

## مروری بر کیفیت، کمیت و روش‌های تصفیه فاضلاب صنایع نساجی

مهدخت ارشدی<sup>۱</sup>، جلال‌الدین شایگان سالک<sup>۲\*</sup>، امیرحسین حمیدیان<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

۳- دانشیار مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۸/۰۴

پیام‌نگار: shayegan@sharif.edu

### چکیده

صنعت نساجی یکی از منابع مهم آلاینده محیط زیست به شمار می‌رود. عمده‌ترین آلاینده‌های موجود در این فاضلاب مربوط به حضور مواد رنگ‌زا در آن است که بیشینه مقدار آن در فرایند رنگ‌رزی و تکمیل وارد فاضلاب می‌شود. ورود این مواد به محیط زیست، آثار منفی بسیاری بر بوم‌سازگانه‌ها و سلامت انسان می‌گذارد. برای جلوگیری از این پیامدها و یا کاهش آن‌ها، تصفیه فاضلاب نساجی باید مورد توجه قرار گیرد. تا کنون روش‌های زیادی برای تصفیه این فاضلاب ارائه شده است. در بیشتر موارد ترکیبی از این روش‌ها مؤثر واقع شده است. در این مطالعه، میزان مصرف آب، مراحل تولید کننده فاضلاب و میزان تولید فاضلاب صنایع نساجی به تفکیک هر مرحله بررسی شده است. بخش مهمی از این مطالعه نیز به مرور روش‌هایی می‌پردازد که تا کنون در تصفیه فاضلاب این صنایع به کار گرفته شده‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** صنعت نساجی، واحدهای تولید کننده فاضلاب، کمیت و کیفیت فاضلاب، تصفیه فاضلاب، مواد رنگ‌زا

### ۱. مقدمه

به کار گرفته می‌شود. صنایع نساجی به علت تنوع روش‌های تولید، رنگ و مواد شیمیایی مصرفی، فاضلاب‌هایی با کیفیت و کمیت متفاوت تولید می‌کنند و به همین جهت در میان انواع فاضلاب‌های صنعتی در فرایند تصفیه دارای پیچیدگی‌های خاصی‌اند [۳]. فرایندهای رنگ‌رزی و تکمیل با ورود مواد رنگ‌زا به فاضلاب، عمده‌ترین و مهم‌ترین عامل آلودگی در فاضلاب صنایع نساجی محسوب می‌شوند [۲]. در صورت عدم تصفیه فاضلاب نساجی، مواد رنگی به طور مستقیم به محیط زیست راه می‌یابند و آثار نامطلوبی برجای می‌گذارند. ورود مواد رنگی به محیط‌های آبی به دلیل اثر آنها بر کاهش نفوذ نور، به ایجاد اختلال در عمل فتوسنتز

فاضلاب‌های صنعتی یکی از منابع مهم آلاینده محیط زیست‌اند، به طوری که گاهی غلظت COD و BOD و یا غلظت ترکیبات موجود در آن‌ها به ده‌ها هزار میلی‌گرم در لیتر می‌رسد [۱]. پساب‌های رنگی، مانند پساب صنایع نساجی یکی از فاضلاب‌های مهم صنعتی به‌شمار می‌آید که معضلات زیستی محیط پرادمانه‌ای را به وجود آورده است [۲]. در صنعت نساجی، برای تولید پارچه‌های مختلف طیف وسیعی از انواع الیاف طبیعی و مصنوعی به کار گرفته می‌شود. در این صنعت فرایندها و عملیات شیمیایی مختلفی در مورد مواد

\* تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

### ۳. میزان تولید فاضلاب در صنایع نساجی

جریان حجمی و کمیت پساب‌های نساجی تابع نوع تولید و روش رنگ‌رزی، کیفیت مواد اولیه و کیفیت محصول تولید شده است. در صنعت نساجی، به ازای رنگ‌رزی و تکمیل هر کیلو الیاف، در حدود ۳۰ الی ۶۰ لیتر پساب تولید می‌شود [۷].

