

## Optimization of coagulation-flocculation process for dye and COD removal from real dyeing wastewater and evaluation of effluent biodegradability in a carpet factory

Maryam Amini<sup>1</sup>, Ahmadreza Yazdanbakhsh<sup>2\*</sup>, Akbar Eslami<sup>3</sup>, Ehsan Aghayani<sup>4</sup>

1. MSc Student of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
2. Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
3. Associate Professor of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
4. PH.D Student of Environmental Health Engineering, School of Medicine, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

**Background and Aim:** Textile industry is one of the largest consumers of water in the world. The wastewater from the textile industry is known to have strong colour, chemical oxygen demand (COD), highly fluctuating pH and high temperature. The release of coloured wastewater represents a serious environmental and public health concern. Among the various physicochemical and biological methods of textile wastewater treatment, coagulation-flocculation is considered as an attractive and favourable technique because of its low cost, easy operation and high efficiency.

**Materials and methods:** The study was conducted in the laboratory scale using Jar test. Dye removal from real wastewater was investigated by the use of three mineral coagulants including poly aluminum chloride, ferric sulfate and ferric chloride. In order to optimize the process, parameters including pH, coagulant dose, time and speed of coagulation were considered. Treated samples were analysed to determine the residual color and COD.

**Results:** According to the results of our experiments, under optimum conditions of process (pH 9, doses of 250 mg/l coagulant and coagulation speed of 175 rpm with a duration of 5 minutes), the highest removal efficiencies (COD 44.4% and color 95%) were obtained by the use of poly aluminum chloride. The results showed that poly aluminum chloride enhanced the biodegradability of wastewater from 0.07 to 0.21 at optimized process conditions.

**Conclusion:** Although the coagulation process reduced a large percentage of pollution load in the wastewater, another process has to be followed to meet the wastewater discharge standards in receiving sources.

**Keywords:** Textile wastewater, Dye, Coagulation, Biodegradability

\***Corresponding Author:** Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

**Email:** yazdanbakhsh@sbm.ac.ir

**Received:** 16. Sept. 2017

**Accepted:** 28. Nov.2017

## بهینه‌سازی فرآیند انعقاد جهت حذف COD و رنگ از فاضلاب واحد رنگرزی یک کارخانه فرش ماشینی و ارزیابی تجزیه‌پذیری بیولوژیکی پساب حاصل

مریم امینی<sup>۱</sup>، احمد رضا یزدانبخش<sup>۲\*</sup>، اکبر اسلامی<sup>۳</sup>، احسان آقایی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دانشیار، رئیس مرکز تحقیقات کنترل عوامل زیان‌آور محیط و کار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- دانشجوی دکتری بهداشت محیط، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

**زمینه و اهداف:** صنعت نساجی یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان آب در جهان است که فاضلاب آن با مقادیر زیاد رنگ، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی بالا، pH با نوسان زیاد و درجه حرارت بالا شناخته شده است. در میان روش‌های تصفیه فاضلاب صنایع نساجی، فرآیند انعقاد به دلیل راهبری ساده و اثربخش و همچنین هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً پایین به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

**مواد و روش‌ها:** مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی بر روی نمونه واقعی و با استفاده از سه منعقد کننده معدنی پلی آلومینیم کلراید، سولفات فریک و کلرورفریک با استفاده از دستگاه جارتست انجام شد. به منظور بهینه‌سازی فرآیند، متغیرهای pH، غلظت ماده منعقد کننده، زمان و سرعت انعقاد در حذف رنگ و COD مورد بررسی قرار گرفت. تعیین نسبت BOD<sub>5</sub>/COD به عنوان شاخص تجزیه‌پذیری استفاده شد.

**یافته‌ها:** در شرایط بهینه فرآیند (pH برابر با ۹، دوز ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و سرعت انعقاد ۱۷۵ دور در دقیقه با زمان ۵ دقیقه)، بیشترین مقادیر راندمان حذف رنگ و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی با کاربرد پلی آلومینیم کلراید به ترتیب ۹۵ و ۷۷/۴ درصد حاصل شد. کاربرد منعقد کننده پلی آلومینیم کلراید در شرایط بهینه میزان تجزیه‌پذیری فاضلاب را از ۰/۰۷ به ۰/۲۱ افزایش داد.

**نتیجه‌گیری:** اگرچه فرآیند انعقاد، درصد بالایی از بار آلودگی موجود در فاضلاب را کاهش و درصد تجزیه‌پذیری را افزایش می‌دهد اما تصفیه بیشتر پساب برای تخلیه به محیط زیست ضروری می‌باشد.

**کلید واژه‌ها:** فاضلاب نساجی، رنگ زاء، انعقاد، تجزیه‌پذیری بیولوژیکی

\*نویسنده مسئول: ایران، تهران، اوین، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، دانشکده بهداشت، گروه مهندسی بهداشت محیط

