

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 1, pp: 78-95

Investigation on Efficiency of Different Chemical Coagulants on Reduction of Turbidity, Sulfate and Ammonia in the Wastewater of Zagros Petrochemical Company

A. Moradi¹, A. R. Nekoei^{2*}, M. Gholipour³

1. PhD. Student in Physical Chemistry, Dept. of Chemistry, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
2. Assoc. Prof. of Chemistry, Dept. of Chemistry, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
(Corresponding Author) nekoei@sutech.ac.ir
3. Senior Expert in Applied Research, Zagros Petrochemical Company, Asalouye, Iran

(Received April 15, 2022 Accepted Oct. 25, 2022)

To cite this article:

Moradi, A., Nekoei, A. R., Gholipour, M. 2023. "Investigation on efficiency of different chemical coagulants on reduction of turbidity, sulfate and ammonia in the wastewater of Zagros petrochemical company" Journal of Water and Wastewater, 34(1), 78-95. Doi: 10.22093/wwj.2022.357704.3283. (In Persian)

Abstract

Zagros Petrochemical Company, as one of the largest methanol companies in Iran, faces the problem of high levels of turbidity and sulfate and ammonia pollutants in its wastewater. So, it is required to effectively purify this wastewater for reusing in steam production in the methanol unit; also, to bring the amount of pollutants to the required environmental standards. The purpose of the present study is to investigate the coagulation process and compare the effectiveness of six different coagulants, including aluminum sulfate (alum), iron (II) sulfate, chloroferric, polyaluminum chloride and two types of cationic and anionic polyelectrolytes, in reducing the existing amount of turbidity, sulfate and ammonia in the wastewater of this company. During these experiments, the effects of effluent pH and coagulant concentration parameters on the efficiency of reducing the turbidity and the mentioned pollutants has been investigated. According to the results, and considering the long flocculation time, as well as low formation of very small and non-quick precipitating suspended particles, the coagulants alum, chloroferric and iron (II) sulfate do not have a significant effect on the removal of turbidity from the target wastewater sample. Meanwhile, the coagulants PAC, cationic and anionic polyelectrolytes, with low concentrations, are suitably effective, and, in combination with lime, can remove a significant amount of the turbidity (about 99%) and the ammonia (about 60%) from the investigated wastewater. Also, the highest amount of the sulfate reduction (about 45%) is attributed to the alum coagulant. Finally, taking into account the costs, accessibility and compatibility of the wastewater treatment package of the Zagros Petrochemical Company, the coagulant PAC in a concentration of 5 mg/L, in combination with lime at a pH of 12, has been suggested and the mentioned problems were completely resolved.

Keywords: Petrochemical Wastewater Treatment, Flocculation, Alum, Chloroferric, Polyaluminum Chloride, Polyelectrolyte.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۱، صفحه: ۷۸-۹۵

بررسی کارایی منعقدکننده‌های شیمیایی متفاوت در کاهش کدورت، سولفات و آمونیاک در پساب شرکت پتروشیمی زاگرس

آرزو مرادی^۱، عبدالرضا نکویی^{۲*}، محمد قلی‌پور^۳

۱- دانشجوی دکتری شیمی فیزیک، گروه شیمی فیزیک،

دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۲- دانشیار شیمی، گروه شیمی فیزیک، دانشکده شیمی،

دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

(نویسنده مسئول) nekoei@sutech.ac.ir

۳- کارشناس ارشد پژوهش‌های کاربردی شرکت پتروشیمی زاگرس،

عسلویه، ایران

(پذیرش ۱۴۰۱/۸/۳)

(دریافت ۱۴۰۱/۱/۲۶)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

مرادی، آ.، نکویی، ع. ر.، قلی‌پور، م.، ۱۴۰۲، "بررسی کارایی منعقدکننده‌های شیمیایی متفاوت در کاهش کدورت، سولفات و آمونیاک در پساب شرکت

پتروشیمی زاگرس" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۱)، ۷۸-۹۵. Doi: 10.22093/wwj.2022.357704.3283

چکیده

شرکت پتروشیمی زاگرس که یکی از بزرگترین شرکت‌های تولید متانول کشور است، در پساب خود با مشکل زیاد بودن مقدار کدورت و آلاینده‌های سولفات و آمونیاک مواجه بوده، بنابراین برای استفاده مجدد در تولید بخار در واحد متانول و همچنین برای رساندن مقدار آلاینده‌ها به استانداردهای محیط‌زیستی لازم، نیازمند تصفیه مؤثر است. هدف از این پژوهش، بررسی فرایند انعقاد و لخته‌سازی و مقایسه کارایی شش منعقدکننده‌ی مختلف شامل سولفات آلومینیم (آلوم)، سولفات آهن (II)، کلروفریک، پلی آلومینیم کلراید و دو نوع پلی الکترولیت کاتیونی و آنیونی در کاهش هم‌زمان مقدار کدورت، سولفات و آمونیاک موجود در پساب این شرکت بود. طی این آزمایش‌ها اثر پارامترهای pH پساب و غلظت مواد منعقدکننده بر روی بازدهی کاهش کدورت و آلاینده‌های مذکور بررسی شد. طبق نتایج و با توجه به زمان لخته‌سازی طولانی و نیز تشکیل ذرات معلق اندک، بسیار ریز و غیرقابل ته‌نشینی سریع، منعقدکننده‌های آلوم، کلروفریک و سولفات آهن (II) تأثیر چندان به‌سزایی بر روی حذف کدورت از نمونه پساب مورد آزمایش ندارند. این در حالی است که منعقدکننده‌های پلی آلومینیم کلراید و پلی الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی با غلظت‌های کم به‌خوبی مؤثر بوده و در ترکیب با آهک می‌توانند قسمت قابل‌توجهی از کدورت (حدود ۹۹ درصد) و آمونیاک (حدود ۶۰ درصد) را از پساب مورد بررسی حذف کنند. همچنین بیشترین میزان کاهش سولفات (حدود ۴۵ درصد) مربوط به منعقدکننده‌ی آلوم است. در نهایت با در نظر گرفتن هزینه‌ها و قابلیت دسترسی و سازگاری با پکیج تصفیه پساب، منعقدکننده پلی آلومینیم کلراید در غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر در ترکیب با آهک و در pH برابر ۱۲ برای تصفیه پساب صنعتی شرکت پتروشیمی زاگرس پیشنهاد و مشکلات بیان شده کاملاً مرتفع شدند.

واژه‌های کلیدی: تصفیه پساب پتروشیمی، لخته‌سازی، آلوم، کلروفریک، پلی آلومینیم کلراید، پلی الکترولیت



۱- مقدمه

اختلاط، نوع و مقدار مصرف منعقدکننده هستند (Wang et al., 2007).

از متداولترین منعقدکنندههایی که تاکنون برای تصفیه آب و پساب استفاده شده‌اند می‌توان به سولفات آلومینیم^۳ (آلوم)، کلروفریک^۴، سولفات آهن (II)^۵، پلی آلومینیم کلراید^۶ اشاره کرد و ترکیباتی مانند بنتونیت^۷، آلومینات سدیم^۸ و سیلیکات سدیم^۹ و انواع پلی الکترولیت^{۱۰}های کاتیونی، آنیونی و غیریونی به‌عنوان کمک منعقدکننده در تصفیه پساب برای حذف کدورت و آلاینده‌های آب به کار می‌روند (Letterman and Pero, 1990, Shi et al., 2007, Wang et al., 2004).

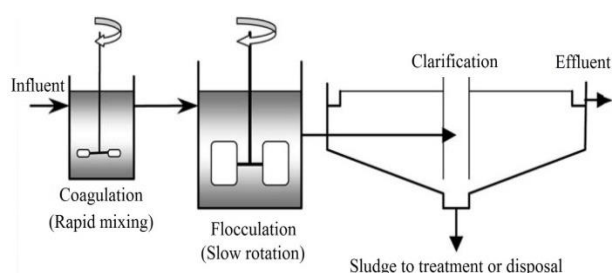


Fig. 1. Schematic of the coagulation and flocculation process (Wang et al., 2005)

شکل ۱- شماتیکی از فرایند انعقاد و لخته‌سازی (Wang et al., 2005)

پژوهش‌های بسیاری در مورد روند انعقاد و لخته‌سازی انجام شده و منعقدکننده‌های مختلفی بررسی شده‌اند (Yazdanbakhsh et al., 2012, Hassani et al., 2011, Rahimi et al., 2016, Nikoonahad et al., 2017, Banejad et al., 2012). فرج‌نژاد و قربانی، امکان استفاده از پلی آلومینیم کلراید به‌جای کلروفریک در تصفیه پساب پتروشیمی را بررسی کردند. بر اساس نتایج جار تست^{۱۱}، پلی آلومینیم کلراید کارایی بیشتری دارد و لخته‌های ایجاد شده توسط پلی آلومینیم کلراید بزرگتر از لخته‌های کلروفریک است (Farajnezhad and Gharbani, 2012).

³ Aluminium Sulfate

⁴ Ferric Chloride (FeCl₃)

⁵ Iron(II) Sulfate (feso₄)

⁶ Poly-Aluminum Chloride (PAC)

⁷ Bentonite

⁸ Sodium Aluminate

⁹ Sodium Silicate

¹⁰ Polyelectrolyte (PE)

¹¹ Jar Test

صنایع جهانی به‌ویژه صنعت پتروشیمی با توجه به تولید فراورده‌های گوناگون و متنوع که برخی از این محصولات در تأمین بسیاری از نیازهای اساسی بشر از جمله تجهیزات و لوازم بهداشتی و پوشاک و حتی صنایع غذایی، نقش مهمی ایفا می‌کنند (Alnaizy, 2008)، به‌صورت جزئی جدایی‌ناپذیر از زندگی انسان درآمده‌اند. در کنار این همه فواید، صنایع پتروشیمی به دلیل مصرف مقدار بسیار زیاد آب طی فرایندهای خود، حجم بسیار زیادی از پساب‌های صنعتی^۱ را نیز تولید می‌کنند (Behnami et al., 2016, Botalova et al., 2009, Tobiszewski et al., 2012, Zhang et al., 2011).

