

Original article

Evaluation of the Efficacy of Polyacrylamide Coagulant Aid Modified with Aluminum Oxide Nanoparticles in Sludge Dewatering of Wastewater Treatment Plant of Yazd

Shabnam Amanali Khani¹Mohamadhossein Salmani Nadooshen²Mohamadhasan Ehrampoosh³Mehdi Mokhtari^{4*}

1- MSc Student of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

2- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

3- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

4- Assistant Professor of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

***Corresponding author:** Mehdi Mokhtari, Assistant Professor of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

Email: mhimokhtari@gmail.com

Received: 22 December 2015

Accepted: 14 March 2016

ABSTRACT

Introduction and Purpose: Production of large quantities of sludge is a major problem in wastewater treatment plants, which necessitates adopting proper economical and environmental approaches for its management and treatment. The aim of this study was to investigate the effect of polyacrylamide polymer, modified with aluminum oxide nanoparticles, on dewatering of sludge produced from municipal wastewater treatment.

Methods: In-vitro preparation and dewatering of sludge by combination of polyacrylamide activated with aluminum oxide nanoparticles were carried out in two main steps of determination of pH and optimal dose of activated coagulant aid. For measuring sludge dewatering capability, tests of time of filtration (TTF), sludge cake moisture content, turbidity, and total suspended solids of effluent from sludge cake filtration were evaluated.

Results: Modified coagulant aid with aluminum oxide nanoparticles in optimum pH and concentrations of 5 and 4 mg/l, respectively, had the best efficiency and was more suitable than a primary coagulant without any modification. The levels of TTF, sludge cake moisture, turbidity, and total suspended solids of effluent reduced 24.4%, 11.2%, 57.2%, and 58%, respectively, in comparison with the control group.

Conclusion: The results showed that polyacrylamide coagulant aid modified with aluminum oxide nanoparticles could be appropriate for sludge dewatering. Therefore, it can be employed as an alternative coagulant aid for sludge dewatering.

Keywords: Coagulation, Sludge, Sludge dewatering, Sludge processing, Polyacrylamide, Wastewater treatment

► **Citation:** Amanali Khani Sh, Salmani Nadooshen Mh, Ehrampoosh Mh, Mokhtari M. Evaluation of the Efficacy of Polyacrylamide Coagulant Aid Modified with Aluminum Oxide Nanoparticles in Sludge Dewatering of Wastewater Treatment Plant of Yazd. Journal of Health Research in Community. Winter 2015;1(4): 53-63.

مقاله پژوهشی

بررسی کارایی کمک منعقدکننده پلی آکریل آمید اصلاح شده با نانوذرات آلومینیوم اکسید در آبگیری لجن تولیدی از تصفیه خانه فاضلاب شهر یزد

چکیده

مقدمه و هدف: تولید حجم بالای لجن از جمله مشکلات عمده اکثر تصفیه خانه های فاضلاب می باشد که لزوم ارائه راهکارهای مناسب اقتصادی و زیست محیطی را جهت مدیریت و تصفیه مناسب آن ایجاب می نماید. در این پژوهش، بررسی اثر پلیمر پلی آکریل آمید اصلاح شده با نانوذرات آلومینیوم اکسید در آبگیری لجن تولیدی از تصفیه زیستی فاضلاب شهری مورد مطالعه قرار گرفت.

روش کار: در این تحقیق آماده سازی و آبگیری لجن با ترکیب پلی آکریل آمید فعال سازی شده با نانوذرات آلومینیوم اکسید در مقیاس آزمایشگاهی و در طی دو مرحله اصلی تعیین pH و نیز دوز بهینه کمک منعقدکننده فعال سازی شده، توسط آزمون های زمان فیلتراسیون (TTF)، درصد رطوبت کیک لجن، کدورت و کل جامدات معلق آب ناشی از فیلتراسیون کیک لجن، برای سنجش قابلیت آبگیری لجن صورت پذیرفت.

یافته ها: براساس نتایج حاصل از این تحقیق، کمک منعقدکننده اصلاح شده با نانوذرات اکسید آلومینیوم در pH و غلظت بهینه به ترتیب ۵ و ۴ میلی گرم در لیتر بهترین کارایی را نشان داد، به گونه ای که زمان فیلتراسیون و رطوبت کیک لجن، کدورت و کل جامدات آب فیلتر شده نسبت به نمونه شاهد (پلی آکریل آمید کاتیونی) به ترتیب حدود ۲۴/۴، ۱۱/۲، ۵۷/۲ و ۵۸ درصد کاهش یافت.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج مطالعه حاضر، کمک منعقدکننده پلی آکریل آمید فعال سازی شده با نانوذرات اکسید آلومینیوم، می تواند به عنوان گزینه ای مناسب جهت آبگیری لجن ناشی از تصفیه فاضلاب شهری مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: آبگیری لجن، انعقاد، پردازش لجن، پلی آکریل آمید، تصفیه فاضلاب، لجن

شبیم امانعلی خانی^۱
محمد حسین سلمانی ندوشن^۲
محمد حسن احرام پوش^۳
مهدی مختاری^{۴*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی-درمانی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران
۲. مربی گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی-درمانی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران
۳. استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی-درمانی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران
۴. استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی-درمانی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران

* نویسنده مسئول: مهدی مختاری، استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی-درمانی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران

Email: mhimokhtari@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۴

◀ **استناد:** امانعلی خانی، شبیم؛ سلمانی ندوشن، محمد حسین؛ احرام پوش، محمد حسن؛ مختاری، مهدی. بررسی کارایی کمک منعقدکننده پلی آکریل آمید اصلاح شده با نانوذرات آلومینیوم اکسید در آبگیری لجن تولیدی از تصفیه خانه فاضلاب شهر یزد. مجله تحقیقات سلامت در جامعه، زمستان ۱۳۹۴؛ ۱(۴): ۶۳-۵۳.