Email: yazdanbakhsh@sbmu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۷

## مقدمه

با افزایش تقاضا برای محصولات نساجی، پساب حاصل از صنایع نساجی نیز افزایش یافته است و این امر صنعت نساجی را به یکی از منابع اصلی آلودگی در سراسر جهان تبدیل کرده است [۱]. بخش زیادی از فاضلاب تولید شده توسط صنعت نساجی برگرفته از عملیات رنگرزی است. فاضلاب تولید شده توسط این واحد با مقدار زیاد رنگ، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) بالا، pH با نوسان زیاد و درجه حرارت بالا شناخته شده است [۲]. صنایع رنگرزی نساجی یکی از بزرگترین واحدهای مصرف کننده آب هستند که به تبع آن مقدار قابل توجهی فاضلاب تولید می‌کنند [۳]. رنگ یکی از بارزترین شاخص‌های آلاینده فاضلاب می‌باشد و حضور مقادیر بسیار کمی ماده رنگزا در آب از نظر بصری بسیار مشهود و ناخوشایند است [۴]. بنابراین تأثیر مخرب این صنعت بر محیط زیست با تخلیه فاضلاب‌های رنگی به محیط‌های پذیرنده شکل می‌گیرد [۵]. وجود مواد رنگزای آلی در این فاضلاب‌ها باعث جلوگیری از نفوذ نور به عمق‌های پایینی آب‌های پذیرنده و اختلال در عمل فتوسنتز موجودات آبی ساکن در این منابع و کاهش انتقال اکسیژن به داخل آب شده و با افزایش اثرات سمی تجمع آلاینده‌ها صدمات جبران ناپذیری به محیط زیست وارد می‌نماید. بدون شک تخلیه مستقیم این فاضلاب‌ها به رودخانه‌ها و دریاچه‌ها منجر به کاهش کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود [۶، ۷]. در نتیجه با توجه به مخاطرات مربوط به رهاسازی فاضلاب‌های رنگی به محیط زیست بدون اعمال فرآیندهای مناسب تصفیه، ضروری است که این نوع فاضلاب‌ها به طور مناسبی تصفیه شوند [۸]. متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای تصفیه فاضلاب نساجی مشتمل بر کاربرد روش‌های بیولوژیکی، انعقاد/لخته سازی، ترسیب، اکسیداسیون و جذب است [۹]. به کارگیری هرکدام از این روش‌ها به منظور حذف رنگ از فاضلاب نساجی، مزایا و معایبی را به همراه دارد [۱۰]. در میان این روش‌های تصفیه، انعقاد و لخته سازی به دلیل راهبری ساده و اثربخش و همچنین هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً پایین به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. ناپایداری محلول‌های رنگی با استفاده از مواد منعقد کننده می‌تواند به عنوان تصفیه اصلی و یا پیش تصفیه مورد استفاده قرار گرفته و غلظت رنگ و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی فاضلاب را کاهش دهد. انعقاد رنگ‌های محلول در آب به دلیل حلالیت بالای آنها چالش برانگیز است. علاوه بر این، رنگدانه‌های صنعتی ترکیبات خالص نیستند؛ بلکه درجه خلوص آنها از گروهی به گروه دیگر متنوع بوده که ممکن است بر روند لخته شدن تأثیرگذار باشد [۱۲]. از طرف دیگر مواد افزودنی شیمیایی که معمولاً در فاضلاب نساجی وجود دارند،

مانعی برای حذف رنگ هستند؛ به طوری که اگر مواد افزودنی شیمیایی تداخل کننده در فاضلاب نساجی وجود نداشته باشد، دوز منعقدکننده کمتری برای حذف رنگ مورد نیاز است [۱۳]. بنابراین ارزیابی شرایط بهینه انعقاد برای فاضلاب‌هایی با گروه رنگی متفاوت، ضروری است. به طور کلی اثربخشی فرایند انعقاد به عوامل مختلفی همچون: ساختار مولکولی رنگ، جرم مولکولی رنگ، خواص یونی رنگ و مواد شیمیایی کمکی آن وابسته است. اثربخشی انعقاد رنگ‌ها را می‌توان با انتخاب مناسب منعقد کننده‌ها و بهینه سازی پارامترهای فرآیند (از قبیل pH اولیه، دوز منعقد کننده/کمک منعقد کننده، زمان ته نشینی، زمان انعقاد و غیره) افزایش داد [۱۲]. نمک‌های آلومینیوم و آهن، دو منعقد کننده معدنی اصلی مورد استفاده در تصفیه آب و فاضلاب می‌باشند [۱۴].

وارما و همکاران در سال ۲۰۱۲، مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی تکنولوژی‌های انعقاد /لخته سازی مواد شیمیایی برای حذف رنگ از فاضلاب نساجی انجام دادند. در این مقاله، چندین روش رنگ زدایی پساب نساجی به وسیله مواد شیمیایی بررسی شده است که همه این روش‌های توصیف شده در این بررسی، دارای مزایا و معایب می‌باشند و انتخاب آنها عمدتاً به ویژگی‌های فاضلاب نساجی مانند نوع و غلظت رنگ، pH، مواد آلی، فلزات سنگین و غیره وابسته است [۱۳]. آزر و همکاران مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۴ با عنوان مقایسه فرآیندهای مختلف اکسیداسیون پیشرفته و روش‌های تصفیه شیمیایی برای حذف COD و رنگ از فاضلاب رنگرزی الیاف پلی استر و استات انجام دادند. نتایج نشان داد که اکسیداسیون پیشرفته نسبت به روش‌های انعقاد شیمیایی متعارف برای حذف COD و رنگ (حذف بیش از ۸۵٪ COD و رنگ) از پساب رنگرزی الیاف استات و پلی استر، عملکرد عالی دارند [۱۵]. در سال ۲۰۰۳، جورجیوس و همکاران، مطالعه‌ای با عنوان تصفیه فاضلاب نساجی پنبه با استفاده از آهک و سولفات آهن انجام دادند.

نتایج نشان داد تصفیه با آهک با غلظت بیش از ۶۰۰mg/L در حذف رنگ (۷۰-۹۰٪) و بخشی از COD (۶۰-۵۰٪) فاضلاب نساجی بسیار مؤثر بود. علاوه بر این، تصفیه سولفات با آهن با تنظیم pH در محدوده ۹ با استفاده از آهک به همان اندازه مؤثر بود [۱۶]. در سال ۲۰۱۷، رانا و سورش [۱۷]، مطالعه‌ای تحت عنوان مقایسه منعقدکننده‌های مختلف برای کاهش COD از فاضلاب صنعت نساجی انجام دادند. در این مطالعه، منعقدکننده‌های مختلف مانند کلرید فریک، سولفات آهن، آلومینیوم سولفات، پلی آلومینیوم کلراید، پودر دانه تمبر هندی، کیتوزان و صمغ Xanthum، جهت ارزیابی کارایی فرآیند انعقاد و لخته سازی برای کاهش COD از فاضلاب صنعت نساجی در مقیاس کوچک مورد استفاده قرار گرفت. این مطالعه نیز پارامترهای مختلفی مانند دوز منعقدکننده،

آنها در ۶ سطح ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ با استفاده از آهک تنظیم شده بود، اضافه گردید. پس از تعیین مقدار pH بهینه، غلظت بهینه ماده منعقد کننده، در ۸ غلظت ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر از ماده منعقد کننده مورد بررسی قرار گرفت. فرآیند انعقاد در مرحله اول و دوم، در ۳ مرحله متوالی اختلاط تند (انعقاد) به مدت یک دقیقه و سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه جهت ناپایداری سازی ذرات، اختلاط کند (لخته سازی) به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۴۵ دور در دقیقه جهت ایجاد فلوک قابل ته نشینی و مرحله زلال سازی با ۳۰ دقیقه ته نشینی انجام شد. در مرحله سوم، زمان و سرعت بهینه فرآیند انعقاد مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، آزمایشات در ۶ بازه زمانی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ دقیقه با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه انجام گردید. پس از تعیین زمان بهینه انعقاد، اثر افزایش سرعت انعقاد (۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰ دور در دقیقه) در مدت زمان بهینه بررسی گردید. در تمامی مراحل آزمایش، اختلاط کند (لخته سازی) به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۴۵ دور در دقیقه و ته نشینی به مدت ۳۰ دقیقه ثابت در نظر گرفته شد.