پساب پتروشیمی که از بزرگترین منابع آلاینده محیط‌زیست محسوب می‌شود، ترکیبات شیمیایی بسیار پیچیده و ناهمگن دارد و حاوی غلظت‌های زیادی از ترکیباتی مانند هیدروکربن‌های آروماتیک و آلیفاتیک چند حلقه‌ای، انواع فلزات سنگین، فنل، اسیدهای آلی، سیانید، سولفید، آمونیاک و روغن است (Malamis et al., 2015, Mao et al., 1994, Yeruva et al., 2015) که حتی مقدار کم آنها سمی و سرطان‌زا بوده و معمولاً در برابر تصفیه مقاوم هستند (Castillo et al., 1999, Ding et al., 2016). از این رو عدم تصفیه مناسب پساب صنایع پتروشیمی، عواقب و مشکلات بسیار جدی و جبران‌ناپذیری را متوجه زندگی و سلامتی انسان می‌کند (Cechinel et al., 2016).

روش انعقاد و لخته‌سازی^۲ یکی از پرکاربردترین تکنولوژی‌ها و بخشی از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی است که در تصفیه آب و پساب بسیار استفاده می‌شود (Boisvert et al., 1997, Zarei et al., 2018). در فرایند انعقاد، ذرات ریز غیر قابل‌ته‌نشینی به نام کلوئیدها که عامل اصلی کدورت هستند، به هم چسبیده و ذرات بزرگتر و قابل‌ته‌نشینی را تشکیل می‌دهند (Ersoy et al., 2009).

به نظر می‌رسد فرایند تصفیه پساب بدون استفاده از موادی به نام منعقدکننده که سرعت ته‌نشینی ذرات کلوئیدی را افزایش می‌دهد، غیرممکن است. شکل ۱ یک شماتیک کلی از فرایند انعقاد، لخته‌سازی و ته‌نشینی پساب را نشان می‌دهد. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کارایی فرایند انعقاد، پارامترهایی از جمله دما، pH، زمان

¹ Industrial Wastewater

² Coagulation and Flocculation



منعقدکننده آلومینیم سولفات، آلومینیم کلروهیدرات و فریک کلراید، بازدهی بیش از ۹۵ درصد دارند (Ashraf et al., 2018). زارعی محمودآبادی و همکاران، بهینه‌سازی فرایند انعقاد و لخته‌سازی در تصفیه فاضلاب صنایع غذایی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که فرایند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از پلی آلومینیم کلراید و پلی الکترولیت‌های کاتیونی کارایی مناسبی را در تصفیه پساب مذکور داشته و با کاهش مواد آلی می‌تواند به‌عنوان یک مرحله پیش‌تصفیه قبل از تصفیه بیولوژیکی به کار رود (Zareimahmoudabady et al., 2019).

ژائو و همکاران، به بررسی افزایش بازده تصفیه پساب با استفاده از ماده منعقدکننده آلومینیم سولفات با کاتولینیت پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که با استفاده از این ماده منعقدکننده، بازده حذف ذرات جامد بیش از ۹۰ درصد بوده که نسبت به ماده منعقدکننده آلومینیم سولفات بیشتر است (Zhao et al., 2019).

آهنگری و همکاران، با بررسی کارایی آلوم، کلروفریک و پلی آلومینیم کلراید در حذف کدورت و سایر آلاینده‌ها در تصفیه‌خانه صنعتی شکوهیه قم، قبل از ورود به سیستم RO، نشان دادند که منعقدکننده آلوم و پلی آلومینیم کلراید کارایی زیادی در حذف کدورت و بقیه آلاینده‌های پساب تصفیه‌خانه دارند (Ahangari et al., 2020).

شرکت پتروشیمی زاگرس واقع در منطقه ویژه اقتصادی پارس جنوبی به‌عنوان یکی از بزرگترین شرکت‌های تولید متانول کشور فعالیت می‌کند. واحد تصفیه پساب صنعتی این شرکت با ظرفیت ۲۵۰۰ مترمکعب در روز، بخشی از سرویس جانبی تولید آب دیونیزه برای بخارسازی و استفاده در تولید متانول و ایجاد انرژی مکانیکی در توربین‌ها است. بخش تصفیه پساب این شرکت با مشکل بالا بودن میزان کدورت و آلاینده‌های سولفات و آمونیاک مواجه بوده و بدون تصفیه مؤثر، پساب مذکور قابلیت استفاده مجدد برای تولید آب دیونیزه و تولید بخار را ندارد. همچنین برای رساندن میزان آلاینده‌ها به استانداردهای محیط‌زیستی لازم برای دفع، تصفیه مؤثر پساب این شرکت امری بسیار مهم و ضروری است.

این پژوهش برای ارزیابی کارایی چندین منعقدکننده‌ی مختلف در دسترس، از نظر بیشترین سرعت لخته‌سازی و ته‌نشینی و بزرگترین اندازه ذرات کلئیدی برای لخته‌سازی آلاینده‌های موجود

ژنگ و همکاران، برای تصفیه پساب خانگی از فرایند انعقاد قبل از اولترافیلتراسیون استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که پلی آلومینیم کلراید می‌تواند پروتئین‌ها را حذف کند. همچنین درصد حذف فسفر با استفاده از آهن (III) کلراید و آلومینیم کلراید بیشتر از پلی آلومینیم کلراید بوده است (Zheng et al., 2012).

پژوهشی دیگر با بررسی اثر منعقدکننده‌های سولفات فریک، آلوم، سولفات آهن (II) و ترکیب آهک^۱ با سولفات فرو، برای تصفیه فاضلاب به روش جارتست، گزارش شده که در آن آلوم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر بهترین لخته‌سازی را ایجاد می‌کند (Ismail et al., 2012).

نتایج پژوهش بیرجندی و همکاران در مقایسه کارایی آلوم و پلی آلومینیم کلراید برای حذف آلاینده‌های پساب کارخانه کاغذسازی نشان داد که در بین دو منعقدکننده بررسی شده، پلی آلومینیم کلراید با میزان حذف ۹۶ درصد کدورت و ۹۹ درصد COD بهترین نتیجه را داشته است (Birjandi et al., 2015).

دهقانی و علیزاده، اثرات منعقدکننده طبیعی مورینگا اولیفرا و آلوم در تصفیه فاضلاب پالایشگاه نفت بندرعباس را بررسی کردند و دریافتند که منعقدکننده آلوم با غلظت ۴۰ میلی‌گرم در لیتر می‌تواند COD، کدورت و TSS را به ترتیب حدود ۵۱، ۹۲ و ۸۵ درصد از پساب پالایشگاه حذف کند (Dehghani and Alizadeh, 2016).

دولار و همکاران طی پژوهشی از آهن (III) کلراید و کربن فعال به‌عنوان منعقدکننده در تصفیه پساب‌های آلوده در محل دفن زباله‌ها استفاده کرده و حذف ۸۶ درصدی مواد آلی و حذف کدورت ۸۷ درصدی را طی فرایند تصفیه نشان دادند (Dolar et al., 2016).

طبق بررسی فهیمی‌نیا و همکاران، در تصفیه پساب سنگ‌بری مشخص شد که کارایی منعقدکننده‌ها در حذف کدورت تقریباً یکسان بوده و بیشترین میزان حذف کدورت مربوط به آهک (۹۹ درصد) و کمترین میزان مربوط به آلوم (۸۶ درصد) است (Fahiminia et al., 2017).

اشرف و همکاران نشان دادند که تصفیه پساب و حذف کدورت و مواد گاز زغال‌سنگ حل شده در آب با استفاده از سه ماده

¹ Lime [Ca(OH)₂]



آزمایشات آب و فاضلاب (Rice et al., 2012) استفاده شده است.

ابتدا آزمایش‌های لازم برای تعیین کیفیت پساب خام و خصوصیات و محتویات آن انجام شده و مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

آزمایش جار بر روی نمونه‌ای از پساب به حجم ۲۰ لیتر انجام شد که در هر نوبت، درون هریک از بشرها، ۵۰۰ میلی‌لیتر از پساب تحت آزمایش جار تست قرار می‌گرفت. در شکل ۲ تعدادی نمونه‌های پساب قبل و بعد از آزمایش نمایش داده شده‌اند.

به منظور تعیین میزان pH بهینه و نیز مقدار غلظت بهینه برای هر یک از مواد منعقدکننده بررسی شده، آزمایش‌ها در دو مرحله به شرح زیر انجام شدند (لازم به ذکر است تمام آزمایش‌ها در دمای اتاق و فشار محیط انجام شدند):

- در مرحله اول به منظور تعیین pH مطلوب برای حذف حداکثری آلاینده‌ها، میزان pH نمونه‌هایی از مقدار یکسان پساب استفاده از شیر آهک ۲۰ درصد، در محدوده ۹ تا ۱۲ تنظیم شد. سپس مقدار ثابتی از ماده منعقدکننده مورد نظر به هریک از آنها افزوده و توسط دستگاه جار تست به هم زده شد. در پایان اختلاط، ۳۰ دقیقه زمان ته‌نشینی برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. در انتها، pH بهینه که در آن بیشترین بازدهی حذف آلاینده مشاهده شد، مشخص شد. لازم به ذکر است که قبل از اندازه‌گیری میزان حذف آمونیاک، نمونه‌ها به مدت ۴۰ دقیقه تحت عملیات هوادهی قرار گرفته‌اند.

- در مرحله دوم، به صورت هم‌زمان، مقدار مختلفی از هر یک از مواد منعقدکننده، در pH بهینه شده در مرحله قبل، به نمونه‌های یکسان پساب افزوده و توسط دستگاه جار تست به هم زده شد. سپس با سنجش بازدهی حذف برای پارامترهای کدورت، سولفات و آمونیاک، در هر یک از نمونه‌های پساب، میزان غلظت بهینه هر یک از منعقدکننده‌ها مشخص شد. بازدهی از طریق معادله ۱ محاسبه می‌شود (Akyol and Bayramoğlu, 2005)

$$100 \times \frac{(C_i - C_f)}{C_i} = \text{درصد بازدهی} \quad (1)$$

که در آن

C_i غلظت اولیه آلاینده بر حسب mg/L و C_f غلظت نهایی آلاینده بر حسب mg/L است.