در سال ۱۳۸۳، میزان فاضلاب تولید شده در صنایع عمده در داخل شهر تهران ۶۵۹۶۹۵۱۴ متر مکعب در سال برآورد شده است که با توجه به جمعیت سال ۱۴۰۰، سرانه فاضلاب صنعتی حدود ۱۵ لیتر به ازای هر نفر در روز محاسبه شده است. کل فاضلاب تولیدی صنایع نساجی تهران بزرگ طبق برآورد و اطلاعات جمع‌آوری شده، حدود ۶۸۴۹۲۲۵ مترمکعب در سال و یا ۱۸۷۶۵ مترمکعب در روز است [۹].

در سال ۱۳۹۱، رحمانی و غلامی (۱۳۹۱) فاضلاب حدود ۲۰ واحد صنعت نساجی در منطقه ۲۱ تهران را بررسی کرده‌اند. از میان صنایع برگزیده، صنعت نساجی بافت آزادی با میزان فاضلاب تولیدی ۱۲۰۰ مترمکعب در روز و نساجی جامه‌گران با میزان فاضلاب تولیدی ۳۰۰ مترمکعب در روز، بیشترین سهم را در تولید فاضلاب داشتند. از میان صنایع برگزیده، شاخص‌های اندازه‌گیری آلودگی در محدوده‌های  $10/5 < pH < 7/1$ ،  $400 < BOD$ ،  $333 < TDS < 5620$  (mg/l) و  $5 < COD < 928$  (mg/l) قرار داشتند. سازمان حفاظت محیط زیست برای پارامترهای TSS، EC، TDS، شوری، مقدار استاندارد برای تخلیه پساب صنایع نساجی به چاه جذبی ارایه نکرده و این درحالی است که صنایعی چون تولیدی مرسده مقادیری از TDS را، حدود بالاتر از ۵۰۰۰ mg/L، وارد محیط زیست می‌کردند.

در جدول (۲)، استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست برای تخلیه پساب صنعت نساجی به انواع آب‌های پذیرنده درج شده است.

### ۴. تولید فاضلاب در واحدهای مختلف صنایع نساجی

کل فاضلاب تولیدی صنایع نساجی تهران بزرگ حدود ۶۸۴۹۲۲۵ مترمکعب در سال و یا ۱۸۷۶۵ مترمکعب در روز برآورد شده است. در واحدهای مختلف صنایع نساجی، پسماندهایی با کیفیت متفاوت تولید می‌شود. پساب صنایع نساجی ترکیب رقیقی از مواد شیمیایی

منجر خواهد شد. از سوی دیگر، خطر راه‌یابی این مواد به زنجیره غذایی انسان وجود دارد [۴]. همچنین حضور مواد رنگ‌زا به کاهش انتقال اکسیژن و سایر گازها به آب خواهد انجامید [۵].

این آلودگیها پدیده خزه‌زدگی را نیز تشدید می‌کنند و آسیبهای جبران‌ناپذیری بر محیط زیست وارد می‌آورند [۶]. میزان مصرف آب در صنایع نساجی و رنگ‌رزی بین ۲۵ تا ۲۵۰ مترمکعب به ازای هر تن محصول (با توجه به نوع فرایند تولید) است. در فاضلاب خروجی از این صنعت غلظت COD، BOD و TDS بالا و بسیار قلیایی است. این صنعت باعث ایجاد آلودگی هوا و صدا نیز می‌شود [۷] که از حوصله این پژوهش خارج است.

### ۲. مصرف آب در صنایع نساجی

صنایع نساجی از جمله بزرگترین صنایع مصرف کننده آب‌اند و در نتیجه فاضلاب زیادی تولید می‌کنند.