### یافته‌ها

#### مشخصات فاضلاب

نتایج حاصل از بررسی مشخصات فاضلاب خام صنعت فرش ماشینی در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ - مشخصات فاضلاب خام صنعت فرش ماشینی

مقادیر	پارامتر
۴/۳±۰/۱	pH
۲۰±۱	دما (°C)
۱۵۴±۴	کل مواد جامد معلق (mg/L)
۱۱۳۴±۵	کل مواد جامد محلول (mg/L)
۹۹/۱۳±۲	رنگ (ADMI)
۱۳۸±۳	کدورت (NTU)
۴۵۳۷±۳۰	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (mg/L)
۳۲۵±۱۵	اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (mg/L)
۱۵۹۰±۱	هدایت الکتریکی (ms/cm)

### نتایج حاصل از فرآیند انعقاد بر کارایی حذف رنگ و COD

#### اثر pH

همانگونه که در نمودار ۱ و ۲ مشخص شده است، آزمایشات در ۶ سطح pH برابر ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ انجام شد. کارایی فرآیند با افزایش pH اولیه افزایش می‌یابد؛ به طوری که در pH برابر با ۹

pH محلول، زمان ته نشینی، غلظت اولیه محلول و دما را با استفاده از آزمایش جار، مورد بررسی قرار داد. حذف COD توسط منعقد کننده‌های مختلف به ترتیب به صورت زیر گزارش گردید:

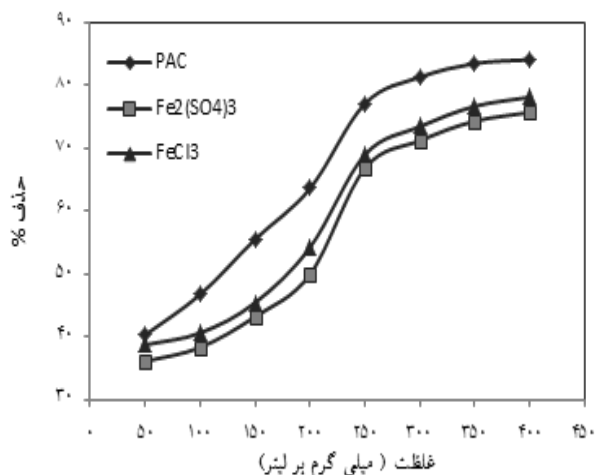
بدون منعقد کننده > صمغ  $\text{Xanthum}$  >  $\text{Chitosan}$  > PAC > بودر دانه تمبره‌ندی > Alum >  $\text{FeSO}_4$  >  $\text{FeCl}_3$

نتایج نشان داد که حداکثر کاهش COD (۵۴٪) در مقایسه با سایر منعقد کننده‌های مورد مطالعه، در pH برابر ۴ و دوز ۴ گرم در لیتر توسط  $\text{FeCl}_3$  بدست آمد [۱۷].

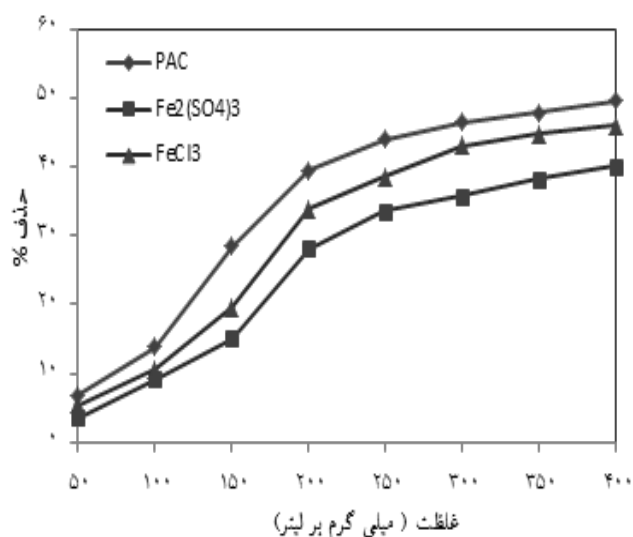
این تحقیق نیز به منظور بهینه سازی فرآیند انعقاد و لخته سازی با استفاده از مواد منعقد کننده متداول جهت حذف رنگ و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی از فاضلاب واقعی و ارزیابی تجزیه پذیری پساب حاصل انجام شد.

### مواد و روش‌ها

نمونه‌های فاضلاب برای تحقیق از خروجی سیستم جمع آوری فاضلاب رنگرزی یک کارخانه فرش ماشینی در شهرستان دلیجان به صورت نمونه برداری مرکب ۲۴ ساعته تهیه گردید. پس از اندازه گیری مشخصات اولیه فاضلاب نمونه برداری شده در محل کارخانه، نمونه‌های فاضلاب در ظروف پلاستیکی به آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی منتقل و در یخچال نگهداری شد. ابتدا آزمایشات لازم جهت تعیین کیفیت فاضلاب خام انجام گردید. در این بررسی مشخصات اولیه نمونه از قبیل: pH، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و بیوشیمیایی، کدورت، هدایت الکتریکی و رنگ مطابق با روش‌های توصیه شده در کتاب استاندارد متد اندازه گیری شد [۱۸]. سپس به منظور مقایسه کارایی سه منعقد کننده معدنی پلی آلومینیم کلراید، سولفات فریک و کلورفریک در حذف رنگ و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی از فاضلاب نساجی، چهار متغیر pH، غلظت ماده منعقد کننده، زمان و سرعت انعقاد مورد مطالعه قرار گرفت. منعقد کننده‌های مورد استفاده در این آزمایشات از شرکت افرا طب خریداری شد. برای تعیین خصوصیات فاضلاب خام و پساب حاصل از فرآیند انعقاد، آزمایش COD با روش تقطیر برگشتی، رنگ با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis (HACH-DR5۰۰۰)، pH با استفاده از دستگاه pH متر و  $\text{BOD}_5$  به روش مانومتریک اندازه گیری گردید. به منظور تهیه میزان مواد منعقد کننده در هر مرحله از آزمایش، ابتدا محلول استوک ۱۰ گرم بر لیتر از هر ۳ منعقد کننده تهیه و به مقدار مورد نیاز به هر یک از ظروف دستگاه آزمایش جار اضافه گردید. در مرحله اول جهت تعیین pH بهینه، دوز ثابتی از ماده منعقد کننده (۲۵۰ میلی گرم بر لیتر) به ظروف دستگاه آزمایش جار که از قبل pH