در پساب صنعتی شرکت پتروشیمی زاگرس، انجام شد. با بررسی‌های لازم و کافی، بهترین ماده منعقدکننده در غلظت و pH بهینه با در نظر گرفتن عملکرد مناسب، همچنین قابلیت دسترسی و انطباق با پساب صنعتی پتروشیمی زاگرس و پکیج تصفیه پساب آن معرفی شد. به طوری که پساب نهایی از نظر استانداردهای محیط‌زیستی نیز بهینه باشد.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش، یک پژوهش بنیادی - کاربردی بود که در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از دستگاه جار تست در یک آزمایشگاه صنعتی انجام شد. نمونه‌های پساب استفاده شده در این آزمایش، از خروجی نهایی پساب حاصل از پتروشیمی زاگرس (تولیدکننده متانول) تهیه شده‌اند. مواد منعقدکننده مصرفی استفاده شده در این بررسی شامل پلی آلومینیم کلراید، آلوم، سولفات آهن (II)، کلروفریک و دو نوع پلی الکترولیت کاتیونی و آنیونی هستند که همه مواد توسط واحد خرید کالای شرکت پتروشیمی زاگرس خریداری شده و برای انجام آزمایش‌ها در اختیار قرار داده شده‌اند. برای تعیین خصوصیات پساب خام و پساب حاصل از فرایند انعقاد، از دستگاه‌هایی به این شرح استفاده شد: دستگاه کدورت سنج^۱ مدل Turb 550IR ساخت شرکت WTW؛ دستگاه pH متر مدل 8603 ساخت کشور METTLER TOLDEDO سوئیس؛ اندازه‌گیری سولفات توسط دستگاه کروماتوگرافی یونی مدل 850 professional IC ساخت شرکت Mrtrohm سوئیس؛ سنجش آمونیاک با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل DR5000-HACH ساخت آمریکا جار تست مورد استفاده (ساخت شرکت ZAG CHEMIE CO، مدل JTR90)، شامل چهار همزن کاملاً یکسان است که هر کدام درون یک بشر ۱ لیتری قرار دارد و همزن‌ها توسط یک موتور، با سرعت متغیر حدود ۱۰ تا ۲۵۰ rpm می‌چرخند.

برای تعیین میزان کدورت، pH، سولفات و آمونیاک در نمونه اولیه پساب و نمونه پس از انعقادسازی، به ترتیب از روش‌های Standard method-4110، ASTM D-1293، ASTM D-1889، ASTM D-1426 بر اساس کتاب روش‌های استاندارد

¹ Turbidimeter



جدول ۱- ویژگی‌های مختلف بررسی شده مربوط به نمونه اولیه پساب

Table 1. Different characteristics studied related to primary wastewater sample

Ammonia (ppm)	Sulfate (ppm)	Turbidity(NTU) ^a	EC (μs/cm)	pH
2996	13258	153	19550	7.4

^aNephelometric turbidity units



Fig. 2. Samples of 500 ml of wastewater before and after the Jar Test

شکل ۲- نمونه‌های ۵۰۰ میلی‌لیتری از پساب قبل و بعد از آزمایش جارتست

سپس تأثیر غلظت‌های مختلف مواد در pH بهینه بررسی شود.

۳-۱- تعیین pH بهینه برای هر یک از منعقدکننده‌ها

pH محلول یکی از مهم‌ترین عوامل و پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد فرایند انعقاد و لخته‌سازی است (Zazouli et al., 2012). در واقع هر منعقدکننده یک pH بهینه دارد که در آن با غلظت معینی از منعقدکننده در کوتاه‌ترین زمان ممکن، بیشترین بازده حذف آلاینده رخ می‌دهد (Yousefi and Zazouli, 2008); بنابراین تنظیم و کنترل دقیق pH پساب، در این کار اهمیت بسیار زیادی دارد. لازم به ذکر است که pH اولیه پساب ۷/۴ بوده و با توجه به شرایط موجود پساب و پکیج تصفیه پساب شرکت پتروشیمی زاگرس و الزام طراح پکیج در استفاده از pHهای قلیایی برای ورود پساب به مراحل بعدی تصفیه (Electrocoagulation و RO)، تنظیم pH در مقدار بیشتر (در محدوده ۹ تا ۱۲)، از طریق افزودن مقدار مناسب آهک به ظرف نمونه پساب انجام شد. همچنین آلاینده‌ها در pH قلیایی احتمالاً به علت واکنش با یون‌های هیدروکسید و تشکیل لخته‌های هیدروکسید، کاهش بیشتری نشان می‌دهند (Chu, 2001, Ghorbanian et al., 2015). همچنین غلظت کلیه مواد منعقدکننده بررسی شده در پساب تحت آزمایش

در کلیه مراحل اختلاط پساب و مواد منعقدکننده، دستگاه جارتست برای اختلاط سریع (انعقادسازی) برای ناپایداری ذرات روی مدت زمان ۱ دقیقه و سرعت ۱۸۰ دور بر دقیقه و برای اختلاط آهسته (لخته‌سازی) روی مدت ۱۵ دقیقه و سرعت ۴۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. همچنین زمان ته‌نشینی برابر با ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. بعد از انجام هر یک از آزمایش‌ها و پس از پایان زمان ته‌نشینی، بلافاصله نمونه‌ها از زیر دستگاه خارج شدند و اندازه‌گیری میزان کدورت و سولفات و آمونیاک از سطح ۲ سانتی‌متری از کف محلول‌های نمونه‌گیری انجام شد. لازم به ذکر است همه آزمایش‌ها دو بار تکرار شدند. در نهایت نمودارهای مربوط به بررسی پارامترهای مختلف مؤثر در کارایی هر یک از منعقدکننده‌ها در کاهش کدورت و آلاینده‌های سولفات و آمونیاک، با استفاده از نرم‌افزار Sigma Plot 14.0 ترسیم شدند.

۳- نتایج و بحث

برای بررسی کارایی هر یک از مواد منعقدکننده بر کاهش کدورت و آلاینده‌های سولفات و آمونیاک، لازم است قبل از بررسی تأثیر غلظت آنها بر پساب، ابتدا محدوده بهینه pH پساب که هر یک از منعقدکننده‌ها در آن بهترین عملکرد را دارند، تعیین و تنظیم شود و



pH برابر با ۵ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد.

۳-۱-۱- تعیین pH بهینه پلی آلومینیم کلراید

شکل ۳-a نمودار حاصل از آزمایشات تأثیر pH در فرایند انعقاد و لخته‌سازی بر بازدهی کاهش کدورت، سولفات و آمونیاک با استفاده از منعقدکننده پلی آلومینیم کلراید را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش pH میزان حذف سولفات و آمونیاک افزایش پیدا کرده و در pH معادل ۱۲ به بیشترین مقدار (به ترتیب ۲۱ و ۶۲ درصد) می‌رسد.

طبق نمودار مذکور، تغییر pH در محدوده مورد بررسی، تأثیر محسوسی روی حذف کدورت توسط پلی آلومینیم کلراید نداشته است. به هر حال در تمامی محدوده‌ها مقدار حذف کدورت بالا و در دامنه ۹۷ تا ۹۹ درصد بوده است که بیشترین مقدار آن در pH معادل ۱۱/۵ است.

در محیط‌های اسیدی، آلومینیم بیشتر به شکل Al^{3+} وجود دارد که باعث جذب، ایجاد اتصال و چسبندگی بین کلوئیدها نمی‌شود. در نتیجه کارایی انعقاد کاهش می‌یابد. برعکس در محیط‌های قلیایی گونه‌های پلیمری بر روی سطح ذرات کلوئیدی جذب شده و باعث تجمع ذرات کلوئیدی می‌شود و کارایی انعقاد افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2011).

۳-۱-۲- تعیین pH بهینه پلی الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی

به‌منظور تعیین pH بهینه برای مواد منعقدکننده پلی الکترولیت کاتیونی و آنیونی با غلظت ثابت ۵ میلی‌گرم در لیتر، آزمایش‌هایی در pHهای مختلف نمونه پساب انجام شد که مشاهدات و نتایج حاصل در شکل ۳-b و ۳-c نشان داده شده است.

مطابق این نمودارها پلی الکترولیت کاتیونی و آنیونی رفتار تقریباً یکسانی نشان می‌دهند به‌طوری که تغییر pH تأثیر محسوسی روی درصد حذف بالای کدورت توسط این دو نداشته است. به‌هر حال pH معادل ۱۱/۵ با اختلاف کمی نسبت به سایر pHها به‌عنوان pH بهینه برای حذف کدورت توسط هر دو منعقدکننده‌های کاتیونی و آنیونی (با درصد حذف به ترتیب ۹۹/۳ و ۹۹/۲ درصد) تعیین شده است.

همچنین مطابق شکل ۳، برای حذف سولفات و آمونیاک، pH معادل ۱۲ به‌عنوان pH بهینه برای دو پلی الکترولیت کاتیونی و آنیونی مورد بررسی تعیین شده است. مقدار حذف آلاینده‌ها در pHهای بهینه در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳-۱-۳- تعیین pH بهینه سولفات آلومینیم (آلوم)

شکل ۳-d نمودار نتایج تأثیر منعقدکننده آلوم بر حذف کدورت و کاهش میزان سولفات و آمونیاک در pHهای مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار آلوم در pH معادل ۱۱ بهترین عملکرد را در کاهش کدورت به میزان ۷۳ درصد و در pH معادل ۱۲ بهترین عملکرد را در کاهش سولفات و آمونیاک به ترتیب به میزان ۳۵ و ۵۴ درصد داشته است.

۳-۱-۴- تعیین pH بهینه سولفات آهن (II)

شکل ۳-h نمودار تأثیر pH در کاهش آلاینده‌ها توسط ماده منعقدکننده سولفات آهن (II) با غلظت ثابت ۵ میلی‌گرم در لیتر را نشان می‌دهد. طبق این نمودار بیشترین میزان کاهش کدورت در pH معادل ۱۰/۵ به میزان ۷۰ درصد بوده، بیشترین میزان کاهش سولفات به میزان ۲۹ درصد در pH معادل ۱۱/۵ و بیشترین مقدار حذف آمونیاک به میزان ۵۲ درصد در pH معادل ۱۲ مشاهده شد.