این صنعت در بخش‌های تولید بخار در دیگ‌های بخار، به عنوان خنک کننده، شستشوی مواد اولیه، مصارف شرب و بهداشت کارکنان، شستشوی دستگاه‌های آهار، چاپ و رنگ‌رزی، شستشوی پارچه بعد از هر مرحله از عملیات، تهیه محلول‌های مصرفی در مراحل آهارزنی، آهارگیری، سفیدگری، شستشو و مراحل دیگر، آب مصرف می‌کند [۸]. حجم آب مصرفی برای فرایندهای مختلف نساجی را در جدول (۱) درج کرده‌ایم.

جدول ۱. حجم آب مصرفی برای فرایندهای مختلف نساجی براساس وزن محصول [۷].

مواد	فرایند	مصرف آب (مترمکعب / هر تن محصول)	
		حدود	میانگین
پنبه	شستشو	۳-۹۴	۳۰
پنبه	آهارگیری	۲۰-۹۲	۴۵
پنبه و الیاف مصنوعی	رنگ‌رزی	۹-۶۳	۳۸
پشم	شستشو	۳-۲۶	۱۳
پشم	رنگ‌رزی	۲۶-۱۳۱	۵۲

جدول ۲. استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست برای تخلیه پساب صنعت نساجی به آب‌های پذیرنده [۱۰].

پارامتر	pH	COD (mg/L)	BOD5 (mg/L)	TSS (mg/L)	TDS (Mg/L)	EC (Ms/cm)	Salinity (mg/L)	O&G (mg/L)
استاندارد تخلیه به آب سطحی	۸/۵-۶/۵	۱۰۰	۵۰	۶۰	-	-	-	۱۰
استاندارد تخلیه به چاه جذب	۹-۵	۱۰۰	۵۰	-	-	-	-	۱۰
استاندارد مصرف کشاورزی	۸/۵-۶	۲۰۰	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-	۱۰

#### ۳.۴ سفیدگری

در این مرحله به منظور تثبیت مواد اکسیدکننده‌ای چون آب اکسیژنه و آب ژاول، اسیدهای آلی و معدنی مانند سولفوریک اسید، نیتریک اسید، و استیک اسید مصرف می‌شود [۱۳].

#### ۴.۴ آهار زنی

آهار شامل مواد پرکننده و نرم کننده، مواد چسبنده‌ای چون نشاسته و آرد، جاذب آب و رطوبت، آنتی سپتیک و آب است. پساب آهار زنی به دلیل وجود این مواد، دارای BOD بسیار بالایی است. در سال‌های اخیر مواد آهاری مصنوعی نیز مانند پلی وینیل کلرید کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند که از آلاینده‌های خطرناک محیط زیست به‌شمار می‌روند [۱۳].

#### ۵.۴ رنگرزی

تخلیه پساب‌های رنگی به محیط، در جلوه‌های زیباشناختی محیط زیست و خزه‌زدگی اخلاص ایجاد می‌کند. این مواد می‌توانند منشأ محصولات جانبی خطرناکی نیز از طریق واکنش‌های شیمیایی مانند اکسایش، هیدرولیز و جز آنها شوند [۹]. در رنگرزی، با استفاده از ترکیبات آلی طبیعی یا مصنوعی، رنگ خاصی را به محصولات نساجی می‌دهند. رنگ‌های مصرفی برای رنگرزی پارچه‌های پنبه‌ای به سه گروه عمده قابل حل در آب، قابل حل در محیط قلیایی، و رنگ‌های تشکیل شده بر روی لیف تقسیم می‌شوند [۱۱]. رنگ‌زاهای نساجی با گستره‌ای در حدود ۱۰ هزار نوع رنگ‌زای مختلف یکی از