شکل ۳- تأثیر غلظت مواد منعقدکننده بر حذف رنگ (pH بهینه ۹، اختلاط تند: ۱۰۰ rpm، اختلاط کند: ۴۵ rpm، ته‌نشینی: ۳۰ min)

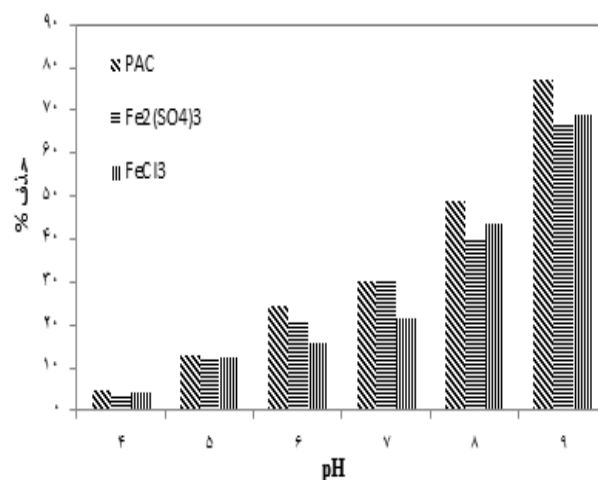


شکل ۴- تأثیر غلظت مواد منعقدکننده بر حذف رنگ COD (pH بهینه ۹ اختلاط تند: ۱۰۰ rpm، اختلاط کند: ۴۵ rpm، ته‌نشینی: ۳۰ min)

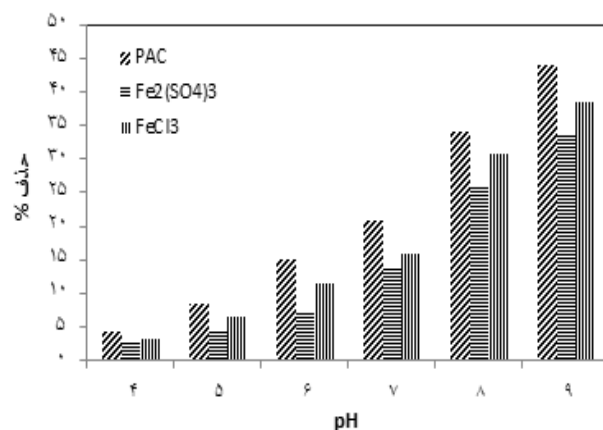
#### تأثیر زمان و سرعت انعقاد

در این مرحله با توجه به نتایج حاصل از مراحل قبل و تعیین pH و غلظت بهینه، آزمایشات اثر زمان انعقاد بر کاهش رنگ و COD در ۶ بازه زمانی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. سپس اثر افزایش سرعت انعقاد (۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰ دور در دقیقه) در مدت زمان بهینه بررسی گردید. نتایج حاصل از این مرحله در نمودارهای ۵ و ۶، ارائه شده است. با توجه به نتایج، مدت زمان ۵ دقیقه و سرعت انعقاد ۱۷۵ دور در دقیقه به عنوان مقادیر بهینه زمان و دور انعقاد در نظر گرفته شد.

بیشترین راندمان حذف برای هر سه منعقد کننده حاصل شده است. در نتیجه pH برابر ۹ به عنوان مقدار بهینه برای مراحل بعدی در نظر گرفته شد.



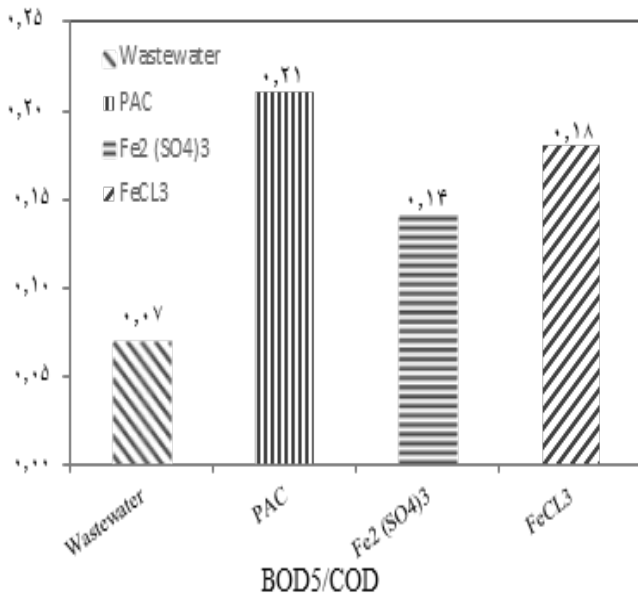
شکل ۱- تأثیر pH بر کارایی منعقدکننده در حذف رنگ (دوز منعقد کننده: ۲۵۰ mg/L، اختلاط تند: ۱۰۰ rpm، اختلاط کند: ۴۵ rpm، ته‌نشینی: ۳۰ min)



شکل ۲- تأثیر pH بر کارایی منعقدکننده در حذف COD (دوز منعقد کننده: ۲۵۰ mg/L، اختلاط تند: ۱۰۰ rpm، اختلاط کند: ۴۵ rpm، ته‌نشینی: ۳۰ min)

#### اثر غلظت

در این مرحله به منظور تعیین اثر غلظت‌های مختلف منعقدکننده‌های پلی آلومینیوم کلراید، سولفات فریک و کلرور فریک بر کارایی حذف رنگ و COD، ۸ غلظت ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ میلی گرم بر لیتر از منعقد کننده‌ها در pH بهینه ۹ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این مرحله در نمودارهای ۳ و ۴، نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از این مرحله و با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، دوز ۲۵۰ میلی گرم در لیتر به عنوان مقدار بهینه برای مرحله بعد در نظر گرفته شد.