مقدمه

کل هزینه های بهره برداری ناشی از تصفیه فاضلاب را به خود اختصاص می دهد [۱،۲]. از این رو به لحاظ اقتصادی و عملکردی، مدیریت لجن به ویژه حذف آب اضافی تولید شده طی فرآیند تصفیه زیستی یکی از مهم ترین مراحل در تصفیه فاضلاب می باشد [۳]. به منظور کاهش هزینه های گزاف سرمایه گذاری،

لجن فعال یکی از فرآیندهای تصفیه متعارف زیستی در تصفیه خانه های فاضلاب است. در این فرآیند مقدار زیادی لجن تولید می شود. تجربه نشان داده است که هزینه های ناشی از تصفیه لجن به طور چشمگیری بالا می باشد و ۵۰-۳۵ درصد

راهبری تأسیسات تصفیه، تثبیت لجن و جلوگیری از آلودگی‌های محیط‌زیست، لازم است حجم لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تا حد امکان کاهش یابد. بدین منظور معمولاً از روش تغلیظ و آبگیری لجن استفاده می‌شود. آبگیری لجن یکی از مشکل‌ترین مباحث مهندسی محیط‌زیست در ارتباط با دفع آن است. از آنجا که لجن اصلاح‌شده، به‌راحتی تغلیظ و آبگیری می‌شود؛ بنابراین در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب عملیات آماده‌سازی لجن اهمیت ویژه‌ای دارد. در واقع آماده‌سازی یا اصلاح کیفیت شیمیایی لجن، فرآیندی فیزیکی-شیمیایی است که موجب تسهیل حذف آب و بازیافت مواد جامد لجن می‌شود. در عملیات تصفیه لجن این فرآیند غالباً قبل از مراحل تغلیظ و آبگیری انجام شده و افزایش بازدهی این واحدها را فراهم می‌کند [۴]. آماده‌سازی لجن فرآیندی دومارحله‌ای شامل انعقاد و لخته‌سازی است [۵]. اولین هدف از آماده‌سازی لجن افزایش اندازه ذرات، غلبه بر آثار ناشی از آبدار بودن و دفع بار الکتریکی بین ذرات می‌باشد. به عبارت دیگر، آماده‌سازی لجن سبب تجمع ذرات ریز پراکنده و کلوئیدی موجود در لجن و آزاد شدن آب پیوندی موجود میان آنها می‌شود. در اغلب موارد برای آماده‌سازی لجن از مواد شیمیایی معدنی مانند آلوم، کلرور فریک، سولفات فریک و پلی‌الکترولیت‌های آلی استفاده می‌شود که باعث افزایش لجن تولیدی میشوند. امروزه پلی‌الکترولیت‌ها در تصفیه آب و فاضلاب کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. به تازگی استفاده از این ترکیبات در آماده‌سازی لجن برخلاف منعقدکننده‌های شیمیایی به دلیل عدم افزایش جرم لجن تولیدی، عدم تخریب ارزش گرمایی لجن و سهولت بهره‌برداری و نگهداری از تأسیسات مربوط، روند فزاینده‌ای داشته است [۶-۸]. ترکیب شیمیایی پلی‌آکریل آمید با محدوده وسیع وزن مولکولی و انواع بار الکتریکی و چگالی در دسترس است که نسبت به سایر پلیمرها ارزان‌تر و مؤثرتر می‌باشد. از ویژگی‌های کاربرد پلی‌آکریل آمیدها می‌توان دوز مصرفی کم، راندمان بالا و عدم ایجاد آلودگی محیط زیست را نام برد [۹]. نانوتکنولوژی

نیز تکنولوژی سریع و نوینی است که امکان کار، دست‌کاری و تولید ابزار، مواد و ساختارهایی در سطح مولکولی و حتی اتمی در بعد نانومتر را فراهم می‌کند. فناوری نانو دارای پتانسیل بسیار زیادی جهت پیشرفت در فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب و بهبود کارایی تصفیه است. نانومواد در مقایسه با مواد در ابعاد بزرگ، سطوح بسیار وسیع‌تری دارند. همچنین این مواد قادر به برهم‌کنش با گروه‌های شیمیایی مختلف به‌منظور افزایش میل ترکیبی آنها با ترکیبات ویژه می‌باشند. با توجه به توانمندی‌های فناوری نانو در حذف و کنترل آلودگی‌های محیطی و تصفیه و جلوگیری از انتشار آنها می‌توان آن را به‌عنوان یک فناوری سبز و ابزاری مؤثر برای دستیابی به توسعه پایدار در نظر گرفت [۱۰]. امروزه با پیشرفت‌های صنعتی و وجود انواع مختلف آلودگی در پساب‌های صنعتی و محیط زیست، توسعه لخته‌سازهای پلیمری جدید با روش‌های اصلاح، پیوندزنی و تهیه ساختارهای هیبریدی برای اهداف مختلف مد نظر قرار گرفته است. از این رو، استفاده از هیبرید ترکیبات آلی-معدنی شامل پلیمر و نانوذرات معدنی به طور روزافزون گسترش یافته است. این ترکیبات افزون بر داشتن خواص هر یک از اجزا به دلیل داشتن گروه‌های عاملی متفاوت و وجود آثار هم‌افزایی در ساختار اجزای آنها خواصی جدید را نشان می‌دهند که مشخصه هیچ‌یک از اجزای آنها به تنهایی نیست [۱۱]. مطالعاتی نیز در زمینه کاربرد پلیمرهای مختلف از جمله پلی‌آکریل آمید فعال‌سازی شده با نانوذرات مختلف در زمینه حذف آلودگی‌های زیست-محیطی انجام شده است. در مطالعه‌ای وانگ و همکاران اثر پلی‌آکریل آمید اصلاح‌شده با نانوذرات سیلیکا را در حذف کل جامدات معلق فاضلاب حفاری بررسی نمودند. نتیجه این بررسی نشان داد که این کمک منعقدکننده اصلاح‌شده دارای کارایی بسیار بالاتری از پلی‌آکریل آمید به تنهایی می‌باشد [۱۲]. مطالعه دیگری توسط لین و همکاران با عنوان آبگیری لجن توسط نشاسته اصلاح‌شده با نانوذرات آهن، آلومینیوم و سیلیکا نشان داد، این پلیمر جدید