۳-۱-۵- تعیین pH بهینه کلروفریک

نتیجه آزمایش‌های تعیین pH بهینه برای منعقدکننده کلروفریک، در غلظت ثابت ۵ میلی‌گرم در لیتر برای حذف کدورت، سولفات و آمونیاک در شکل ۳-f نشان داده شده است. مطابق این نمودار مشاهده می‌شود که بیشترین میزان حذف کدورت در pH معادل ۱۰ به میزان ۷۲ درصد بوده و بیشترین درصد حذف سولفات توسط کلروفریک در pH معادل ۱۱/۵ و به میزان ۲۲ درصد و نیز بیشترین درصد حذف آمونیاک توسط این منعقدکننده در pH معادل ۱۲ و به میزان ۵۶ درصد است.

۳-۲- مقایسه منعقدکننده‌های مختلف باهم در pHهای مختلف

به‌منظور مقایسه عملکرد منعقدکننده‌های مختلف بررسی شده در دامنه pH از ۹ تا ۱۲، در حذف کدورت، سولفات و آمونیاک نمودارهای مربوطه به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ داده شده‌اند.



جدول ۲- pH های بهینه و بازدهی حذف متناظر آنها*

Table 2. Optimum pHs and their corresponding removal efficiency

Coagulant	Optimum pH			Removal percentage at optimum pH		
	Turbidity	Sulfate	Ammonia	Turbidity	Sulfate	Ammonia
Poly-aluminum chloride	11.5	12	12	99.0	20.8	61.9
Cationic polyelectrolyte	11.5	12	12	99.3	26.4	59.2
Anionic polyelectrolyte	11.5	12	12	99.2	25.4	58.3
Aluminium sulfate	11	12	12	72.8	34.9	53.8
Iron (II) sulfate	10.5	11.5	12	69.6	28.9	51.8
Ferric chloride	10	11.5	12	72.3	21.9	55.8

* The concentration of all coagulants is equal to constant 5 mg/L.

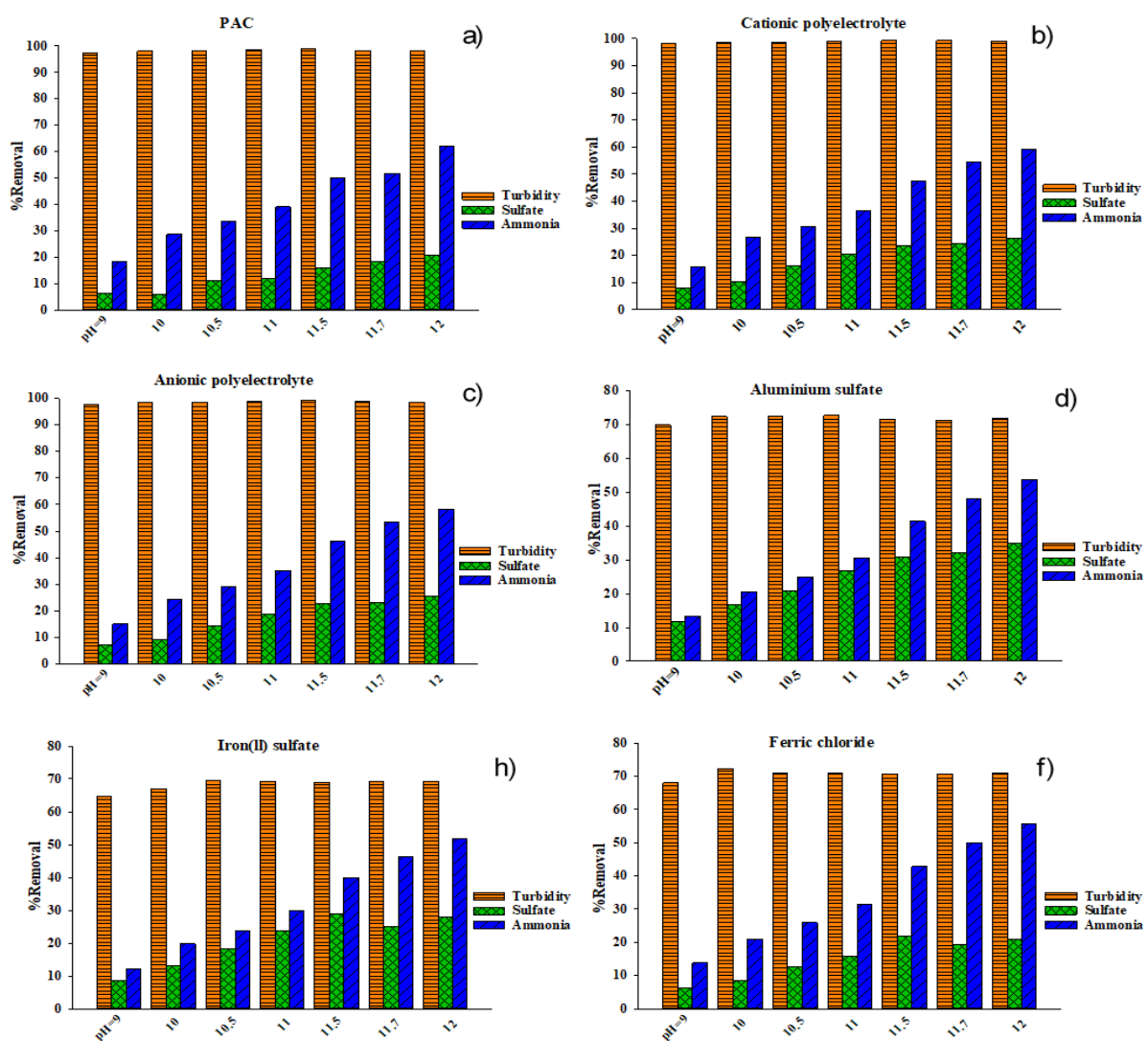


Fig. 3. Effect of pH value on the reduction efficiency of turbidity, sulfate and ammonia (after aeration) and sulfate at a constant concentration of 5 mg/L of studied coagulants

شکل ۳- تأثیر مقدار مختلف pH بر بازدهی کاهش کدورت، سولفات و آمونیاک (پس از هوادهی) در غلظت ثابت

۵ میلی‌گرم در لیتر منعقدکننده‌های بررسی شده



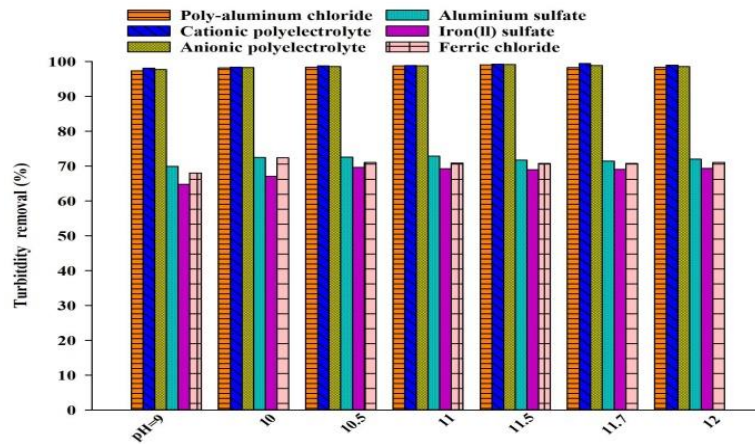


Fig. 4. Reduction of turbidity by the coagulants studied in the pH range from 9 to 12

شکل ۴- کاهش کدورت توسط منعقدکننده‌های بررسی شده در دامنه pH از ۹ تا ۱۲

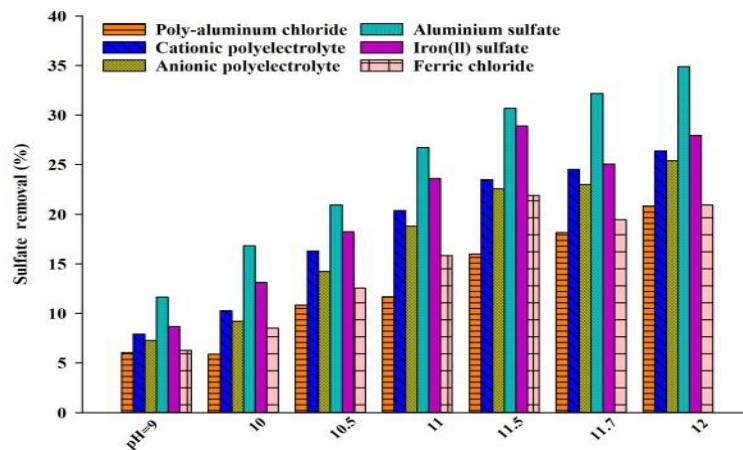


Fig. 5. Reduction of sulfate by the coagulants studied in the pH range from 9 to 12

شکل ۵- کاهش سولفات توسط منعقدکننده‌های بررسی شده در دامنه pH از ۹ تا ۱۲

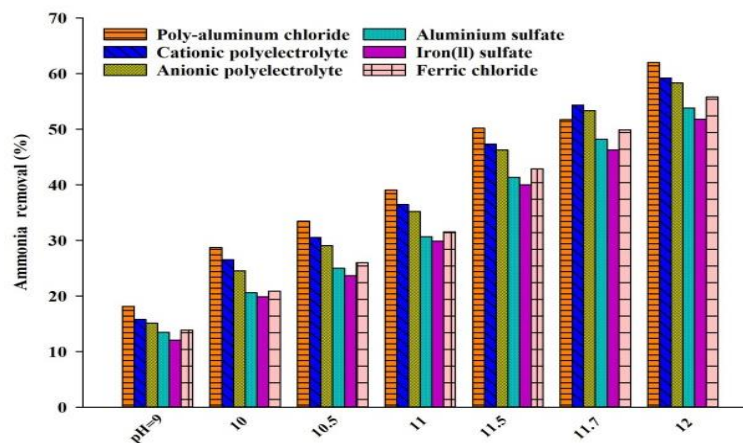


Fig. 6. Reduction of ammonia by the coagulants studied in the pH range from 9 to 12

شکل ۶- کاهش آمونیاک توسط منعقدکننده‌های بررسی شده در دامنه pH از ۹ تا ۱۲



که در هر pH، همه منعقدکننده‌ها تقریباً به یک اندازه باعث حذف آمونیاک از پساب شده‌اند. نتیجه مهم دیگری که از این شکل به دست می‌آید، وابستگی شدید میزان کاهش آمونیاک به pH است، به طوری که با افزایش pH درصد حذف آمونیاک توسط تمام منعقدکننده‌ها افزایش می‌یابد. حداکثر میزان کاهش آمونیاک برای همه منعقدکننده‌های بررسی شده در pH معادل ۱۲ اتفاق می‌افتد.