شکل ۷- نسبت  $BOD_5/COD$  در پساب خام و تغییرات آن بعد از فرآیند انعقاد (دوز منعقد کننده:  $250 \text{ mg/L}$ ،  $pH$  بهینه ۹، اختلاط تند:  $175 \text{ rpm}$ ، اختلاط کند:  $45 \text{ rpm}$ ، ته نشینی:  $30 \text{ min}$ )

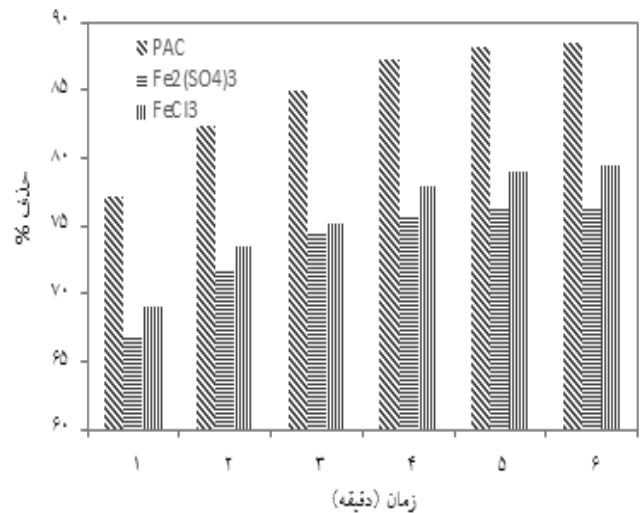
جدول مشخصات پساب حاصل از تصفیه فاضلاب نساجی را بعد از فرآیند انعقاد با منعقدکننده‌های مختلف نشان می‌دهد، این منعقد کننده‌ها در دوز  $250 \text{ mg/L}$ ،  $pH$  بهینه برابر ۹، اختلاط تند در  $175$  دور در دقیقه و اختلاط کند  $45$  دور در دقیقه با مدت ته نشینی  $30$  دقیقه بکار رفته‌اند.

جدول ۲- مشخصات کیفی فاضلاب و پساب حاصل از فرآیند انعقاد با منعقدکننده‌های مختلف

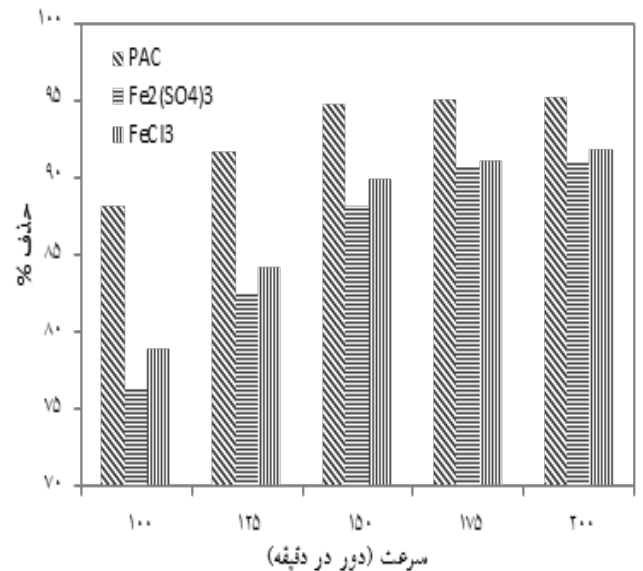
پارامترها	فاضلاب خام	پلی آلومینیوم کلراید	سولفات آهن	کلور فریک
pH	۴/۳	۷/۰۸	۶/۹۹	۶/۹۱
رنگ ADMI	۹۹/۱۳	۴/۹۶	۹/۲۹	۸/۸۵
(mg/L) COD	۴۵۳۷	۱۰۲۵	۱۶۹۰	۱۲۷۵
(mg/L) BOD <sub>5</sub>	۳۲۵	۲۱۵	۲۴۰	۲۲۵
کدورت (NTU)	۱۳۸	۵/۲	۱۰/۴	۸/۹
BOD <sub>5</sub> /COD	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۱۸

## بحث

به طور کلی متداول‌ترین روش برای رنگ زدایی و تصفیه فاضلاب نساجی انعقاد شیمیایی است [۲۱]. از مهم‌ترین پارامترهای موثر در فرآیند انعقاد می‌توان به  $pH$ ، غلظت یون‌های فلزی منعقدکننده، سرعت و زمان اختلاط اشاره کرد. در نتیجه، بهینه سازی این عوامل



شکل ۵- تأثیر مدت زمان انعقاد بر کارایی منعقدکننده‌ها در حذف رنگ (دوز منعقد کننده:  $250 \text{ mg/L}$ ،  $pH$  بهینه ۹، اختلاط تند:  $100 \text{ rpm}$ ، اختلاط کند:  $45 \text{ rpm}$ ، ته نشینی:  $30 \text{ min}$ )



شکل ۶- تأثیر سرعت انعقاد بر کارایی منعقدکننده‌ها در حذف رنگ (دوز منعقد کننده:  $250 \text{ mg/L}$ ،  $pH$  بهینه ۹، اختلاط تند:  $100 \text{ rpm}$ ، اختلاط کند:  $45 \text{ rpm}$ ، ته نشینی:  $30 \text{ min}$ )

## تأثیر فرآیند انعقاد بر نسبت $BOD_5/COD$

نمودار ۷، تأثیر فرآیند انعقاد بر نسبت  $BOD_5/COD$  در فاضلاب خام و تغییرات آن بعد از فرآیند انعقاد را نشان می‌دهد. نسبت  $BOD_5/COD$  در ابتدا برای فاضلاب خام برابر با  $0/07$  بود که پس از فرآیند انعقاد با منعقدکننده‌های مختلف این نسبت برای پلی آلومینیوم کلراید، سولفات فریک و کلرید فریک به ترتیب به  $0/21$ ،  $0/14$  و  $0/18$  افزایش یافت. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تجزیه پذیری بیولوژیکی پساب حاصل از فرآیند انعقاد نسبت به فاضلاب خام افزایش یافته است.



به طور قابل توجهی ممکن است راندمان فرآیند را افزایش دهد [۱۳].