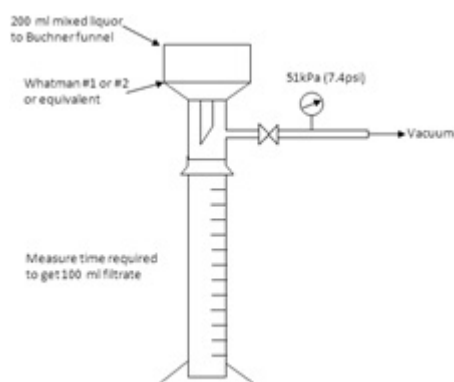
می تواند به عنوان یک لخته ساز دوستدار محیط زیست، با کارایی بالا مورد استفاده قرار گیرد [۱۳]. مطالعات متعددی نیز در زمینه آبگیری و کاهش حجم لجن انجام شده است. تاپا و هدلی اثر متقابل پلی الکترولیت و لیگنین را بر آبگیری لجن هضم شده بررسی نمودند و دریافتند که ذره های لیگنین باعث بهبود فرآیند متراکم سازی و آبگیری لجن به وسیله ایجاد پل های پلیمری می شود [۱۴]. گنجی دوست و همکاران گزارش دادند از میان پلیمرهای طبیعی مورد استفاده، کیتوزان با حداقل مصرف سرعت آبگیری، لجن هضم شده را افزایش می دهد [۱۵]. لی و لو گزارش نمودند لجن در برابر پلی الکترولیت های دوگانه دارای عملکرد بهتر در جذب ذرات می باشد و در این حالت لخته های تولیدی بزرگتر است که در نتیجه باعث بهبود آبگیری لجن و دوز کمتر پلی الکترولیت می شود [۱۶]. وانگ و همکاران در بررسی ارتباط بین خصوصیات پلی آکریل آمید های کاتیونی ساخت کارخانجات مختلف و عملکرد آبگیری لجن دریافتند که درجه کاتیونی پلی آکریل آمید مهمترین عاملی است که بر دوز کمک منعقد کننده در آبگیری تأثیر می گذارد و با افزایش این درجه درصد آبگیری لجن افزایش می یابد [۹]؛ بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی و مقایسه کارایی کمک منعقد کننده پلی آکریل آمید اصلاح شده با نانوذرات آلومینیوم اکسید در آبگیری لجن تولیدی از تصفیه زیستی فاضلاب شهری می باشد.

روش کار

این پژوهش یک مطالعه تجربی بوده که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد و از فرآیند انعقاد و لخته سازی جهت بهینه کردن کاربرد کمک منعقد کننده فعال سازی شده استفاده گردید. کمک منعقد کننده استفاده شده بر پایه پلی آکریل آمید کاتیونی از نوع صنعتی با وزن مولکولی بالا و دیگر مواد شیمیایی مورد استفاده از شرکت مرک آلمان و سیگما آلد ریچ آمریکا با درجه

خلوص بالا خریداری شد. لجن مورد آزمایش نیز به طور روزانه از تصفیه خانه فاضلاب شهر یزد و از حوضچه هاضم هوازی لجن تأمین گردید. تعداد نمونه ها در این آزمایش ۴۲ عدد بود و آزمایش های مورد نظر هر کدام با دوبار تکرار بر روی نمونه ها انجام گرفت. پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه شامل pH و غلظت کمک منعقد کننده انتخاب شد. طی دوره انجام آزمایش ها pH لجن هضم شده هوازی تقریباً خنثی و برابر ۶/۹ بود. همچنین، غلظت مواد جامد کل (TS) لجن هضم شده هوازی به مقدار ۰/۹ درصد اندازه گیری شد.

در این تحقیق، دستگاه تعیین زمان صاف کردن لجن (TTF: Time To Filtration) که طبق روش ارائه شده در کتاب روش های استاندارد آزمایش آب و فاضلاب، داخل آزمایشگاه ساخته شده بود، مورد استفاده قرار گرفت [۱۷]. نمایی از این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین، از pH متر مدل ۱۵۱ Mi (واگ تک، انگلستان) برای اندازه گیری pH، ترازوی حساس آنالیتیکال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم مدل HR۲۰۰ (ای اند دی، ژاپن) برای توزین مواد شیمیایی مصرفی، کاغذهای صافی واتمن یک جهت صاف کردن نمونه ها در دستگاه تعیین زمان صاف کردن لجن، دستگاه حمام اولتراسونیک مدل TI-H۵ (الما، آلمان) برای جداسازی نانوذرات، دستگاه جار تست مدل ۴۰۲-۷۷۹۰ (فیس و بیرد استیرر، آمریکا) برای اختلاط نمونه ها، پمپ خلأ تایوانی مدل VC-۷۰۱، دستگاه فور



شکل ۱: نمای کلی دستگاه استفاده شده برای تعیین زمان صاف کردن لجن

ساخت ایران، دستگاه DR۲۰۰۰ (هک، آمریکا) استفاده شد.

ساخت نانوذرات آلومینیوم اکسید

جهت تهیه و ساخت نانوذرات اکسید آلومینیوم، مقدار ۳ گرم از ماده کلرید آلومینیوم در ۱۵۰ میلی‌لیتر اتانول و مقداری آب مقطر دوبار تقطیر حل شد تا محلول شفاف به دست آید. سپس ۶۰ میلی‌لیتر آمونیاک به آرامی و قطره قطره به محلول به دست آمده اضافه و مرتب هم زده شد تا رسوب ژل‌مانند سفید رنگ هیدروکسید آلومینیوم تشکیل شود. در نهایت نانوذره ساخته شده، سه مرتبه با آب مقطر شست و شو داده شد [۱۸].

