاهش pH می‌تواند با افزودن اسیدهای معدنی از قبیل اسید سولفوریک یا اسید کلریدریک نیز صورت گیرد. بنابراین رسیدن به مقدار بهینه pH از طریق افزودن اسید یا افزودن منعقد کننده مازاد، باید از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گیرد. منحنی نشان داده شده در شکل مذکور بیانگر انجام نوعی تیتراسیون می‌باشد. افزودن ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر آلوم و کلروفریک به ترتیب منجر به افت pH تا ۶/۷ و ۶/۰ شده است که وابستگی pH انعقاد به نوع منعقد کننده و شرایط نمونه آب را نشان می‌دهد. معمولاً در نمونه‌های آب با قلیائیت پایین و برخی از نمونه‌های آب با قلیائیت متوسط، افزودن منعقد کننده منجر به افت سریع pH و در نتیجه رسیدن به pH بهینه، در حذف TOC می‌شود و در اغلب موارد نیازی به افزودن اسید وجود ندارد؛ اما در مورد اغلب آب‌های با قلیائیت متوسط یا بالا، تصمیم‌گیری در مورد استفاده از منعقد کننده به تنهایی و یا ترکیب آن با اسید، بستگی به اهداف کلی کیفی آب خواهد داشت. با توجه به این که pH بهینه برای حذف NOM در حدود ۵ می‌باشد [۲ و ۱۲]، کاهش pH تا ۵/۵ باعث تشدید حذف TOC شده است. ماکزیمم درصد حذف به دست آمده برای TOC در pH واقعی برای نمونه آب ۲ می‌باشد، در حالی که ماکزیمم درصد حذف به دست آمده برای این دو پارامتر در pH=۵/۵ برابر ۷۹/۶ و ۹۸ درصد است. در مورد همین نمونه آب (شکل ۲) ملاحظه می‌گردد که الزامات

تنظیم قلیائیت پایین آب، با جوشاندن آن و قلیائیت بالا، با افزودن بیکربنات سدیم و تنظیم pH، با افزودن اسید سولفوریک صورت گرفت. برای تنظیم کدورت نیز از خاک رس عبور داده شده از الک ۲۰۰ مش استفاده گردید. اختلاط سریع با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه انجام گرفت و با دو مرحله اختلاط کند ۷/۵ دقیقه‌ای به ترتیب با سرعت‌های ۴۰ و ۲۰ دور در دقیقه دنبال شد. در انتها نمونه به مدت ۳۰ دقیقه جهت ته‌نشینی در حالت سکون قرار گرفت. نمونه‌های مورد آزمایش از ۱۰ سانتی‌متری زیر سطح آب و توسط یک پیت سرگشاد برداشته شد و آزمایش‌های اندازه‌گیری pH، TOC، قلیائیت و کدورت بر روی آنها انجام شد. آنالیز TOC در پژوهشگاه صنعت نفت تهران و سایر آزمایشگاه‌ها، در گروه مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران انجام گرفتند. حفاظت نمونه‌ها قبل از اندازه‌گیری TOC با رساندن pH به کمتر از ۲ و با استفاده از اسید سولفوریک صورت گرفت. اندازه‌گیری TOC با استفاده از دستگاه تحلیلگر TOC (طبق روش 5310 B Combustion-Infrared، مندرج در کتاب روش‌های استاندارد [۱۱]) و اندازه‌گیری کدورت با استفاده از کدورت سنج Hach انجام گرفت.