### تأثیر pH بر کارایی منعقدکننده‌ها

یکی از پارامترهای مؤثر در فرآیند انعقاد، pH محلول می‌باشد. بنابراین به منظور بررسی اثر آن، آزمایش انعقاد با منعقدکننده‌های پلی آلومینیوم کلراید، سولفات فریک و کلرید فریک در ۶ مقدار pH برابر ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و در دوز منعقدکننده‌ها ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام گرفت. نتایج نشان داد، حداکثر حذف رنگ برابر ۷۷/۲٪ و COD برابر ۴۴٪ در پساب رنگریزی در pH برابر ۹ توسط پلی آلومینیوم کلراید حاصل می‌شود، در حالی که سولفات فریک و کلرید فریک در همان pH به ترتیب ۶۷٪ و ۶۹٪ رنگ و ۳۳/۵٪ و ۳۸/۵٪ از COD را از پساب رنگریزی حذف نموده‌اند. همانطور که در شکل ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، راندمان حذف با مقدار pH رابطه‌ای مستقیم دارد. افزایش راندمان انعقاد در pH های بالا با میزان بهینه در pH برابر ۹ مربوط به این واقعیت است که رنگ‌های بازیکی تمایل به تجمع در pH های قلیایی دارند که بیانگر میزان حلالیت و نرخ یونیزاسیون کاهش یافته آنها در pH بالا است [۱۶]. مطالعات انجام شده توسط محققین نشان می‌دهد که پلی آلومینیوم کلراید راندمان حذف رنگ بهتری در گستره‌ی وسیع‌تر pH را نشان می‌دهد [۱۳]. کاربرد سولفات فریک در این مطالعه منجر به حذف ۶۷٪ رنگ و ۳۳/۵٪ COD گردید، این نتایج با گزارش حاصل از کاربرد فرآیند انعقاد در تصفیه فاضلاب نساجی توسط جورج و همکاران در سال ۲۰۰۳ مطابقت دارد [۱۶]. همچنین در این مطالعه دوز منعقدکننده ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و pH برابر ۹ به عنوان شرایط بهینه کاربرد پلی آلومینیوم کلراید در فرآیند تعیین شد، نتایج حاصل از کاربرد پلی آلومینیوم کلراید در این مطالعه با بررسی یاری و همکاران در سال ۱۳۹۱ مطابقت دارد. آنها نیز در مطالعه خود، شرایط بهینه کاربرد پلی آلومینیوم کلراید در pH برابر ۸/۷ گزارش کردند [۲۲].

### تأثیر غلظت منعقدکننده‌ها

انتخاب نوع و دوز مطلوب منعقدکننده در فرآیند انعقاد متناسب با نوع و مقدار پارامتر آلاینده از اهمیت خاصی برخوردار است. ساختار مختلف رنگ‌ها باعث می‌شود که دوز مطلوب ماده منعقدکننده از یک ساختار به دیگری متفاوت باشد [۱۲]. مواد منعقدکننده مختلف درجات مختلفی از ناپایداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هر چه ظرفیت یون فلزی منعقدکننده بالاتر باشد، اثر ناپایداری‌کنندگی آن بیشتر است و در نتیجه دوز مورد نیاز برای فرآیند انعقاد کمتر است [۸]. در این مطالعه، اثر افزایش دوز منعقدکننده‌ها در pH بهینه ۹

از ۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که انتظار می‌رفت، افزایش دوز منعقدکننده‌ها تأثیر چشمگیری بر راندمان حذف رنگ و COD از فاضلاب داشت. به طوری که با افزایش دوز پلی آلومینیوم کلراید از ۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، راندمان حذف رنگ از ۴۰/۳٪ تا ۸۴/۲٪ و راندمان حذف COD از ۶/۸٪ تا ۴۹/۵٪ افزایش یافت. همچنین در این شرایط راندمان حذف رنگ و COD برای سولفات فریک به ترتیب ۶۶/۹٪ و ۳۳/۵٪ و برای کلرور فریک ۶۹٪ و ۳۸/۵٪ حاصل گردید. همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش دوز منعقدکننده از ۲۵۰ به ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تأثیر قابل ملاحظه‌ای در راندمان حذف رنگ و COD حاصل نشده است. از این رو با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی از نظر مصرف منابع و انرژی، دوز ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به عنوان دوز بهینه منعقدکننده‌ها در pH ۹ در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که در کاربرد هر ۳ منعقدکننده، درصد حذف رنگ بیشتر از درصد حذف COD است که با نتایج مطالعه سلوکوک و همکاران در سال ۲۰۰۵ تطابق دارد [۲۳]. در این مطالعه با استفاده از دوز ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر سولفات فریک، ۹۱٪ رنگ و ۶۳٪ COD حذف شد که با نتایج حاصل از مطالعه ارسلان (۲۰۰۱) قابل تطبیق است [۲۴].

### تأثیر زمان و سرعت انعقاد

سرعت و زمان اختلاط یکی از پارامترهای مؤثر در حذف رنگ می‌باشد. در این آزمایش، به منظور تعیین اثر افزایش زمان انعقاد و سپس سرعت انعقاد بر راندمان کاهش رنگ و COD، آزمایشات در دوز ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و pH برابر ۹ انجام شد. همانطور که انتظار می‌رفت، افزایش زمان انعقاد و سرعت انعقاد، تأثیر قابل توجهی بر راندمان حذف رنگ و COD از فاضلاب داشت. با توجه به شکل ۵، افزایش زمان انعقاد از ۱ به ۵ دقیقه برای پلی آلومینیوم کلراید منجر به افزایش راندمان حذف رنگ و COD به ترتیب از ۷۷/۲٪ به ۸۸/۲٪ و ۴۴٪ به ۶۶/۶٪ گردید. این افزایش عملکرد برای سولفات فریک حذف رنگ را از ۶۷٪ به ۷۶/۳٪ و حذف COD را از ۳۳/۵٪ تا ۵۰٪ رسانید. همچنین در این شرایط حذف رنگ برای کلرور فریک از ۶۹٪ به ۷۹٪ و حذف COD از ۳۸/۵٪ به ۶۰٪ افزایش یافت. از طرفی با توجه به اینکه افزایش زمان انعقاد از ۵ به ۶ دقیقه تأثیر قابل توجهی بر افزایش راندمان فرآیند نداشت، زمان انعقاد ۵ دقیقه به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته شد. پس از بهینه‌سازی زمان انعقاد، اثر افزایش سرعت انعقاد با افزایش سرعت انعقاد از ۱۰۰ تا ۲۰۰ دور در دقیقه، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۶، افزایش سرعت انعقاد از ۱۰۰ به ۱۷۵ دور در دقیقه، تأثیر افزایشی در راندمان تصفیه داشته، به گونه‌ای که راندمان