در برخی پژوهش‌های اخیر نیز ارتباط خطی بین افزایش pH و

حذف آمونیاک در پساب بازار ماهی‌فروشان (Bagastyo et al.,

2022) و بازیافت آمونیاک در روش انعقاد الکتریکی (Xu et al.,

2022) گزارش شده است. می‌توان بیان کرد که هرچند تفاوت

زیادی در میزان حذف آمونیاک توسط منعقدکننده‌های مختلف در یک pH دیده نمی‌شود، اما حداکثر کاهش توسط پلی آلومینیم کلراید و در pH معادل ۱۲ و به میزان ۶۲ درصد دیده می‌شود.

همچنین حذف آمونیاک از پساب همراه با هوادهی انجام شده است.

جدول ۲، نتایج مربوط به pH بهینه برای حداکثر حذف هر یک

از آلاینده‌های موجود مورد بررسی توسط هر یک از

منعقدکننده‌های پژوهش و همچنین مقدار حذف آلاینده در pH

بهینه را نشان می‌دهد. این نتایج قبل از بهینه‌سازی غلظت

منعقدکننده‌ها و مربوط به غلظت ثابت ۵ میلی‌گرم در لیتر برای

هر یک از منعقدکننده‌ها در آزمایش مربوطه است. همان طور که

جدول ۲ نشان می‌دهد، برای هر یک از منعقدکننده‌ها، pH بهینه

برای حذف آلاینده‌های مختلف، متفاوت است. این در حالی است

که برای حذف عملی همه‌ی آلاینده‌ها از پساب اصلی در واحد

پساب شرکت پتروشیمی زاگرس توسط هر منعقدکننده، نیاز است

که یک pH مشترک بهینه انتخاب شود. به این منظور با توجه به

اختلاف کم pH بهینه برای حذف کودرت با pHهای بهینه حذف

سولفات و آمونیاک (جدول ۲) و همچنین تأثیر بسیار اندک pH بر

حذف کودرت (شکل ۴)، در اینجا بر روی انتخاب pH مشترک

بهینه از میان pHهای بهینه حذف سولفات و آمونیاک تمرکز شده

است.

با توجه به جدول ۲، برای منعقدکننده‌های پلی آلومینیم کلراید،

پلی الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی و آلوم، pH معادل ۱۲

به‌عنوان pH مشترک بهینه انتخاب شد. در خصوص سولفات آهن

(II) و کلروفوریک (با توجه به وابستگی بیشتر حذف آمونیاک به

pH) pH بهینه مربوط به حذف آمونیاک (pH معادل ۱۲) به‌عنوان

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تغییر pH تأثیر

زیادی روی حذف کودرت توسط منعقدکننده‌های بررسی شده

نداشته است. به‌علاوه واضح است که پلی آلومینیم کلراید و پلی

الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی بسیار بهتر از دیگر منعقدکننده‌های

بررسی شده کودرت را کاهش می‌دهند، به طوری که در کلیه محدوده

pH بررسی شده بیش از ۹۷ درصد کودرت را کاهش داده‌اند. این

در حالی است که منعقدکننده‌های سولفات آهن (II)، آلوم و

کلروفوریک تأثیر کمتری در حذف کودرت داشته و همه آنها در

محدوده ۶۵ تا ۷۳ درصد کودرت را کاهش داده‌اند.

بیرجندی و همکاران نیز در بررسی پساب حاصل از کارخانه

کاغذسازی نشان دادند که در غلظت‌های کم منعقدکننده، عملکرد

پلی آلومینیم کلراید در حذف کودرت از عملکرد آلوم بهتر است

(Birjandi et al., 2015).

کارایی فوق‌العاده‌تر منعقدکننده‌های پلی آلومینیم کلراید و پلی

الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی در حذف کودرت به این دلیل

برجسته‌تر می‌شود که مدت زمان حذف کودرت و شفاف‌سازی

پساب برای این سه منعقدکننده بسیار سریع‌تر از سایرین و در مدت

زمان کمتر از ۳ تا ۴ دقیقه بوده است (به هر حال زمان کلی ۳۰

دقیقه برای ته‌نشینی پساب برای کلیه منعقدکننده‌ها در تمامی

آزمایش‌ها در نظر گرفته شد). همچنین نمونه پساب بررسی شده در

صورت عدم افزودن مواد منعقدکننده پس از گذشت ساعت‌ها

همچنان کودرت بسیار زیادی دارد.

تأثیر منعقدکننده‌های مختلف بررسی شده و pH بر روی حذف

سولفات در شکل ۵ مقایسه شده است. در اینجا میزان کاهش

سولفات در پساب رابطه مستقیم با pH دارد، به طوری که در pH

معادل ۱۲ حداکثر میزان حذف سولفات برای هر یک از

منعقدکننده‌ها اتفاق می‌افتد. این نتیجه با نتیجه عبادی و همکاران که

نشان دادند میزان حذف سولفات و نیترات در روش انعقاد

الکتریکی با افزایش pH افزایش می‌یابد، هم‌خوانی دارد (Ebadi et

al., 2021) علاوه بر این، بر اساس شکل ۵، آلوم در تمامی pHهای

تحت بررسی بیشترین تأثیر را در حذف سولفات داشته و در pH

معادل ۱۲ این میزان حذف به حدود ۳۵ درصد می‌رسد.

شکل ۶ تأثیر منعقدکننده‌ها و pHهای مختلف در حذف

آمونیاک را نشان می‌دهد. در این شکل، نوع منعقدکننده تأثیر

زیادی روی کاهش آمونیاک در یک pH مشخص ندارد، به طوری



حذف همزمان هر سه آلاینده بیشترین مقدار را داشته است و در صورتی که موضوع هزینه مواد پراهمیت‌تر از چند درصد بهبود حذف باشد، آنگاه با توجه به شکل ۷ غلظت‌های کمتر منعقدکننده نیز می‌توانند کاربردی باشند.

۳-۳-۲- بررسی غلظت بهینه پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی
غلظت‌های ۰/۵ تا ۱۰ میلی‌گرم در لیتر از منعقدکننده‌های پلی‌الکترولیتی بررسی شده در pH معادل ۱۲ برای کاهش آلاینده‌های مختلف، بررسی شده و نتایج در شکل ۷-b و ۷-c گزارش شده‌اند. بیشترین بازدهی حذف کدورت، سولفات و آمونیاک به ترتیب ۹۹/۷، ۲۷/۱ و ۵۹/۴ درصد برای پلی‌الکترولیت کاتیونی و ۹۹/۸، ۲۵/۵ و ۵۹/۴ درصد برای پلی‌الکترولیت آنیونی در غلظت ۱ میلی‌گرم در لیتر از هر نمونه پلی‌الکترولیت مشاهده شد. مطابق نتایج، حداکثر بازدهی حذف آلاینده‌ها در غلظت ۱ میلی‌گرم در لیتر بود و در غلظت‌های بیشتر بازدهی کاهش پیدا کرد.

در پژوهشی چونگ و همکاران نشان دادند میزان حذف¹ TSS با افزایش مقدار پلیمر کاتیونی 1200 B کاهش می‌یابد. آنها این کاهش بازدهی حذف را به تعلیق مجدد ذرات با افزایش پلی‌الکترولیت در غلظت‌های بیش از غلظت بهینه نسبت دادند (Chong et al., 2009).

۳-۳-۳- بررسی غلظت بهینه سولفات آلومینیم (آلوم)
شکل ۷-d تغییرات درصد حذف آلاینده‌ها پس از افزودن مقدار مختلف منعقدکننده آلوم در pH معادل ۱۲ را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است تا غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، شیب نمودار حذف کدورت و سولفات به شدت صعودی است و به همین دلیل افزایش غلظت آلوم تا ۶۰ میلی‌گرم در لیتر بررسی شد. مقدار زیاد غلظت آلوم، از طریق افزایش غلظت رسوب‌های هیدروکسید آلومینیم و در نتیجه افزایش سرعت اجتماع و نیز گرفتار کردن ذرات آلاینده، سرعت انعقاد را افزایش داد. طبق نتایج به دست آمده، مقدار ۴۰ میلی‌گرم در لیتر از آلوم به‌عنوان غلظت بهینه موجب کاهش کدورت، سولفات و آمونیاک به ترتیب به میزان ۹۱/۱، ۴۵/۲ و ۵۹/۲ درصد شد.

pH مشترک بهینه انتخاب شد. بنابراین باتوجه به نتایج به دست آمده، pH معادل ۱۲ به‌عنوان pH مشترک بهینه برای حذف همه آلاینده‌ها، توسط هر کدام از منعقدکننده‌های بررسی شده، در نظر گرفته شد.

۳-۳-۳- تعیین غلظت بهینه برای هر یک از منعقدکننده‌ها
کم یا زیاد بودن بیش از حد غلظت منعقدکننده منجر به تضعیف عملکرد تشکیل لخته می‌شود؛ بنابراین به‌منظور کاهش هزینه‌ها و بهترین عملکرد فرایند تصفیه و همچنین تشکیل لخته و لجن مناسب، تعیین غلظت بهینه ماده منعقدکننده اهمیت به‌سزایی دارد (Sarkar et al., 2006).