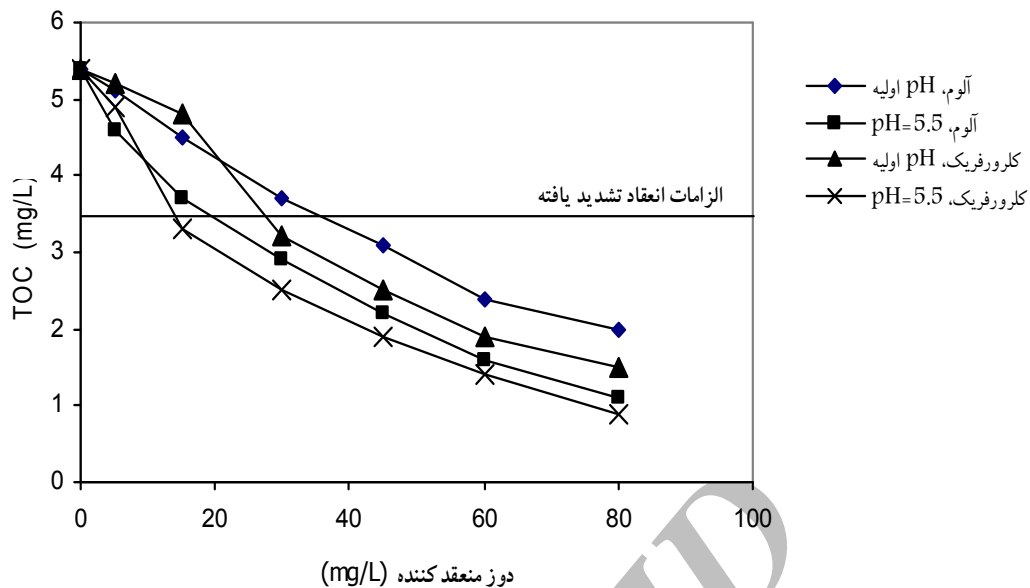
۳- نتایج و بحث

۱-۳- تأثیر pH بر روی عملکرد انعقاد

اثر آلوم و کلروفریک بر روی افت pH، در شکل ۱ (مربوط به نمونه ۱) نشان داده شده است. هنگامی که آلوم یا کلروفریک به آب افزوده می‌شوند از خودشان خصوصیات اسیدی بروز می‌دهند.



شکل ۱- TOC باقیمانده در مقابل دوز منعقد کننده
 [Alk₀= ۱۴۵ mg/L as CaCO₃, TOC₀=۵/۵ mg/L]



شکل ۲- TOC باقیمانده در مقابل دوز منعقد کننده

[Alk₀ = 110 mg/L as CaCO₃, TOC₀ = 5/4 mg/L]

می آیند. بنابراین توانایی مواد منعقد کننده برای خنثی سازی بار منفی NOM، کمتر شده و حذف NOM به خوبی صورت نمی گیرد. افزودن اسید، ممکن است منجر به افزایش پروتون زایی مواد هیومیکی شود و به این ترتیب به انعقاد آنها کمک می کند. گونه های فلزی کاتیونی که در pH های پایین با شدت بیشتری به وجود می آیند، به صورت الکترواستاتیکی با NOM آنیونی واکنش داده و با خنثی سازی بار آنها محصولات بدون بار نامحلولی به وجود می آیند که در نهایت با ته نشینی ساده از آب جدا می گردند. در دوزهای پایین منعقد کننده، تشدید حذف در pH برابر 5/5 به تشکیل کمپلکس های هیومات- فلز نسبت داده می شود و در دوزهای بالا، تشدید حذف به خاطر جذب بیشتر NOM بر روی لخته های هیدروکسید فلزی بی شکل می باشد [۱ و ۱۴].

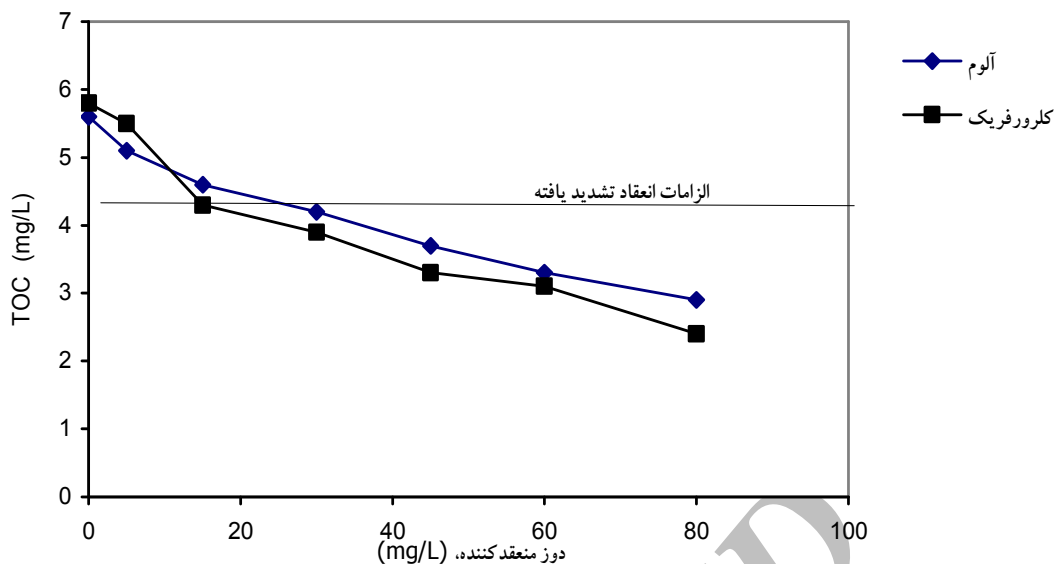
۲-۳- تأثیر حضور مواد کلونیدی (اهمیت تأمین سایت های هسته ساز برای آبهای با کدورت پایین)