روش آماده‌سازی کمک منعقد کننده

به منظور اصلاح کمک منعقد کننده با نانوذرات از روش تشکیل هم‌زمان استفاده گردید. در این روش ابتدا ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر دیونیزه در یک بشر ریخته و pH آن توسط هیدروکلریک اسید در محدوده ۳-۴ تنظیم شد. ۱ میلی‌لیتر ماده آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان با ۱۰ میلی‌لیتر اتیل الکل خالص مخلوط و pH محلول آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان توسط اگزالیک اسید یک نرمال به سه رسید و به مدت یک ساعت برای هیدرولیز در دمای آزمایشگاه (۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفت. سپس محلول آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه مخلوط و ۱ گرم پلی‌آکریل آمید کاتیونی به این ترکیب اضافه گردید و به مدت ۲۰ دقیقه با شیکر مغناطیسی هم زده شد، سپس نانوذره آلومینیوم اکسید که به‌طور مجزا ساخت شده بود، به آرامی به محلول آماده شده اضافه شد تا نانوذرات روی سطح پلی‌آکریل آمید قرار گیرند. در نهایت ۰/۱ گرم پتاسیم پرسولفات و ۰/۱ گرم سدیم سولفات برای تکمیل پلیمریزاسیون به محلول اضافه و به مدت ۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد [۱۲].

از عمومی‌ترین روش‌ها برای تعیین سرعت صاف کردن لجن، زمان صاف کردن، مقاومت ویژه در برابر صاف کردن (SRF: Specific Resistance To Filtration) و زمان مکش

موین (Capillary Suction Time: CST) را می‌توان نام برد [۱۹]. چنانچه جامدات موجود در لجن و ویسکوزیته فیلتر شده در نمونه‌ها یکسان باشد، آزمون TTF، دارای همبستگی با نتایج زمان مکش موئین و مشابه مقاومت ویژه در برابر فیلتراسیون می‌باشد، با این خصوصیت که تست TTF بسیار ساده‌تر است. از طرف دیگر نتایج حاصل از این آزمون قابل استفاده در دیگر روش‌های آبدگیری، به‌خصوص فیلتراسیون خلأ می‌باشد [۲۰].

میزان pH، غلظت کمک منعقد کننده، سرعت و زمان اختلاط تند بهینه با توجه به نتایج داده‌های حاصل از چهار پارامتر زیر انتخاب شد:

- تعیین زمان فیلتراسیون نمونه (TTF) (زمان لازم جهت صاف نمودن ۵۰ میلی‌لیتر حجم نمونه) [۲۰].

- تعیین درصد رطوبت کیک لجن حاصل [۲۱].
- تعیین میزان کدورت آب فیلتر شده (مبنای میزان مواد خروجی در آب فیلتر شده) [۲۲].
- تعیین میزان کل جامدات معلق آب فیلتر شده [۱۷].

روش انجام آزمایش

در این مطالعه، به منظور سنجش قابلیت آبدگیری لجن از روش اندازه‌گیری زمان صاف کردن استفاده شد. ابتدا جهت تعیین pH بهینه عملکرد مواد کمک منعقد کننده، نمونه‌هایی از مقادیر مساوی لجن (۱۰۰ میلی‌لیتر) درون بشر ریخته، سپس با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید و سولفوریک اسید، pH آنها در محدوده ۴ تا ۹ تنظیم گشت. در مرحله بعد غلظت ثابتی از کمک منعقد کننده‌های مورد نظر (۲ میلی‌گرم در لیتر) به آنها افزوده و به کمک دستگاه جار تست هم زده شد (به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت ۳۰۰ rpm جهت اختلاط تند و سپس ۲۰ دقیقه با سرعت ۶۰ rpm برای اختلاط کند). سپس نمونه‌ها به قیف بوختر منتقل و به وسیله کاغذ صافی واتمن یک و با اعمال خلأ به قدرت ۵۱ کیلوپاسکال داخل دستگاه اندازه‌گیری زمان صاف کردن صاف شد. در تمامی نمونه‌ها، زمان لازم برای صاف کردن ۵۰ میلی‌لیتر مایع مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (هر چه زمان صاف کردن کوتاه‌تر

نمودار ۲ مشاهده می شود که نشان دهنده قرارگیری نانوذره مورد نظر بر روی ترکیب پلی آکریل آمید است.

نمودار ۱ دارای گروه های عاملی در پیک های مختلف می باشد. پیک 2937 cm^{-1} ارتعاشات گروه عاملی متیلن، 2133 cm^{-1} ارتعاشات گروه عاملی کربونیل، 1655 cm^{-1} ارتعاشات خمشی گروه عاملی آمین، 1134 cm^{-1} و 1444 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی گروه عاملی آسیل، 1522 cm^{-1} و 2937 cm^{-1} ارتعاشات کششی گروه عاملی متیل و پیک 3407 cm^{-1} ارتعاشات گروه عاملی هیدروکسیل را نشان می دهد. در شکل ۳ منحنی جذب آکریل آمید اصلاح شده توسط نانوذرات آلومینیوم اکسید، پیک 1679 cm^{-1} متعلق به ارتعاشات کششی N-H (گروه عاملی آمین) پلی آکریل آمید می باشد. پیک 1128 cm^{-1} را می توان به ارتعاشات خمشی CH_2 (گروه عاملی آسیل) از سطح پلی آکریل آمید اصلاح شده با نانوذرات آلومینیوم اکسید نسبت داد. باندهای 2937 cm^{-1} و 1525 cm^{-1} را نیز می توان به ارتعاش کششی باندهای C-H (گروه عاملی متیل) از سطح پلی آکریل آمید اصلاح شده نسبت داد. باندهای مشاهده شده بین 583 cm^{-1} و 469 cm^{-1} تأییدی بر وجود گروه های آلومینیوم اکسید در ترکیب است که نشان می دهد پلی آکریل آمید به خوبی توسط نانوذرات اکسید آلومینیوم اصلاح شده است. پیک جذبی 2130 cm^{-1} ارتعاشات گروه عاملی کربونیل را نشان می دهد. نوار جذبی ظاهر شده در ناحیه 3416 cm^{-1} به گروه OH- (گروه عاملی