به‌این منظور با استفاده از محلول‌های استوک، غلظت‌های ۰/۵، ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر از مواد منعقدکننده مختلف در ۵۰۰ میلی‌لیتر از نمونه پساب در pH مشترک بهینه هر منعقدکننده (که برای همه منعقدکننده‌ها ۱۲ است) ساخته شد. همچنین از غلظت‌های بیشتر برای مواد گران قیمت‌تر اجتناب شد. نتایج مربوط به حذف هر یک از آلاینده‌های بررسی شده در غلظت‌های مختلف منعقدکننده‌ها در pH‌های بهینه در شکل ۷ نشان داده شده است. در ادامه غلظت‌های بهینه هر منعقدکننده که در آن بیشترین میزان حذف همزمان هر سه آلاینده مشاهده شده، بررسی می‌شوند. با توجه به اینکه گاهی میزان افزایش حذف آلاینده، در مقابل میزان افزایش غلظت منعقدکننده، ارزش کاربردی ندارد، بنابراین می‌توان بیان کرد این موضوع باید در هر پژوهش با توجه به پکیج مورد بررسی، بودجه، هزینه‌ها و حداقل موردنظر در کاهش آلاینده‌ها، در نظر گرفته شود.

۳-۳-۱- بررسی غلظت بهینه پلی‌آلومینیم کلراید
تأثیر غلظت‌های مختلف پلی‌آلومینیم کلراید (۰/۵ تا ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) در pH مشترک بهینه ۱۲ برای حذف کدورت، سولفات و آمونیاک آزمایش شده و نتایج در شکل ۷-a نشان داده شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر که در آن حداکثر میزان کاهش همزمان آلاینده‌ها (۹۹، ۲۱ و ۶۱ درصد به ترتیب برای کدورت، سولفات و آمونیاک) مشاهده شده به‌عنوان غلظت بهینه انتخاب شد. این غلظت بهینه (و سایر غلظت‌های بهینه گزارش شده در ادامه این بخش) صرفاً غلظتی است که در آن میزان

¹ Total Suspended Solids (TSS)



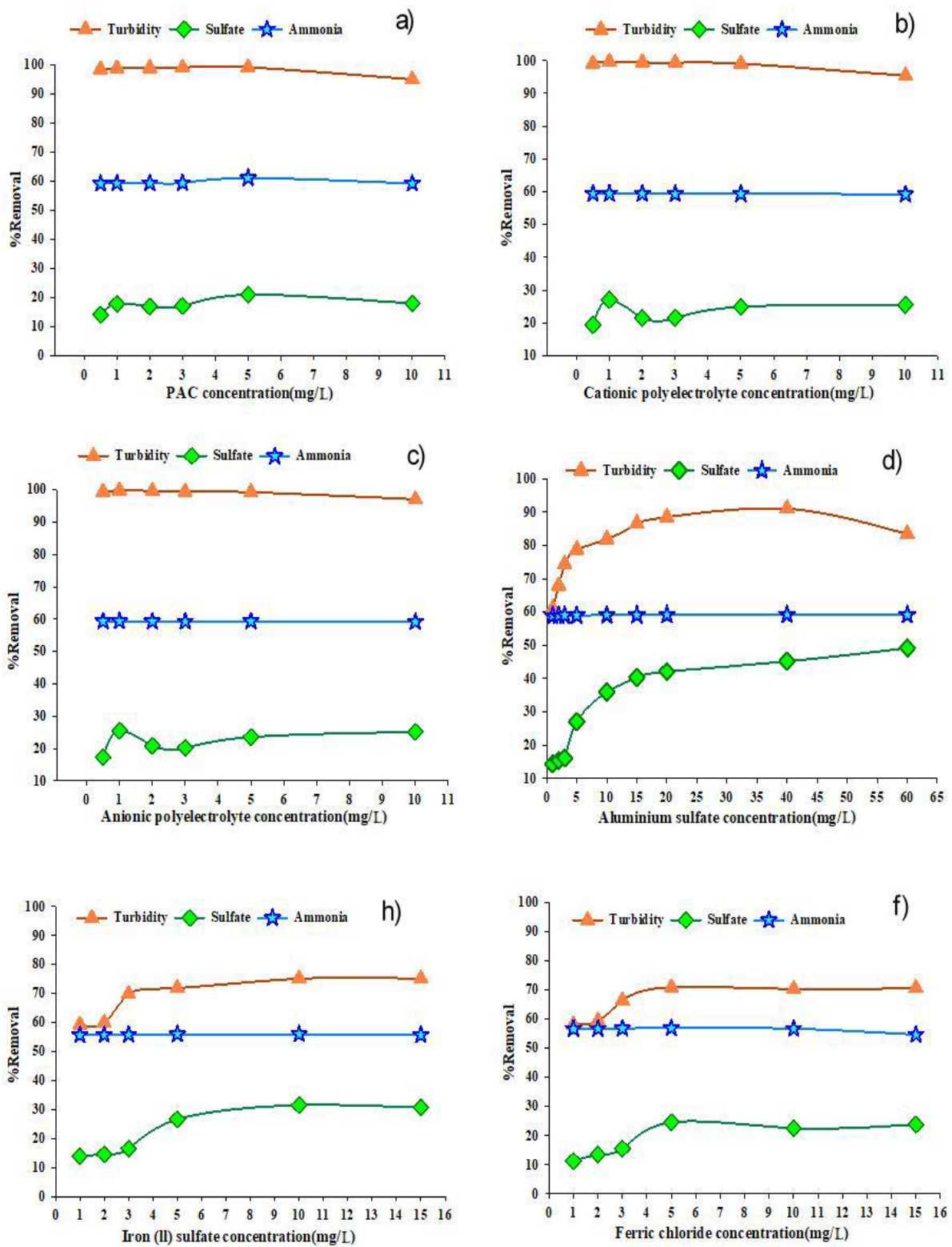


Fig. 7. Effect of different coagulant concentrations on the reduction of turbidity, sulfate and ammonia at optimal common pH

شکل ۷- تأثیر غلظت منعقدکننده‌های مختلف بر کاهش کدورت، سولفات و آمونیاک در pH مشترک بهینه



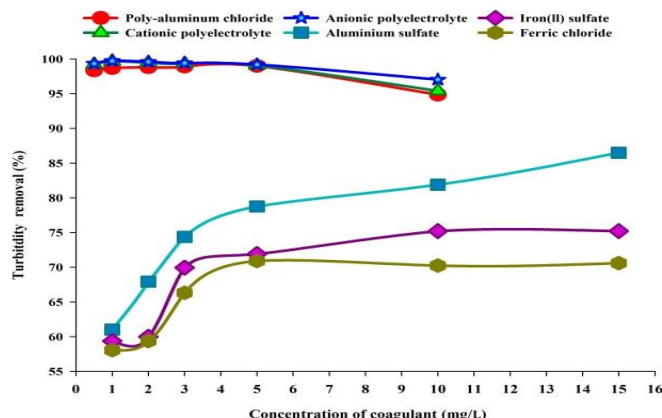


Fig. 8. Effect of different coagulant concentrations on turbidity reduction

شکل ۸- تأثیر غلظت مواد منعقدکننده مختلف در کاهش کدورت

کمترین بازدهی را در حذف کدورت داشته است. این نتایج در تطابق کامل با پژوهش‌های عرفات (Arafat, 2007) و مرزوک و همکاران (Merzouk et al., 2011) در تصفیه پساب نساجی و ارسوی و همکاران (Ersoy et al., 2009) در تصفیه پساب سنگ‌بری، لی و همکاران (Lee et al., 2009) در تصفیه پساب بیمارستانی و عبدالله‌زاده و همکاران (Abdolah Zadeh et al., 2009) است.

شکل ۸ نشان می‌دهد که کارایی منعقدکننده‌های پلیمری در کاهش کدورت، با افزایش بیشتر غلظت نسبت به غلظت بهینه، کاهش می‌یابد. بیشترین میزان حذف کدورت مربوط به پلی الکترولیت آنیونی با غلظت ۱ mg/L (و برابر با ۹۹/۸ درصد است. این نتیجه با پژوهش‌های وانرکار و همکاران در تصفیه پساب صنایع غذایی که نشان دادند ترکیب منعقدکننده‌های آهک و پلی الکترولیت آنیونی بهترین عملکرد را در حذف کدورت دارد، در تطابق کامل است (Vanerkar et al., 2013).

شکل ۹ نمودار درصد کاهش سولفات در مقابل غلظت‌های مختلف منعقدکننده‌های مختلف را نشان می‌دهد. طبق این نمودار، در غلظت‌های کمتر، منعقدکننده‌های پلی الکترولیتی و در غلظت‌های بیشتر، آلوم و سولفات آهن (II) کارایی بیشتری در حذف سولفات نشان می‌دهند. غلظت‌های بیشتر آلوم بهترین عملکرد را در حذف سولفات نشان می‌دهند به طوری که در غلظت ۶۰ mg/L، مقدار حذف سولفات به حدود ۵۰ درصد می‌رسد (شکل ۷- d).

۳-۳-۴- بررسی غلظت بهینه سولفات آهن (II)

شکل ۷- h نمودار تغییرات درصد کاهش آلاینده‌ها در مقابل غلظت‌های مختلف سولفات آهن (II) در pH معادل ۱۲ را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار غلظت بهینه این منعقدکننده برای حذف آلاینده‌ها برابر با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد که در آن درصد حذف کدورت، سولفات و آمونیاک، به ترتیب برابر با ۷۵/۲، ۳۱/۵ و ۵۶/۰ درصد بود.

۳-۳-۵- بررسی غلظت بهینه کلروفوریک

تغییرات حذف کدورت، سولفات و آمونیاک پساب تحت تأثیر مقدارهای مختلف منعقدکننده کلروفوریک در pH معادل ۱۲ در شکل ۷- f آمده است. بر این اساس غلظت بهینه کلروفوریک برای کاهش آلاینده‌ها، ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بود که میزان کاهش کدورت، سولفات و آمونیاک در این غلظت به ترتیب ۲۴/۶، ۷۰/۹ و ۵۶/۹ درصد بود. نکته قابل توجه در ارتباط با این منعقدکننده این بود که افزایش بیشتر غلظت آن، میزان رنگ پساب را به علت باقی ماندن کلروفوریک اضافی در محلول، افزایش می‌دهد.