یکی از عمده ترین مشکلاتی که در حذف NOM محلول، از نمونه های آب، پیش رو قرار گرفت؛ ناتوانی در ایجاد لخته ای بود که می توانست به راحتی ته نشین گردد. یعنی در عمل اگر چه به دنبال افزودن منعقد کننده و در نتیجه کمپلکس دادن یون های فلزی محلول و گروه های عامل موجود بر روی NOM، لخته های بسیار ریزی به وجود می آید اما عدم ایجاد لخته های بزرگ و در نتیجه عدم ته نشینی لخته، حذف NOM را محدود می نماید. این اتفاق تا جایی که منعقد کننده کافی برای ایجاد لخته ای که قابلیت ته نشینی داشته

انعقاد تشدید یافته (۳۵ درصد حذف TOC) در pH واقعی به راحتی با ۳۶ میلی گرم بر لیتر آلوم و یا ۲۸ میلی گرم بر لیتر کلوروفریک بر آورده می گردد. تنظیم pH اولیه به 5/5 منجر به کاهش دوز این دو منعقد کننده به ترتیب برابر با ۱۸ و ۱۴ میلی گرم بر لیتر (۵۰ درصد کاهش مصرف منعقد کننده) می شود. لذا می توان به این نتیجه کلی رسید که در pH برابر 5/5 دوز منعقد کننده کمتری برای حذف TOC و پیش سازهای DBP مورد نیاز است و بر این نکته تأکید دارد که در صورت تنظیم pH، کاهش قابل ملاحظه ای در هزینه های ماده منعقد کننده مصرفی (همراه با هزینه های مربوط به دفع لجن، گندزدایی و ...) حاصل خواهد شد. این نتیجه، هم با تئوری انعقاد و هم با نتایج به دست آمده از سایر محققین قابل انطباق می باشد. به عنوان مثال، لیند^۱ در سال ۱۹۹۵ طی مطالعات خود به این نتیجه رسید که به جز در آبهای سرد با قلیائیت و TOC پایین، حذف TOC با آلوم و کلوروفریک در pH های پایین تر بهتر است. نتایج مطالعات سایر محققین نیز بهترین pH رسوب دهی مواد هیومیک را ۵-۴ برای کلوروفریک و ۶-۵ برای آلوم نشان می دهند [۱۲ و ۱۳].

زمانی که pH بالاست و مقدار آن بالاتر از مقدار بهینه می باشد به دلیل پروتون زدایی گروه های کربوکسیلیک اسید، سایت های آنیونی بسیار زیادی بوجود می آید اما در عین حال هیدرولیز یون های فلزی افزایش یافته و یون های با بار مثبت کمتری به وجود

¹ Lind



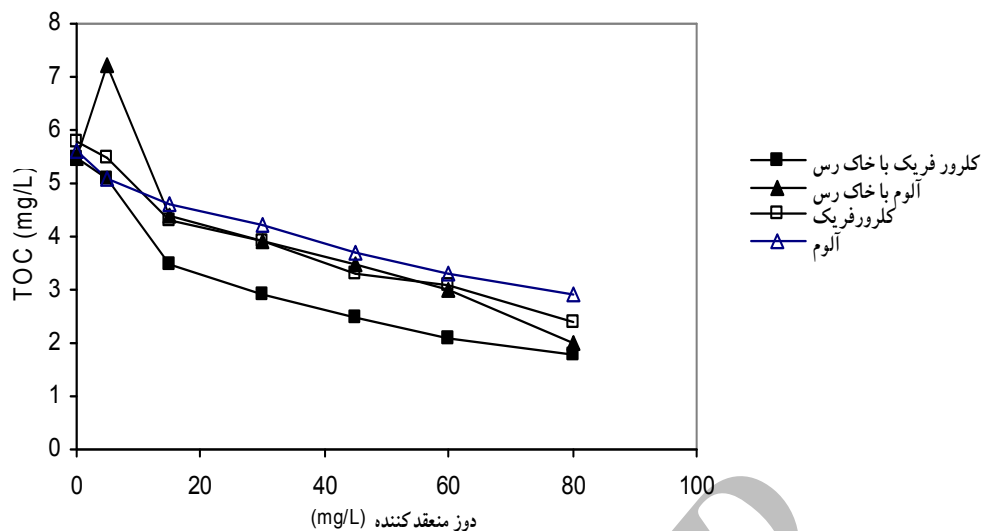
شکل ۳- TOC باقیمانده در مقابل دوز منعقد کننده
 $[Alk_0 = 144 \text{ mg/L as CaCO}_3, TOC_0 = 5/7 \text{ mg/L}]$