سرعت تجمع سریع و ایجاد لخته‌های بزرگتر و سنگین‌تر جهت حذف COD و رنگ در pH خنثی یا قلیایی را ایجاد می‌نماید [۲۶]. نتایج حذف COD برای منعقدکننده‌های مختلف به ترتیب،  $(SO_4)_p > FeCl_3 > PACl$  و نتایج حذف رنگ به صورت  $(SO_4)_p = FeCl_3 > PACl$  حاصل گردید. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۲، پلی آلومینیوم کلراید با داشتن راندمان حذف ۹۵٪ و ۷۷/۴٪ به ترتیب برای رنگ و COD در دوز ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر و pH برابر ۹ در بین منعقدکننده‌های به کار برده شده، منعقدکننده اثربخش‌تر می‌باشد. مطالعات دیگر همچون بررسی عرفات در سال ۲۰۰۷ و همچنین مطالعه مرزوک و همکاران در سال ۲۰۱۱ نیز نشان می‌دهد که کلرید فریک در مقایسه با پلی آلومینیوم کلراید به عنوان یک ماده منعقدکننده ناموفق برای تصفیه فاضلاب نساجی است [۲۷، ۲۱]. ارگاس و همکاران انعقاد فاضلاب حاوی رنگ واکنشی را با استفاده از سولفات فریک مورد بررسی قرار دادند؛ اما هیچ حذف رنگی مشاهده نشد که ممکن است به علت حضور سورفکتانت باشد که برای تثبیت پراکندگی در حمام رنگ استفاده می‌شود [۲۸]. در صورتی که از بار و همکاران در سال ۲۰۰۴ به این نتیجه رسیدند که از میان مواد شیمیایی مورد استفاده، سولفات آهن حداکثر حذف رنگ را داشت [۱۵]. تطابق و عدم تطابق نتایج این بررسی با برخی مطالعات دیگر نشان دهنده این واقعیت است که کارایی منعقدکننده‌ها در فرآیند انعقاد به نوع فاضلاب مورد بررسی و ماهیت ترکیبات آلاینده و نیز ساختار مولکولی و حلالیت رنگ‌های موجود در فاضلاب بستگی دارد.

### نتیجه گیری

مطالعات زیادی در خصوص حذف رنگ از فاضلاب نساجی انجام شده است که از میان روش‌های بررسی شده، روش انعقاد و لخته‌سازی، مقرون به صرفه‌ترین و بهترین تکنولوژی برای پیش تصفیه فاضلاب نساجی است [۲۹]. در این مطالعه کارایی مواد منعقدکننده مختلف در فرآیند انعقاد جهت حذف رنگ از پساب واحد رنگرزی یک کارخانه فرش ماشینی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر ۳ منعقدکننده مورد استفاده در این مطالعه منجر به حذف رنگ و COD شدند اما از میان آنها، کاربرد پلی آلومینیوم کلراید حداکثر حذف رنگ (۹۵٪) و COD (۷۷/۴٪) را به دنبال داشت. افزایش نسبت  $BOD_5/COD$  پس از فرآیند انعقاد با منعقدکننده‌های مختلف بیانگر کارآمدی و افزایش قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی پساب خروجی از فرآیند انعقاد بود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که شاید فرآیند انعقاد، امیدوارکننده‌ترین روش پیش تصفیه برای بهبود راندمان کلی فاضلاب‌های حاوی رنگ باشد.

حذف رنگ برای پلی آلومینیوم کلراید از ۸۸/۲٪ به ۹۵٪ و راندمان حذف COD از ۶۶/۶٪ به ۷۷/۴٪ افزایش یافت. در چنین شرایطی راندمان حذف رنگ برای سولفات فریک از ۷۶/۳٪ به ۹۰/۷٪ و راندمان حذف COD از ۵۰٪ به ۶۲/۸٪ ارتقاء یافت. همچنین با کاربرد کلرور فریک در این مرحله، راندمان حذف رنگ از ۷۸/۹٪ به ۹۱/۱٪ و راندمان حذف COD از ۶۰٪ به ۷۱/۹٪ افزایش یافت. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افزایش سرعت انعقاد از ۱۷۵ به ۲۰۰ دور در دقیقه، تغییر قابل ملاحظه‌ای در راندمان تصفیه ایجاد نکرد و در این شرایط افزایش راندمان حذف رنگ و COD به صورت جزئی حاصل گردید. در نتیجه، سرعت انعقاد ۱۷۵ دور در دقیقه در مدت زمان ۵ دقیقه به عنوان مقادیر بهینه در نظر گرفته شد.

### تأثیر فرآیند انعقاد بر نسبت $BOD_5/COD$

نتایج حاصل از آزمایشات تعیین نسبت  $BOD_5/COD$  در شکل ۷ نشان داده شده است. این نسبت در ابتدا برای فاضلاب خام برابر با ۰/۰۷ بود که دلیل آن وجود ترکیبات آلی سمی و مقاوم به تجزیه بیولوژیکی است [۲۵]. پس از فرآیند انعقاد با این نسبت برای منعقدکننده‌های پلی آلومینیوم کلراید، سولفات فریک و کلرور فریک به ترتیب به ۰/۲۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۸ افزایش یافت که بیانگر افزایش قابلیت تجزیه بیولوژیکی پساب حاصل از فرآیند انعقاد است. با توجه به نتایج این مطالعه، پساب حاصل از کاربرد منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید، میزان تجزیه‌پذیری بیولوژیکی بیشتری را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این مطالعه همانند بررسی ارسالان و همکاران در سال ۲۰۰۱ نشان می‌دهد که پساب حاصل از فرآیند انعقاد قابلیت تجزیه‌پذیری بیشتری نسبت به محلول رنگ اصلی دارند [۲۴].

### تعیین منعقدکننده بهینه

انتخاب منعقدکننده‌ها برای رسیدن به تصفیه بهینه فاضلاب‌های حاوی رنگ از اهمیت خاصی برخوردار است [۱۲]. گزارش شده است که نمک‌های فلزی هیدرولیز شده مانند پلی آلومینیوم کلراید اغلب مؤثرتر از نمک‌های فلزی هیدرولیز نشده مانند سولفات آلومینیوم (آلوم)، کلرید فریک و سولفات فریک هستند. این امر به واسطه انحلال آسان‌تر و بیشتر پلی آلومینیوم کلراید در آب است. این ویژگی منجر به کارایی بهتر این منعقدکننده در مقایسه با سایر منعقدکننده‌های مورد مطالعه شده، به طوری که در گستره وسیعی از pH حتی کاربرد دوزهای پایین‌تر این منعقدکننده منجر به حذف بیشتر رنگ و سایر آلاینده‌ها می‌گردد [۱۳]. پلی آلومینیوم کلراید در مقایسه با دیگر منعقدکننده‌های متداول دارای محتوای بالایی از آلومینیوم پلیمریزه بوده و این امر



## تشکر و قدردانی

این پژوهش بر خود لازم می‌دانند از معاونت فن‌آوری و تحقیقات دانشگاه و معاونت پژوهشی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی به خاطر مساعدت در انجام این پژوهش قدرانی نمایند. همچنین از کارشناسان آزمایشگاه شیمی گروه مهندسی بهداشت محیط، سرکار خانم مهندس سیمین‌دخت میرشفیعیان و سرکار خانم مهندس فاطمه شکری سپاسگزاری می‌شود.