مختلف مانند پاک‌کننده‌ها، سفید کننده‌ها، رنگ‌های متنوع، مواد تثبیت‌کننده، اسیدهای آلی، ترکیبات آهار و دیگر مواد شیمیایی است [۹]. دمای بالا و تنوع آلاینده‌های شیمیایی، از مهم‌ترین ویژگی‌های فاضلاب صنعت نساجی به‌شمار می‌آید. مصرف بخار آب در واحدهای رنگرزی و چاپ و نیز مصرف آب داغ در مراحلی چون سفیدگری و آهارگری، سبب افزایش دمای نهایی این فاضلاب بین ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس می‌شود. در فاضلاب صنعت نساجی، محدوده گسترده‌ای از مواد شیمیایی با منشأ آلی و یا معدنی نیز وجود دارد که بخشی از مواد آلی قابل تجزیه زیستی و بخشی دیگر در محیط زیست پایدارند [۱۱]. مراحل مختلف تولید کننده از این قرار است:

#### ۱.۴ شستشوی اولیه

پساب حاصل از شستشوی اولیه حاوی ذرات معلق و روغن زیاد، BOD و دمای بالا.

#### ۲.۴ پشم شویی

صابون‌های قلیایی یا پاک‌کننده‌های غیر یونی برای شستن پشم مصرف می‌شود. بخشی از آب مورد استفاده در فرایند پشم شویی بازیافت و مابقی آن به‌صورت پساب تخلیه می‌شود. پساب تخلیه شده حاوی پشم، اوره، خون، چربی، سرگین، عرق، و سایر ناخالصی‌هایی است که سبب افزایش بسیار چشمگیر BOD می‌شود. پساب پشم‌شویی غنی از روغن و گریس، و گاهی حاوی گوگرد، فنل و آفت‌کش‌هاست [۱۲].

در مرسری کردن از قلیاهایی با غلظت معین شامل سود، پتاس، لیتیم هیدروکسید، روبیدیم هیدروکسید، آمونیاک و قلیاهای دیگر استفاده می‌شود. به دلیل قیمت مناسب، بیشتر سود مصرف می‌کنند. از آنجا که مرسری کردن فرایند کوتاه مدت پارچه‌های پنبه‌ای با محلول قلیا، و در بسیاری موارد سود غلیظ است، پساب این مرحله به شدت قلیایی و دارای حجم زیادی است و بهتر است قبل از ورود به سامانه فاضلاب تصفیه شود تا مانع رشد ریزسازگانها در بخش تصفیه زیستی سامانه فاضلاب نشود [۱۷، ۱۶].

#### ۴.۷ شستشوی نهایی

یکی از بزرگترین منابع تولید کننده فاضلاب در کارخانجات نساجی، شستشوی آهار از روی منسوجات است. بیش از ۹۰ درصد از آهار مصرفی در صنایع نساجی وارد جریان های فاضلاب می‌شود و تنها ده درصد از کل آهار مصرفی دوباره بازیافت می‌شود و به مصرف می‌رسد. مرحله شستشوی آهار معمولاً بیشتر از ۵۰ درصد بار BOD در فاضلاب صنعت نساجی را تشکیل می‌دهد. در مرحله شستشوی نهایی، میزان ذرات معلق مانند مرحله شستشوی اولیه زیاد نیست [۱۵].

در جدول (۳) آلاینده‌های مهم تولید شده در فرایندهای مختلف نساجی درج شده است.

جدول ۳. آلاینده‌های مهم تولید شده در فرایندهای مختلف نساجی [۱۱].

نوع فرایند (مهم)	آلاینده‌های مهم
شستشوی اولیه	BOD زیاد، چربی و قلیابیت زیاد، رنگ قهوه‌ای تیره، دمای حدود ۴۶ تا ۵۱ درجه سلسیوس
آهارزنی	BOD و مواد معلق نسبتاً بالا، pH قلیایی
رنگرزی و تکمیل	اسیدی، خیلی رنگی، COD بالا، BOD و ذرات معلق متوسط، احتمال سمیت، pH خنثی تا قلیایی
مرسری کردن	BOD و مواد معلق کم، pH قلیایی
آبکشی و شستشو	BOD زیاد، چربی زیاد