۳-۳-۴- مقایسه منعقدکننده‌های مختلف در غلظت‌های مختلف

در pH مشترک بهینه

شکل ۸ نتایج مربوط به تأثیر مواد منعقدکننده مختلف بر کاهش کدورت از پساب را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود هر ۳ ترکیب پلیمری بررسی شده کارایی بسیار بیشتری (بیش از ۹۵ درصد) نسبت به ۳ منعقدکننده دیگر نشان می‌دهند و کلروفوریک



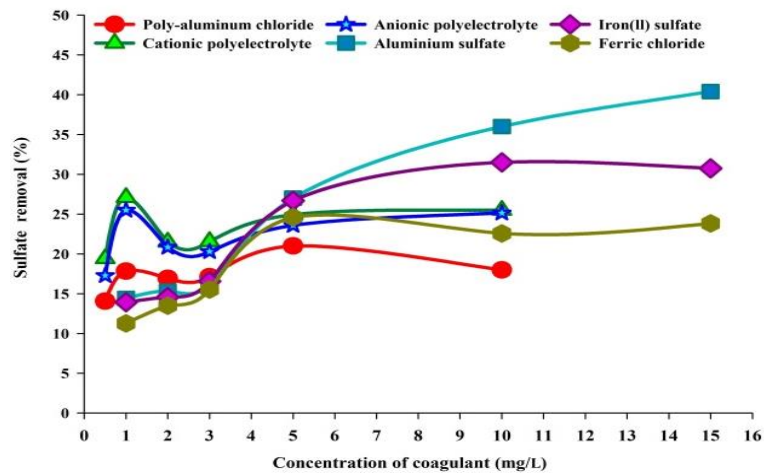


Fig. 9. Effect of different coagulant concentrations on sulfate reduction

شکل ۹- تأثیر غلظت مواد منعقدکننده مختلف در کاهش سولفات

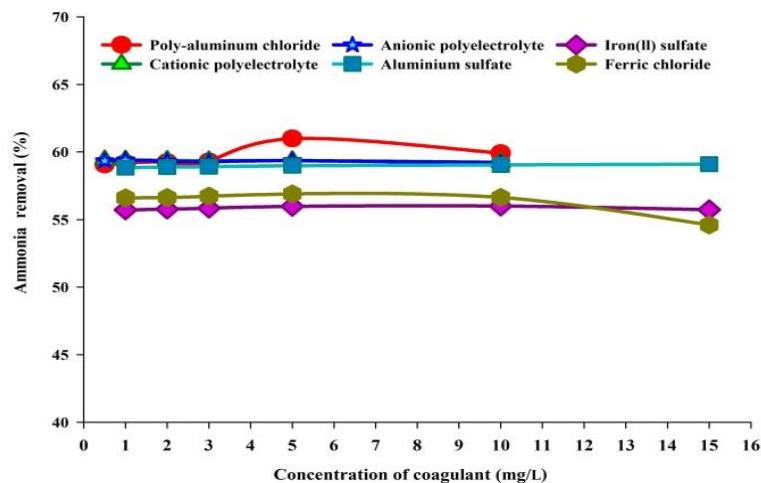


Fig. 10. Effect of different coagulant concentrations on ammonia reduction

شکل ۱۰- تأثیر غلظت مواد منعقدکننده مختلف در کاهش آمونیاک

۴- نتیجه‌گیری

طبق تجزیه و تحلیل نتایج، pH مشترک بهینه که در آن هر منعقدکننده بهترین عملکرد برای حذف هم‌زمان کدورت، سولفات و آمونیاک را نشان می‌دهد، برابر با ۱۲ بود. بیشترین میزان حذف کدورت مربوط به پلی آلومینیم کلراید و پلی الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی (حدود ۹۹ درصد) و کمترین میزان حذف کدورت از پساب پتروشیمی زاگرس مربوط به کلروفریک (۵۸ درصد) بود. بیشترین مقدار کاهش آمونیاک با منعقدکننده پلی الکترولیت کاتیونی برابر با ۵۹ درصد و کمترین میزان کاهش

نمودار درصد حذف آمونیاک در غلظت‌های مختلف مواد منعقدکننده در شکل ۱۰ آمده است.

مطابق انتظار مشاهده می‌شود که نوع و غلظت منعقدکننده‌ها تأثیر چندانی در کاهش آمونیاک نداشته است. با توجه به این مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که فرایند هوادهی عامل اصلی کاهش آمونیاک در نمونه‌های پساب بررسی شده، بوده است. به هر حال منعقدکننده‌های پلیمری بررسی شده فقط به اندازه چند درصد بیشتر از بقیه منعقدکننده‌های بررسی شده باعث کاهش آمونیاک شده‌اند.



تشکیل لخته بیشتری از پلی آلومینیم کلراید بوده و رسوب‌های درشت‌تر تشکیل دادند. همچنین این منعقدکننده‌ها در غلظت‌های خیلی کم، عملکرد مشابه با پلی آلومینیم کلراید در غلظت بیشتر را نشان می‌دهند به‌گونه‌ای که پلی الکترولیت کاتیونی در صورت ترکیب با آهک بازدهی ۹۹/۷، ۲۷/۱ و ۵۹/۴ درصد برای کاهش هم‌زمان کدورت، سولفات و آمونیاک را ایجاد می‌کند.

با توجه به نتایج بیان شده برای کارایی منعقدکننده‌های مورد بررسی و همچنین قابلیت دسترسی و قیمت تجاری و انطباق با شرایط واحد تصفیه پساب صنعتی شرکت پتروشیمی زاگرس و پکیج تصفیه پساب آن، استفاده از منعقدکننده پلی آلومینیم کلراید به همراه آهک در pH معادل ۱۲ و در غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر پیشنهاد شد که پس از اجراء مشکلات بخارسازی برای تولید متانول و مشکلات محیط‌زیستی برای دفع پساب شرکت به نحو مطلوبی رفع شدند.

۵- قدردانی

نویسندگان پژوهش از آزمایشگاه مرکزی شرکت پتروشیمی زاگرس (که کلیه آزمایش‌های تجربی این پروژه در آنجا انجام شد) به‌خصوص جناب آقای مهندس حسین یزدانی و جناب آقای مهندس رضا محمدی قدردانی می‌کنند.

آمونیاک نیز مربوط به کلروفریک (۵۴ درصد) بود. همچنین بیشترین بازدهی کاهش سولفات مربوط به منعقدکننده آلوم در غلظت ۴۰ میلی‌گرم در لیتر در pH معادل ۱۲ و برابر با ۴۵ درصد و کمترین میزان حذف آن مربوط به کلروفریک و برابر با ۱۱ درصد بود.

نتایج حاصل از آزمایش‌های منعقدکننده‌های پلی الکترولیت کاتیونی و آنیونی نشان داد که غلظت ۱ میلی‌گرم در لیتر از این نوع منعقدکننده‌ها (یا پلی آلومینیم کلراید) کدورت پساب از مقدار اولیه ۱۵۳ به کمتر از ۱ NTU رسید. طبق نتایج حاصل از این پژوهش، میزان غلظت بهینه برای پلی آلومینیم کلراید، ۵ میلی‌گرم در لیتر، برای پلی الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی ۱ میلی‌گرم در لیتر، برای آلوم برابر ۴۰ میلی‌گرم در لیتر، برای سولفات (II) برابر ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و برای کلروفریک برابر ۵ میلی‌گرم در لیتر بود.

از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که نوع منعقدکننده تأثیر بسیار اندکی (کمتر از چند درصد) روی حذف آمونیاک پس از هوادهی پساب دارد. اگر حذف کدورت نسبت به حذف سولفات اولویت داشته باشد، منعقدکننده‌های پلیمری بسیار مناسب‌تر و اگر حذف سولفات در اولویت باشد منعقدکننده آلوم کارایی بهتری نسبت به سایر منعقدکننده‌های مورد بررسی داشتند. به‌طور کلی پلی الکترولیت‌های کاتیونی و آنیونی دارای سرعت

References

- Abdolah Zadeh, M., Torabian, A. & Hassani, A. H. 2009. Comparison of the performance of Poly Aluminum Chloride (PACl), Ferric Chloride ($FeCl_3$), in turbidity and organic matter removal; from water source, case-study: Karaj River, in Tehran water treatment plant No. 2. *Journal of Water and Wastewater*, 20(2), 23-31. (In Persian)
- Ahangari, H. G., Pourmoghadas, H. & Fahiminia, M. 2020. Optimization of wastewater refinery in Shokoohiyeh industrial city of Qom before entering RO system using chlorophyll, alum and PAC coagulators. *Journal of Water and Wastewater*, 31(1), 76-85. (In Persian)
- Akyol, A. & Bayramoğlu, M. 2005. Photocatalytic degradation of Remazol Red F3B using ZnO catalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 124, 241-246.
- Alnaizy, R. 2008. Economic analysis for wet oxidation processes for the treatment of mixed refinery spent caustic. *Environmental Progress*, 27, 295-301.
- Arafat, H. A. 2007. Simple physical treatment for the reuse of wastewater from textile industry in the Middle East. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6, 115-122.
- Ashraf, S. N., Rajapakse, J., Dawes, L. A. & Millar, G. J. 2018. Coagulants for removal of turbidity and dissolved species from coal seam gas associated water. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 187-199.