این مقاله برگرفته از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط تحت عنوان «بررسی میزان کارایی فرآیند انعقاد و ازن زنی جهت حذف کدورت، COD، رنگ و کاهش سمیت از پساب واحد رنگرزی در یک کارخانه فرش ماشینی» که در قالب طرح مصوب شماره ۹۶۳۳ انجام گرفته است. بدینوسیله محققین

## References

1. Dos Santos AB, Cervantes FJ, van Lier JB. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource Technology* 2007; 98(12):2369-85.
2. Gulkaya I, Surucu GA, Dilek FB. Importance of  $H_2O_2/Fe^{2+}$  ratio in Fenton's treatment of a carpet dyeing wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 2006; 136(3):763-69.
3. Daneshvar N, Salari D, Khataee A. Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to  $TiO_2$ . *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 2004; 162(2):317-22.
4. Mahmoodi NM, Salehi R, Arami M, Bahrami H. Dye removal from colored textile wastewater using chitosan in binary systems. *Desalination* 2011; 267(1):64-72.
5. Cengiz S, Tanrikulu F, Aksu S. An alternative source of adsorbent for the removal of dyes from textile waters: *Posidonia oceanica* (L.). *Chemical Engineering Journal* 2012; 189:32-40.
6. Haque MM, Smith WT, Wong DK. Conducting polypyrrole films as a potential tool for electrochemical treatment of azo dyes in textile wastewaters. *Journal of Hazardous Materials* 2015; 283:164-70.
7. Raman CD, Kanmani S. Textile dye degradation using nano zero valent iron: A review. *Journal of Environmental Management* 2016; 177:341-55.
8. Zhang H, Zhang J, Zhang C, Liu F, Zhang D. Degradation of CI Acid Orange 7 by the advanced Fenton process in combination with ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry* 2009; 16(3):325-30.
9. Gozávez-Zafrilla J, Sanz-Escribano D, Lora-García J, Hidalgo ML. Nanofiltration of secondary effluent for wastewater reuse in the textile industry. *Desalination* 2008; 222(1-3):272-79.
10. Pham TTH, Phan DH. Color and cod removal of dyeing wastewater by combination treatment of coagulation and fenton oxidation. Osaka: Annual Report of FY 2003, The Core University Program between Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and National Centre for Natural Science and Technology (NCST); 2004:289-95.
11. Han G, Liang C-Z, Chung T-S, Weber M, Staudt C, Maletzko C. Combination of forward osmosis (FO) process with coagulation/flocculation (CF) for potential treatment of textile wastewater. *Water Research* 2016; 91:361-70.
12. Zahrim A, Tizaoui C, Hilal N. Coagulation with polymers for nanofiltration pre-treatment of highly concentrated dyes: A review. *Desalination* 2011; 266(1):1-16.

13. Verma AK, Dash RR, Bhunia P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of Environmental Management* 2012; 93(1):154-68.
14. Riera-Torres M, Gutiérrez-Bouzán C, Crespi M. Combination of coagulation–flocculation and nanofiltration techniques for dye removal and water reuse in textile effluents. *Desalination* 2010; 252(1):53-59.
15. Azbar N, Yonar T, Kestioglu K. Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent. *Chemosphere* 2004; 55(1):35-43.
16. Georgiou D, Aivazidis A, Hatiras J, Gimouhopoulos K. Treatment of cotton textile wastewater using lime and ferrous sulfate. *Water Research* 2003; 37(9):2248-50.
17. Rana S, Suresh S. Comparison of different Coagulants for Reduction of COD from Textile industry wastewater. *Materials Today: Proceedings* 2017; 4(2):567-74.
18. APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21st ed. Washington DC: American Public Health Association; 2005.
19. Wawrzekiewicz M. Removal of CI Basic Blue 3 dye by sorption onto cation exchange resin, functionalized and non-functionalized polymeric sorbents from aqueous solutions and wastewaters. *Chemical Engineering Journal* 2013; 217:414-25.
20. Elemen S, Kumbasar EPA, Yapar S. Modeling the adsorption of textile dye on organoclay using an artificial neural network. *Dyes and Pigments* 2012; 95(1):102-11.
21. Merzouk B, Gourich B, Madani K, Vial C, Sekki A. Removal of a disperse red dye from synthetic wastewater by chemical coagulation and continuous electrocoagulation. A comparative study. *Desalination* 2011; 272(1):246-53.
22. Yari A, Mahvi A, Mahmudiyani M, Safaiye Ghomi J, Safdari M, Emamiyan M. The process of coagulation, flocculation and advanced oxidation in effluent treatment of second refinery oil industries. *Qom University of Medical Sciences Journal* 2012; 6(2):69-75 (In Persian).
23. Selcuk H. Decolorization and detoxification of textile wastewater by ozonation and coagulation processes. *Dyes and Pigments* 2005; 64(3):217-22.
24. Arslan I. Treatability of a simulated disperse dye-bath by ferrous iron coagulation, ozonation, and ferrous iron-catalyzed ozonation. *Journal of Hazardous Materials* 2001; 85(3):229-41.
25. El-Gohary F, Badawy M, El-Khateeb M, El-Kalliny A. Integrated treatment of olive mill wastewater (OMW) by the combination of Fenton's reaction and anaerobic treatment. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 162(2):1536-41.
26. Qian F, Sun X, Liu Y. Removal characteristics of organics in bio-treated textile wastewater reclamation by a stepwise coagulation and intermediate GAC/O<sub>3</sub> oxidation process. *Chemical Engineering Journal* 2013; 214:112-18.

27. Arafat HA. Simple physical treatment for the reuse of wastewater from textile industry in the Middle East. *Journal of Environmental Engineering and Science* 2007; 6(1):115-22.
28. Ergas SJ, Therriault BM, Reckhow DA. Evaluation of water reuse technologies for the textile industry. *Journal of Environmental Engineering* 2006; 132(3):315-23.
29. Emongor V, Nkegbe E, Kealotswe B, Koorapetse I, Sankwasa S, Keikanetswe S. Pollution indicators in gaborone industrial effluent. *Journal of Applied Sciences* 2005; 5:147-50.