باشد، قابلیت آبیگری لجن بیشتر است). در این مراحل تمامی نمونه ها برای مدت زمان ثابت دو دقیقه صاف شده، سپس کیک لجن تشکیل شده روی کاغذ صافی دقیقاً توزین گردید. در ادامه نمونه تا خشک شدن کامل درون فور قرار گرفت. بعد از خشک شدن مجدداً وزن کیک ثبت شده و در نهایت با داشتن وزن کیک مرطوب و خشک، درصد رطوبت کیک لجن مطابق معادله (۱) محاسبه شد [۱۷،۲۳]

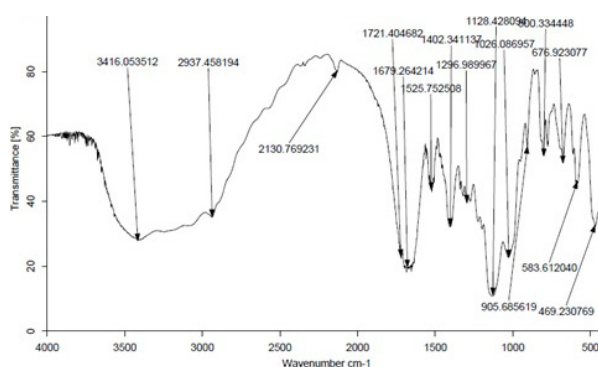
$$\text{معادله (۱)} \\ W_c = \frac{(W_1 - W_2) \times 100}{W_1}$$

میزان کدورت و کل جامدات معلق آب فیلتر شده نیز با استفاده از دستگاه DR۲۰۰۰ اندازه گیری شد [۲۴].

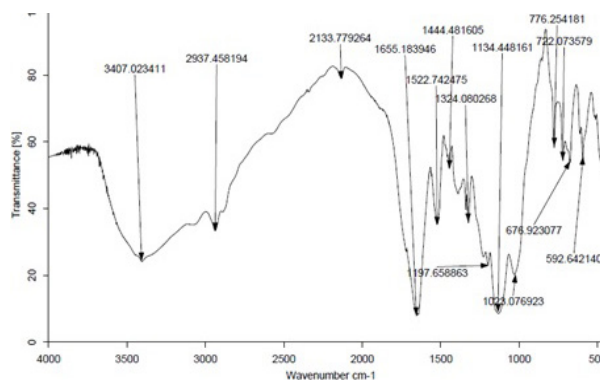
به منظور تعیین غلظت بهینه مواد کمک منعقد کننده، نمونه هایی از لجن مانند مرحله قبل در pH ثابت (pH بهینه شده در مرحله قبل) تهیه گردید و مقادیر مختلفی از کمک منعقد کننده (۱، ۲، ۴، ۶، ۸ میلی گرم در لیتر) به صورت محلول در آب به نمونه ها افزوده شد و تمامی آزمایش ها مانند مرحله قبل با شرایط یکسان انجام گرفت و غلظت بهینه با توجه به پارامترهای نامبرده مشخص شد [۹].

یافته ها

طیف IR کمک منعقد کننده خالص پلی آکریل آمید در نمودار ۱ آمده است و طیف کمک منعقد کننده اصلاح شده در



نمودار ۲: طیف FTIR نمونه اصلاح شده با نانوذرات



نمودار ۱: طیف FTIR نمونه پلی آکریل آمید خالص

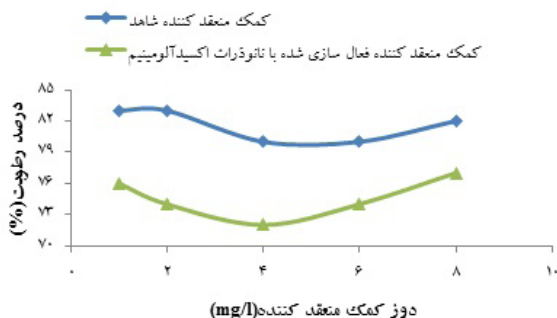


نمودار ۴: تأثیر pH بر کارایی فرآیند انعقاد (ب) درصد رطوبت کیک



نمودار ۶: تأثیر pH بر کارایی فرآیند انعقاد (د) میزان کل جامدات معلق (TSS)

نانوذرات آلومینیوم اکسید بر آبدگیری لجن در نمودارهای ۳ تا ۶ آمده است. طبق نتایج حاصل، مدت زمان فیلتراسیون، کدورت و کل جامدات معلق آب فیلترشده در pH=۵ و درصد رطوبت کیک لجن در pH=۴-۶ در حداقل میزان مشاهده گردید که در مقایسه



نمودار ۸: تأثیر دوز کمک منعقدکننده بر کارایی فرآیند انعقاد (ب) درصد رطوبت کیک لجن

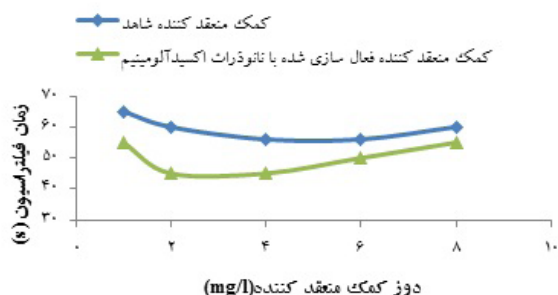


نمودار ۳: تأثیر pH بر کارایی فرآیند انعقاد (الف) مدت زمان فیلتراسیون (TTF)