کلرورفریک و یا ۲۷ میلی‌گرم در لیتر آلوم مورد نیاز می‌باشد (شکل ۳). شکل ۴ چنین مقایسه‌ای را به صورت یکجا نشان می‌دهد. لذا می‌توان گفت که کدورت طبیعی آب منبع آماده‌ای از سایت‌های به وجود آورنده هسته را برای ایجاد لخته فراهم می‌نماید و در صورتی که چنین منبعی موجود باشد، این لخته‌ها به عنوان سایت‌هایی برای جذب NOM محلول عمل می‌نمایند. در مورد آبهای با کدورت پایین چنین سایت‌هایی که برای به وجود آوردن هسته‌های تشکیل دهنده لخته ضروری می‌باشند محدود بوده و این نیاز وجود دارد که به صورت دستی در محیط تأمین گردند. گرچه در این تحقیق از خاک رس بدین منظور استفاده گردید احتمالاً می‌توان از رس بنتونیت، کائولین و یا سیلیکای فعال نیز استفاده کرد، چراکه استفاده از این مواد به عنوان کمک منعقد کننده در مراجع مختلف ذکر شده است.

۴- نتیجه گیری

حذف مواد آلی طبیعی (NOM) محلول از آبهای با کدورت پایین تنها در شرایطی نتیجه مطلوب خواهد داد که توجه کافی در شرایط بهره‌برداری فرآیند انعقاد و لخته‌سازی صورت گرفته باشد. نتایج به دست آمده از این تحقیق و سایر مطالعات مشابه نشان می‌دهند که کنترل pH انعقاد یکی از فاکتورهای بسیار مهم در حذف NOM می‌باشد. یکی از عمده‌ترین مشکلاتی که در حذف NOM محلول از نمونه‌های آب پیش رو قرار گرفت ناتوانی در ایجاد لخته‌ای بود که می‌توانست به راحتی ته‌نشین گردد. کدورت طبیعی

باشد، ادامه می‌یابد و لذا حذف NOM فقط در دوزهای بسیار بالا رخ می‌دهد. با توجه به اینکه کدورت این نمونه‌های آب بسیار پایین بود (کدورت آب مورد استفاده برای تهیه محلول همواره کمتر از ۱ NTU و کدورت نهایی آب حاصله بعد از افزودن نمک اسیدهیومیک که رنگ محلول نیز به عنوان یک عامل مداخله‌گر در آن تأثیر داشت در حدود ۱۰-۵ NTU بود) به نظر رسید که عدم وجود کدورت و در نتیجه عدم وجود سایت‌هایی که به عنوان هسته‌های اولیه در ایجاد لخته عمل نمایند می‌تواند دلیلی بر شکل‌گیری ضعیف لخته‌های بزرگ و عدم ته‌نشینی آنها در مدت ۶۰-۳۰ دقیقه ته‌نشینی باشد. لذا فرض گردید که تأمین این سایت‌ها با ایجاد کدورت سنتتیک، احتمالاً خواهد توانست دوزهای مورد نیاز منعقد کننده را کاهش دهد. شکل‌های ۱ و ۲ بیانگر نمونه‌هایی هستند که کدورت آنها به طور سنتتیک و با افزودن خاک رسی که از الک ۲۰۰ مش عبور داده شده به حدود ۲۵ NTU رسانده شده است و شکل ۳ بیانگر همین نمونه‌ها بدون افزودن کدورت است. این نتایج نشان می‌دهند که افزودن کدورت منجر به دستیابی به درصد حذف مورد نظر TOC در دوزهای پایین‌تر می‌گردد و یا به عبارت دیگر درصد حذف TOC افزایش می‌یابد. به عنوان مثال برای نمونه آب ۲ ($Alk = 145 \text{ mg/L as CaCO}_3$ و $TOC = 5/5 \text{ mg/L}$) با کدورت ۲۵ NTU، به منظور برآورده‌سازی الزامات حذف TOC مقدار ۱۱ میلی‌گرم در لیتر کلرورفریک یا ۲۶ میلی‌گرم در لیتر آلوم (شکل ۱) مورد نیاز است، در حالی که برای همین نمونه آب ولی با کدورت طبیعی خود نمونه $NTU = 7/3$ ، ۱۵ میلی‌گرم در لیتر