متداول ترین مواد شیمیایی مصرفی به‌شمار می‌آیند که سالانه حدود ۷۰۰ هزار تن در ۳۰۰۰ نوع رنگ مختلف تولید می‌شوند [۱۴، ۹]. مهم‌ترین رنگ‌های مصرفی در صنایع نساجی، عبارت‌اند از رنگ‌های اسیدی برای رنگرزی پشم و نایلون، خمی برای رنگرزی پشم و پنبه و الیاف مصنوعی، دیسپرس (پخشی) برای رنگرزی پلی استر نایلون و اکریلیک، دانه‌ای برای رنگرزی پشم و پنبه، آزویی برای رنگرزی پنبه، بازی برای رنگرزی آکریلیک، پرتوزا و گوگردی برای رنگرزی پشم و پنبه، متان کمپلکس برای رنگرزی پشم و پنبه و الیاف مصنوعی، و پیگمنت یا رنگدانه‌ها برای رنگرزی و چاپ پارچه‌های پشمی و پنبه‌ای [۱۴]. رنگ مصرفی در نساجی در سطح جهان به حدود ۳۶۰۰۰ تن در سال بالغ می‌شود. حدود ۱۵٪ مواد رنگ‌زای طی فرایندهای رنگرزی و پرداخت هدر می‌رود و به‌صورت پساب به محیط زیست راه می‌یابد [۹]. برآورد شده است که در سال ۱۹۸۷ میلادی، در حدود ۹۰۰۰ تن یعنی ۲ درصد از ۴۵۰ هزار تن رنگزای تولیدی در جهان توسط خود تولیدکنندگان و ۴۰ هزار تن دیگر یعنی ۹ درصد از مجموع کل رنگزاهای تولیدی توسط صنایع نساجی، چرم و دیگر صنایع وارد پساب‌ها شده‌اند [۱۵]. در سال ۲۰۰۰ میلادی، مصرف ۸۰۰ هزار تن ماده رنگ‌زای برای رنگرزی و چاپ، گزارش شده است. ثبات عمومی مواد رنگ‌زای، سبب افزایش پایداری این مواد در مقابل تجزیه و سخت شدن رنگبری پساب‌های صنعتی شده است. تولید رنگ‌زاهای از مواد سمی و سرطان‌زایی چون بنزیدین و سایر ترکیبات آروماتیک سبب افزایش نگرانی‌ها در خصوص این آلودگی شده است. پساب‌های صنایع مصرف کننده رنگ‌زای مانند نساجی دارای COD و TOC بالایی‌اند [۱۵].

#### ۴.۶ مرسریزاسیون<sup>۱</sup> (مرسری کردن)

مرسری کردن عبارت است از فرایندی شیمیایی- مکانیکی که با فروبردن الیاف سلولزی در محلول قلیایی با غلظت معین و نفوذ محلول به داخل لیف، سبب تورم قطری و کوتاه شدن طولی الیاف می‌شود. سپس عملیات شستشو، خنثی سازی، شستشوی مجدد و خشک کردن صورت می‌گیرد. این عمل سبب افزایش شفافیت و تمایل جذب رنگ، فعالیت شیمیایی، ثبات ابعادی، استحکام کششی، صافی زیردست و جلای کالای سلولزی می‌شود [۱۶، ۱۱].