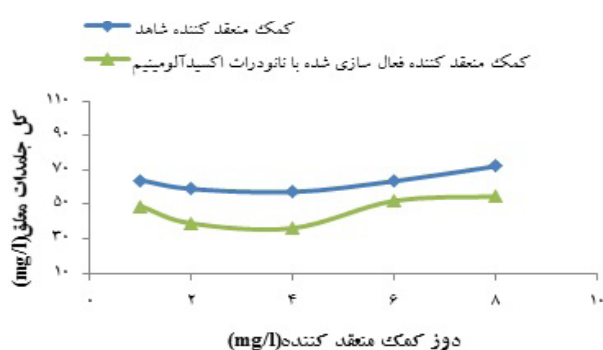


نمودار ۵: تأثیر pH بر کارایی فرآیند انعقاد (ج) میزان کدورت

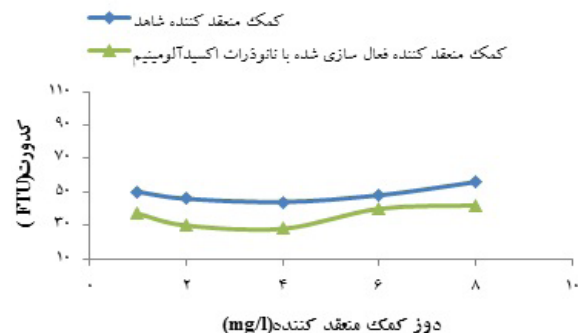
هیدروکسید) در ترکیب نسبت داده شده است [۲۵]. پیک جذب 1721 cm^{-1} نیز نمایانگر گروه C=O (گروه عاملی کربونیل) در ساختار اصلاح کننده سیلانی می باشد [۲۶].
نتایج تعیین pH بهینه تأثیر کمک منعقدکننده اصلاح شده با



نمودار ۷: تأثیر دوز کمک منعقدکننده بر کارایی فرآیند انعقاد (الف) مدت زمان فیلتراسیون (TTF)



نمودار ۱۰: تأثیر دوز کمک منعقد کننده بر کارایی فرآیند انعقاد (د) میزان کل جامدات معلق (TSS)



نمودار ۹: تأثیر دوز کمک منعقد کننده بر کارایی فرآیند انعقاد (ج) میزان کدورت

نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که تغییرات pH نمونه با راندمان فرآیند انعقاد و لخته سازی رابطه معکوس دارد. بیشترین راندمان فرآیند انعقاد و لخته سازی و آبگیری لجن در pH های اسیدی ملایم به دست آمد. بیشترین راندمان آبگیری کیک لجن در pH=۵ و کمترین راندمان آبگیری در pH های قلیایی به خصوص pH=۹ بود. در مطالعه ای توسط گنجی دوست و همکاران مشخص شد که فرآیند انعقاد و لخته سازی توسط دو دسته منعقد کننده های طبیعی و شیمیایی مورد مطالعه به طور قابل توجهی به pH وابسته بود و با افزایش مقدار pH میزان آبگیری لجن کاهش یافت و بهترین شرایط برای فرآیند انعقاد و لخته سازی در pH اسیدی ملایم و خنثی مشاهده شد. [۲۷]. کوپلیمرهای آکریل آمید به همراه مونومرهای کاتیونی بوده که باعث ارتقاء بار مثبت در این دسته از پلیمرها می شوند و پس از انحلال در آب، محلول خاصیت باری مثبت ایجاد می کنند. گروه های فعال پلیمر در محیط آبی پیوند قوی با کلوئیدهای معلق یا ذرات بسیار ریز ایجاد می نمایند. فعالیت پلیمرهای باردار کاتیونیک وابسته به برخورد های الکترواستاتیکی و تبادل بار بین ذرات معلق و پلیمر و ناپایداری خصوصیت سطح ذرات می باشد. ناپایداری خواص سطح ذرات و منعقد شدن بخش اعظم یک دسته از ذرات معلق، باعث تشکیل لخته شده که پس از ته نشینی به راحتی قابل جداسازی می باشند. اثر بهینه پلیمرها بر روی ذرات

با نمونه لجن شاهد به ترتیب ۳۳/۴، ۵۳/۳، ۶۸ و ۱۲/۲ درصد کاهش داشت.

با توجه به اهمیت پارامترهای درصد رطوبت کیک لجن، زمان فیلتراسیون، کدورت و کل جامدات معلق آب فیلتر شده، pH=۵ برای آماده سازی لجن جهت آبگیری با کمک منعقد کننده اصلاح شده با نانوذرات آلومینیوم اکسید، به عنوان pH بهینه انتخاب گردید.

با توجه به نتایج حاصل از تعیین غلظت بهینه (نمودارهای ۷ تا ۱۰) مدت زمان فیلتراسیون در غلظت های ۴ و ۲ میلی گرم بر لیتر از سایر نمونه ها کمتر و این مقادیر نسبت به نمونه شاهد ۲۴/۴ درصد کاهش داشت. رطوبت کیک لجن، کدورت و کل جامدات معلق آب فیلتر شده نیز در غلظت چهار میلی گرم بر لیتر، حداقل میزان مشاهده و نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۱/۲، ۵۷ و ۵۸ درصد کاهش داشت.

بحث و نتیجه گیری

در طیف IR کمک منعقد کننده اصلاح شده با نانوذرات آلومینیوم اکسید که در نمودار ۳ آورده شده است، پیک نزدیک 583 و 469 cm^{-1} از منحنی مشخصه باند جذب پیوند AL-O می باشد که نشان می دهد نانوذرات بر روی ترکیب پلی آکریل آمید قرار گرفته است.