شکل ۴- تأثیر حضور مواد کلوئیدی بر حذف TOC

می‌باشند محدود بوده و این نیاز وجود دارد که به صورت دستی در محیط تأمین گردند. تنظیم pH اولیه به حدود ۵/۵ و یا افزودن خاک رس قبل از افزودن ماده منعقد کننده امکان تشکیل لخته‌های میکرونی را که در نهایت به یکدیگر چسبیده و لخته‌های بزرگی را تشکیل می‌دهند در دوزهای پایین منعقد کننده فراهم می‌آورد.

آب منبع آماده‌ای از سایت‌های به وجود آورنده هسته را برای ایجاد لخته فراهم می‌نماید و در صورتی که چنین منبعی موجود باشد، این لخته‌ها به عنوان سایت‌هایی برای جذب NOM محلول عمل می‌نمایند. در مورد آبهای با کدورت پایین چنین سایت‌هایی که برای به وجود آوردن هسته‌های تشکیل دهنده لخته ضروری

۵- مراجع

- 1-Krasner, S.W., and Amy, G. (1995). "Jar-test evaluations of enhanced coagulation." *J. AWWA*, 87 (10), 93-107.
- 2-Randtke, S.J. (1988). "Organic contaminant removal by coagulation and related process combinations." *J. AWWA*, 80 (5), 40-56.
- 3-Eikebrokk, B. (1999). "Coagulation – direct filtration of soft, low alkalinity humic waters." *J. Wat. Sci. Tech.*, 40 (9), 55-62.
- 4-Budd, G.C., Hess, A.F., Shorney-Darby, H., Neemann, J.J., Spencer, C.M., Bellamy, J.D., and Hargette, P.H. (2004). "Coagulation applications for new treatment goals." *J. AWWA*, 96(2), 102-113.
- 5-MWH. (2005). *Water treatment: principles and design*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, 690-692.
- 6-Crozes, G., White, P., and Marshall, M. (1995). "Enhanced coagulation: Its effect on NOM removal and chemical costs." *J. AWWA*, 87 (1), 78-89.
- 7-Singer, P.C. (1999). "Formation and control of disinfection by-products in drinking water." *Proc., American Water Works Asso.*, Denver, Co.
- 8-Childress, A.E., Vrijenhock, E.M., Elimelech, M., Tanaka, T.S., and Beuhler, M.D. (1999). "Particulate and THM precursor removal with ferric chloride." *J. Environmental Engineering*, 125 (11), 1054-1061.
- 9-Baxter, C.W. (1998). "Full-scale artificial neural network modeling of enhanced coagulation." MS thesis, University of Alberta.
- 10-Miltner, M.J., Nolan, S.A., and Summers, R.S. (1994). "Evolution of enhanced coagulation for DBP coagulation: Critical issues in water and wastewater treatment." *Proc., National Conference on Environmental Engineering*, ASCE, Boulder.
- 11-APHA, AWWA, and WEF. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th Ed., Washington, D.C.
- 12-Volk, C., Bell, K., Ibrahim, E., Verges, D., Amy, G., and LeChevallier, M. (2000). "Impact of enhanced and optimized coagulation on removal of organic matter and its biodegradable fraction in drinking water." *J. Wat. Res.*, 34 (12), 3247-3257.
- 13-Gao, B.Y., and Yue, Q.Y. (2005). "Natural organic matter (NOM) removal from surface water by coagulation." *J. Environmental Science*, 17 (1), 124-127.
- 14-Cheng, R.C., Krasner, S.W., Green, J.F., and Wattier, K.L. (1995). "Enhanced coagulation: A preliminary evaluation." *J. AWWA*, 87 (2), 91-103.