- [Bagastyo, A. Y., Anggrainy, A. D., Gatneh, S., Nurhayati, E., Susanti, D., Widodo, E., et al. 2022. Study on optimization of coagulation-flocculation of fish market wastewater using bittern coagulant–response surface methodological approach. *Water Science and Technology*, 85, 3072-3087.](#)
- [Banejad, h., Yazdani, V., Rahmani, A., Mohajerani, S. & Oliai, E. 2012. Evaluate performance of moringa peregrina powder grains in domestic wastes water treatment. *Journal of Water and Wastewater*, 23\(1\), 84-92. \(In Persian\)](#)
- [Behnami, A., Shakerkhatibi, M., Dehghanzadeh, R., Benis, K. Z., Derafshi, S. & Fatehifar, E. 2016. The implementation of data reconciliation for evaluating a full-scale petrochemical wastewater treatment plant. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 22586-22595.](#)
- [Birjandi, N., Younesi, H. & Bahramifar, N. 2015. Comparison of the efficiency of alum and polyaluminium chloride for removal of paper mill wastewater pollution. *Environmental Sciences*, 13\(1\), 67-74. \(In Persian\)](#)
- [Boisvert, J. P., To, T. C., Berrak, A. & Jolicoeur, C. 1997. Phosphate adsorption in flocculation processes of aluminium sulphate and poly-aluminium-silicate-sulphate. *Water Research*, 31, 1939-1946.](#)
- [Botalova, O., Schwarzbauer, J., Frauenrath, T. & Dsikowitzky, L. 2009. Identification and chemical characterization of specific organic constituents of petrochemical effluents. *Water Research*, 43, 3797-3812.](#)
- [Castillo, L., El Khorassani, H., Trebuchon, P. & Thomas, O. 1999. UV treatability test for chemical and petrochemical wastewater. *Water Science and Technology*, 39, 17-23.](#)
- [Cechinel, M. A., Mayer, D. A., Pozdniakova, T. A., Mazur, L. P., Boaventura, R. A., De Souza, A. A. U., et al. 2016. Removal of metal ions from a petrochemical wastewater using brown macro-algae as natural cation-exchangers. *Chemical Engineering Journal*, 286, 1-15.](#)
- [Chong, M. F., Lee, K. P., Chieng, H. J. & Ramli, I. I. S. B. 2009. Removal of boron from ceramic industry wastewater by adsorption–flocculation mechanism using palm oil mill boiler \(POMB\) bottom ash and polymer. *Water Research*, 43, 3326-3334.](#)
- [Chu, W. 2001. Dye removal from textile dye wastewater using recycled alum sludge. *Water Research*, 35, 3147-3152.](#)
- [Dehghani, M. & Alizadeh, M. H. 2016. The effects of the natural coagulant *Moringa oleifera* and alum in wastewater treatment at the Bandar Abbas Oil Refinery. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 3\(4\), 225-230.](#)
- [Ding, P., Chu, L. & Wang, J. 2016. Biological treatment of actual petrochemical wastewater using anaerobic/anoxic/oxic process and the microbial diversity analysis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 10193-10202.](#)
- [Dolar, D., Košutić, K. & Strmecky, T. 2016. Hybrid processes for treatment of landfill leachate: coagulation/UF/NF-RO and adsorption/UF/NF-RO. *Separation and Purification Technology*, 168, 39-46.](#)
- [Ebadi, M., Asareh, A. & Jalilzadeh Yingejeh, R. 2021. Investigation of electro coagulation process for Phosphate’Sulfate’Nitrate removal from Sugar Cane. *Environmental Researches*, 12\(23\), 207-217. \(In Persian\)](#)
- [Ersoy, B., Tosun, I., Günay, A. & Dikmen, S. 2009. Turbidity removal from wastewaters of natural stone processing by coagulation/flocculation methods. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 37\(3\), 225-232.](#)
- [Fahiminia, M., Ansari, M., Nazari, S., Majidi, G., Ahmadi, Z. & Fahiminia, V. 2017. Efficiency of aluminum sulfate, ferric chloride, poly aluminum chloride, polymer and lime in marble processing effluent treatment. *Journal of Environmental Science and Technology*, 19\(3\), 17-27. \(In Persian\)](#)



- Farajnezhad, H. & Gharbani, P. 2012. Coagulation treatment of wastewater in petroleum industry using poly aluminum chloride and ferric chloride. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 13, 306-310.
- Ghorbanian, M., Mosavi, S. G. & Hosseini, Z. 2015. Investigating the removal of high turbidity from water by electrocoagulation. *Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*, 22, 7-16. (In Persian)
- Hassani, A., Hazrati, M. & Alighadri, M. 2011. Determining the best coagulants before and after ozonation to pretreatment of the hospital wastewater (case study: Sabalan hospitals in Ardabil). *Journal of Health*, 2(2), 61-68. (In Persian)
- Ismail, I. M., Fawzy, A. S., Abdel-Monem, N. M., Mahmoud, M. H. & El-Halwany, M. A. 2012. Combined coagulation flocculation pre treatment unit for municipal wastewater. *Journal of Advanced Research*, 3, 331-336.
- Lee, B. B., Choo, K. H., Chang, D. & Choi, S. J. 2009. Optimizing the coagulant dose to control membrane fouling in combined coagulation/ultrafiltration systems for textile wastewater reclamation. *Chemical Engineering Journal*, 155, 101-107.
- Letterman, R. D. & Pero, R. W. 1990. Contaminants in polyelectrolytes used in water treatment. *Journal-American Water Works Association*, 82, 87-97.
- Malamis, S., Katsou, E., Di Fabio, S., Frison, N., Cecchi, F. & Fatone, F. 2015. Treatment of petrochemical wastewater by employing membrane bioreactors: a case study of effluents discharged to a sensitive water recipient. *Desalination and Water Treatment*, 53, 3397-3406.
- Mao, I., Chen, M., Lan, C., Chang, Y. & Chang, S. 1994. Mutagenicity determination of the wastewater emitted from petrochemical industry in Taiwan. *Water, Air, and Soil Pollution*, 76, 459-466.
- Merzouk, B., Gourich, B., Madani, K., Vial, C. & Sekki, A. 2011. Removal of a disperse red dye from synthetic wastewater by chemical coagulation and continuous electrocoagulation. A comparative study. *Desalination*, 272, 246-253.
- Nikoonahad, A., Ehrampoush, M., Ghaneian, M., Gholizadeh, A. & Ghelmani, S. 2017. Effects of intensity and mixing speed on the efficiency of coagulation and flocculation processes and improving effluent quality from Yazd SBR wastewater treatment plant. *Journal of Water and Wastewater*, 28(2), 29-36. (In Persian)
- Rahimi, S., Alizadeh, M., Mostafapour, F. K., Bazrafshan, E., Hosseinzadeh, E. & Taghavi, M. 2016. Optimal condition of coagulation process using poly aluminium chloride in dairy wastewater treatment. *Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*, 23, 48-57. (In Persian)
- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D. & Clesceri, L. S. 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association Washington, DC, USA.
- Sarkar, B., Chakrabarti, P., Vijaykumar, A. & Kale, V. 2006. Wastewater treatment in dairy industries-possibility of reuse. *Desalination*, 195, 141-152.
- Shi, B., Li, G., Wang, D., Feng, C. & Tang, H. 2007. Removal of direct dyes by coagulation: the performance of preformed polymeric aluminum species. *Journal of Hazardous Materials*, 143, 567-574.
- Tobiszewski, M., Tsakovski, S., Simeonov, V. & Namieśnik, J. 2012. Chlorinated solvents in a petrochemical wastewater treatment plant: an assessment of their removal using self-organising maps. *Chemosphere*, 87, 962-968.
- Vanerkar, A. P., Satyanarayan, S. & Satyanarayan, S. 2013. Treatment of food processing industry wastewater by a coagulation/flocculation process. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2, 63-72.



- Wang, D., Sun, W., Xu, Y., Tang, H. & Gregory, J. 2004. Speciation stability of inorganic polymer flocculant–PACl. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 243, 1-10.
- Wang, J. P., Chen, Y. Z., Ge, X. W. & Yu, H. Q. 2007. Optimization of coagulation–flocculation process for a paper-recycling wastewater treatment using response surface methodology. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 302, 204-210.
- Wang, L. K., Hung, Y. T., Lo, H. H. & Yapijakis, C. 2005. *Waste Treatment in the Food Processing Industry*, CRC press. Boca Raton, Florida, USA.
- Xu, L., Liu, S., Zhao, S., Li, K., Cao, A. & Wang, J. 2022. A novel electrocoagulation-membrane stripping hybrid system for simultaneous ammonia recovery and contaminant removal. *Separation and Purification Technology*, 121377.
- Yazdanbakhsh, A., Mahdipour, F., Ghanbari, F., Zamani, A., Sharifimaleksari, H. & Safdari, M. 2012. Survey and comparison of aluminum sulfate and poly aluminum chloride (PAC) in olive oil mill wastewater treatment. *Toloo-e-Behdasht*, 11(2), 98-106. (In Persian)
- Yeruva, D. K., Jukuri, S., Velvizhi, G., Kumar, A. N., Swamy, Y. & Mohan, S. V. 2015. Integrating sequencing batch reactor with bio-electrochemical treatment for augmenting remediation efficiency of complex petrochemical wastewater. *Bioresource Technology*, 188, 33-42.
- Yousefi, Z. & Zazouli, M. 2008. Removal of heavy metals from solid wastes leachates coagulation-flocculation process. *Journal of Applied Sciences*, 8, 2142-2147.
- Zarei Mahmoudabadi, T., Ehrampoush, M. H., Yousofi, H. & Talebi, P. 2018. Evaluation of the coagulation and flocculation process using plantago major L. seed extract as a natural coagulant in treating paper and paperboard industry wastewater. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 3, 531-538.
- Zareimahmoudabady, T., Talebi, P., Ehrampoush, M. & Jalili, M. 2019. Optimization of coagulation and flocculation process in wastewater treatment of the food industry: a laboratory study. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*, 18, 623-636. (In Persian)
- Zazouli, M. A., Taghavi, M. & Bazrafshan, E. 2012. Influences of solution chemistry on phenol removal from aqueous environments by electrocoagulation process using aluminum electrodes. *Health Scope*, 1, 66-70.
- Zhang, H., He, Y., Jiang, T. & Yang, F. 2011. Research on characteristics of aerobic granules treating petrochemical wastewater by acclimation and co-metabolism methods. *Desalination*, 279, 69-74.
- Zhao, Y., Zhang, Q., Yuan, W., Hu, H., Li, Z., Ai, Z., et al. 2019. High efficient coagulant simply by mechanochemically activating kaolinite with sulfuric acid to enhance removal efficiency of various pollutants for wastewater treatment. *Applied Clay Science*, 180, 105187.
- Zheng, X., Plume, S., Ernst, M., Croué, J. P. & Jekel, M. 2012. In-line coagulation prior to UF of treated domestic wastewater–foulants removal, fouling control and phosphorus removal. *Journal of Membrane Science*, 403, 129-139.



© The Author(s)

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)