با اندازه‌گیری توانایی تأثیر پلیمر بر روی ذره قابل تخمین است. این توانایی به نوع و خواص سطح ذرات و کیفیت نمونه (قدرت هدایت الکتریکی، سختی و عوامل کاهش‌دهنده نمونه، pH و خواص یونی نمونه) بستگی دارد؛ بنابراین کاتیون یا آنیون متصل به پیکره شیمیایی پلی آکریل آمید تعیین‌کننده نوع بار فعال پلیمر می‌باشد. وزن مولکولی و شدت بار الکترولیت‌ها در فعالیت آنها تأثیر به‌سزایی دارد. همچنین محدوده pH بهینه را گسترش داده و مقدار مصرف ماده منعقدکننده را کاهش می‌دهند [۲۸]. در مطالعه دیگری توسط ونگ و همکاران شرایط بهینه برای غلظت و pH کمک منعقدکننده پلی آکریل آمید به ترتیب ۵ میلی گرم بر لیتر و ۷-۵ با ۹۹ درصد حذف TSS و ۹۱ درصد آب بازیافتی به‌دست آمده است که با مطالعات ما همخوانی داشت. این مطالعه نشان می‌دهد که پلی آکریل آمید کاتیونی با وزن مولکولی بالا سبب تقویت تجمع اولیه می‌شود؛ ولی تأثیر بار کاتیونی برای لخته‌سازی پایدار محسوس است [۲۲]. عمل لخته‌سازی از طریق جمع‌آوری ترکیبات کلئیدی بر روی شاخه‌های پلی آکریل آمید اصلاح‌شده با نانوذرات اکسید آلومینیوم، باعث بهبود آبگیری لجن می‌شود. همچنین این مواد باعث ایجاد لخته‌های حجیم و محکم شده که آب پیوندی بین کلئیدها را خارج کرده و قابلیت آبگیری لجن را افزایش می‌دهند. نانوذرات آلومینیوم اکسید در تعامل با عوامل ایجاد وصله‌های کاتیونی بر روی سطوح ذرات، با ایجاد لخته‌های ریز و محکم و ایجاد فضای آزاد در لجن باعث بهبود و افزایش قابلیت آبگیری از لجن می‌شوند. لازم به ذکر است هر چه عوامل کاتیونی کمک منعقدکننده مؤثرتر بوده و بتوانند پیوندهای مثبت بهتر و بیشتری بر روی سطوح ذرات به وجود بیاورند، عملکرد نانوذرات آلومینیوم اکسید افزایش یافته و در نتیجه ایجاد لخته‌های ریز و متراکم و ایجاد فضای آزاد بین این لخته‌ها، قابلیت آبگیری لجن بهبود می‌یابد. پلی آکریل آمید در مجاورت نانوذرات، ترکیبات و لخته‌های آبگیری‌کننده به‌وجود خواهد آورد که این ترکیبات، کمتر حالت چسبندگی داشته و

باعث تسهیل در خروج آب از فرآیند آبگیری لجن می‌شوند [۲۹]. مطابق نتایج به‌دست آمده از دوز کمک منعقدکننده، مشاهده گردید که ابتدا با افزایش دوز کمک منعقدکننده آماده‌سازی شده تا دوز ۴ میلی گرم در لیتر، پارامترهای اندازه‌گیری آبگیری لجن کاهش می‌یابد؛ اما از این دوز به بعد با افزایش دوز کمک منعقدکننده تمامی پارامترها افزایش یافته و آبگیری لجن کاهش می‌یابد. مطالعه‌ای که توسط لی و لو با هدف بررسی آبگیری لجن توسط دو نوع پلی الکترولیت به‌عنوان کمک منعقدکننده صورت گرفت؛ نشان داده شد که ابتدا با افزایش دوز کمک منعقدکننده زمان مکش موئین و مقاومت آبگیری لجن (SRF) کاهش می‌یابد؛ اما افزایش دوز از یک مقدار به بعد باعث کاهش آبگیری لجن یا افزایش زمان مکش موئین و مقاومت آبگیری لجن می‌شود که دلیل آن جذب مقداری از پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی در دوزهای بالا به سایت‌های پیوست لجن می‌باشد؛ اما مقدار جذب نشده اضافی در فاز آبی باقی مانده و در نتیجه آبگیری لجن کاهش می‌یابد [۱۶]. در مطالعه دیگری که توسط آرفین و همکاران با عنوان بررسی سیستم لخته‌سازی هیبریدی PolyDADMAC کوپل شده با پلی آکریل آمید در تصفیه فاضلاب کاغذسازی انجام گرفت نشان داد که بهترین دوز این کمک منعقدکننده ۰/۴-۰/۲ میلی گرم در لیتر است. در این مطالعه کاهش TSS و کدورت، حذف COD و پتانسیل زتا با دوزهای مختلف این کمک منعقدکننده فعال‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که PolyDADMAC نقش تثبیت‌کننده و پلی آکریل آمید نقش ایجاد پل را دارد. طبق نتایج حاصل از این پژوهش، افزایش دوز PolyDADMAC باعث ایجاد لخته‌های بهتری می‌شود که در نتیجه خنثی‌سازی بار الکتریکی در کلئیدها رخ می‌دهد و مکانیسم پل زدن بین ذرات که توسط پلی آکریل آمید ایجاد می‌شود، فرآیند لخته‌سازی و میزان لخته‌های ایجاد شده را افزایش می‌دهد و زنجیره‌های طولانی با وزن مولکولی بالا ایجاد می‌شود که زنجیره‌ای و دنباله‌دار می‌باشند. این حلقه‌ها و دنباله‌ها به مکانیسم

کاهش رطوبت کیک لجن در مقایسه با کمک منعقد کننده شاهد (پلی آکریل آمید کاتیونی) استفاده از این پلیمر نیز قابل توجه است. با در نظر داشتن راندمان بالای کمک منعقد کننده پلی آکریل آمید اصلاح شده با نانوذرات اکسید آهن در بهبود آبیگری لجن فاضلاب شهری، کاربرد این ماده در تصفیه لجن می تواند مشکل آبیگری را تا حدودی برطرف نماید.

قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان نامه امانعلی خانی دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط می باشد. تأمین کننده مالی این مطالعه دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد بود.

References

1. Yin X, Han P, Lu X, Wang Y. A review on the dewaterability of bio-sludge and ultrasound pretreatment. *Ultrason Sonochem* 2004; 11(6):337-348.
2. Baeyens J, Hosten L, van Vaerenbergh E. *Wastewater Treatment*, Netherlands: Kluwer Academic Publishers; 1997. P. 876.
3. Zhen G, Lu X, Li Y, Zhao Y, Wang B, Song Y, et al. Novel insights into enhanced dewaterability of waste activated sludge by Fe(II)-activated persulfate oxidation. *Bioresour Technol* 2012; 119:7-14.
4. Batstone R, Smith Jr JE, Wilson D. *The safe disposal of hazardous wastes*. Washington, D.C: Banco Mundial; 1989.
5. Krishnamurthy S, Viraraghavan T. Chemical conditioning for dewatering municipal wastewater sludges. *Energy Sour* 2005; 27(1-2):113-122.
6. Pinotti A, Zaritzky N. Effect of aluminum sulfate and cationic polyelectrolytes on the destabilization of emulsified wastes. *Waste Manag* 2001; 21(6):535-542.
7. Cheremisinoff PN. *Sludge: management and disposal*. New Jersey: Prentice Hall; 1994.
8. Mininni G, Santori M. Problems and perspectives of sludge utilization in agriculture. *Agricult Ecosyst Environ* 1987; 18(4):291-311.
9. Wang J, Chen C, Gao Q, Li T, Zhu F. Relationship between the characteristics of cationic polyacrylamide and sewage sludge dewatering performance in a full-scale plant. *Proced Environ Sci* 2012; 16:409-417.
10. Qu X, Alvarez PJ, Li Q. Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Res* 2013; 47(12):3931-3946.
11. Ovenden C, Xiao H. Flocculation behaviour and mechanisms of cationic inorganic microparticle/polymer systems. *Coll Surf Physicochem Engin Asp* 2002; 197(1):225-234.
12. Wang F, Fan J, Zhu H, Han K, Zou J, Sun H. Preparation of nano-modified polyacrylamide and its application on solid-liquid separation in waste drilling mud. *Adv Chem Engin Sci* 2011; 1(2):33.
13. Lin Q, Peng H, Zhong S, Xiang J. Synthesis, characterization, and secondary sludge dewatering

- performance of a novel combined silicon–aluminum–iron–starch flocculant. *J Hazard Mater* 2015; 285:199-206.
14. Thapa KB, Qi Y, Hoadley AF. Interaction of polyelectrolyte with digested sewage sludge and lignite in sludge dewatering. *Coll Surf Physicochem Engin Asp* 2009; 334(1):66-73.
15. Ganjidoust H, Khaleghi SM, Mokhtarani N. Effects of natural polymers and chemical coagulants on the dewatering of sewage sludge. *Iran J Polym Sci Technol* 2007; 19(6):485-491.
16. Lee CH, Liu JC. Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning. *Water Res* 2000; 34(18):4430-4436.
17. American Public Health Association, American Water Works Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. New York: American Public Health Association; 1995.
18. Rajaeiyan A, Bagheri-Mohagheghi MM. Comparison of sol-gel and co-precipitation methods on the structural properties and phase transformation of γ and α -Al₂O₃ nanoparticles. *Adv Manufact* 2013; 1(2):176-182.
19. Takahide S. Kurita handbook of water treatment. Tokyo: Kurita Water Industries, Ltd; 1999.
20. Bishop P. Municipal sewage sludge: management, processing and disposal. Florida: CRC Press; 1995.
21. Greenhalgh LK, McFarland MJ, Cardon GE, Vutran M, Schmitz MD, Brobst RB. Metals in biosolids-amended soils in Western Utah. *J Agricult Exten Rural Dev* 2009; 1(1):8-17.
22. Wong S, Teng TT, Ahmad AL, Zuhairi A, Najafpour G. Treatment of pulp and paper mill wastewater by polyacrylamide (PAM) in polymer induced flocculation. *J Hazard Mater* 2006; 135(1):378-388.
23. Chen Y, Yang H, Gu G. Effect of acid and surfactant treatment on activated sludge dewatering and settling. *Water Res* 2001; 35(11):2615-2620.
24. Özacar M. Effectiveness of tannins obtained from valonia as a coagulant aid for dewatering of sludge. *Water Res* 2000; 34(4):1407-1412.
25. Sun W, Zhang G, Pan L, Li H, Shi A. Synthesis, characterization, and flocculation properties of branched cationic polyacrylamide. *Int J Polymer Sci* 2013; 2013:397027.
26. Kang JS, Yu CL, Zhang FA. Effect of silane modified SiO₂ particles on poly (MMA-HEMA) soap-free emulsion polymerization. *Iran Polym J* 2009; 18(22):927-935.
27. Ganjidoost H, Meschi Nezami M, Mokhtarani N. Effects of natural polymers and chemical coagulants on sewage sludge dewatering. *Poly Sci Technol* 2006; 19(6):485-491.
28. Kulicke WM, Kniewske R, Klein J. Preparation, characterization, solution properties and rheological behaviour of polyacrylamide. *Prog Poly Sci* 1982; 8(4):373-468.
29. Hubbe MA. Microparticle programs for drainage and retention. *Micro and Nanoparticles in Papermaking*. Atlanta: TAPPI Press; 2005. P. 1-36.
30. Ariffin A, Razali MA, Ahmad Z. PolyDADMAC and polyacrylamide as a hybrid flocculation system in the treatment of pulp and paper mills waste water. *Chem Engin J* 2012; 179:107-111.