1. Mercerization

## ۵. روش‌های تصفیه فاضلاب صنعت نساجی

پورتر<sup>۱</sup> و سیندر<sup>۲</sup> با مطالعه روی ۳۰ نمونه رنگ به این نتیجه رسیدند که در پساب‌های حاوی رنگ نساجی، اغلب BOD معرف ۱ تا ۲۶ درصد COD است؛ یعنی، نمی‌توان پساب نساجی را به راحتی فاضلاب شهری که BOD آن حداقل ۵۰ درصد COD است، تصفیه و تجزیه کرد. در مورد کارایی تصفیه زیستی فاضلاب‌های کارخانه های نساجی، آرای متفاوتی ابراز شده است. پیر صاحب و همکارانش (۱۳۹۱) اظهار داشته‌اند که فرایندهای تصفیه زیستی عموماً برای حذف اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی ( $BOD_5$ ) و جامدات معلق (SS) مؤثر است اما برای حذف رنگ از این فاضلاب‌ها کارایی زیادی ندارند، زیرا ترکیبات رنگی دارای ساختارهای مقاوم و پیچیده‌ای‌اند که باعث می‌شود سرعت تجزیه زیستی رنگ‌ها به آهستگی صورت گیرد [۱۴]. مسعودی‌نژاد و رضازاده آذری (۱۳۸۷) به این نتیجه رسیدند که به دلیل ترکیبات رنگی به کار رفته در صنایع نساجی و نیز انواع مواد افزودنی از استیک اسید و مانند آن، به اسیدی شدن pH این فاضلاب انجامیده و امکان تصفیه به روش لجن فعال در آن وجود ندارد. در واقع، برای کاربرد روش‌های زیستی، ابتدا باید روی فاضلاب، عملیات پیش‌تیمار انجام دهیم [۱۸]. به طوری که برقی و همکارانش (۱۳۸۷) روش‌های غیر زیستی را به دلیل سرمایه‌گذاری گزاف غیر مؤثر می‌دانند. بنابر اظهار آنان، روش‌های زیستی ساده و ارزان‌اند و اغلب برای حذف رنگ و مواد آلی صنایع نساجی به کار برده می‌شوند. متداول‌ترین روش‌های حذف رنگ از فاضلاب نساجی شامل روش‌های فیزیکی- شیمیایی نظیر انعقاد و لخته سازی، تصفیه با معرف فنتون، فوتواکسایش، جذب سطحی، اوزن‌زنی، اسمز معکوس، استفاده از فیلترهای غشایی و اکسایش پیشرفته‌اند [۱۹،۲۰]. هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی در حذف رنگ از فاضلاب هستند.

### ۵.۱ لجن فعال

در روش لجن فعال، در مرحله اول به کمک فرایند اکسایش، مواد آلی قابل تجزیه شیمیایی حذف و تا مقدار قابل تزیق به حوضچه زیستی کاهش داده می‌شود. فاضلاب پس از ته‌نشینی مقدماتی وارد حوض هواده می‌شود. ریزاندامگانها با مصرف اکسیژن هوای دمیده

شده در فاضلاب، مواد آلی موجود در فاضلاب را تجزیه و بخشی را به صورت گاز آزاد می‌کنند و بخش دیگر را به رشد و تکثیر خودشان اختصاص می‌دهند. بعد از حوض هواده‌ی، فاضلاب وارد حوض ته‌نشینی نهایی می‌شود. مقداری از لجن ته‌نشین شده در این حوض ته‌نشینی ثانویه برای شتاب بخشیدن به عمل حوض هواده‌ی برگشت داده می‌شود. روش لجن فعال بر حسب بار هیدرولیکی و بار آلودگی به واحد حجم حوض‌های هواده‌ی، زمان ماند هیدرولیکی، زمان اقامت موجودات ذره‌بینی در سیستم، مقدار برگشت جریان، نحوه هواده‌ی و نوع جریان به انواع متعدد هواده‌ی گسترده (هواده‌ی ممتد)، لجن فعال متعارف، لجن فعال دو مرحله‌ای، لجن فعال با خوراک‌دهی مرحله‌ای، لجن فعال با هواده‌ی تدریجی، لجن فعال با هواده‌ی به لجن برگشتی و هواده‌ی پر بار تقسیم می‌شود [۸].

### ۵.۲ تصفیه زیستی با بستر متحرک<sup>۳</sup>

برقی و همکارانش (۱۳۸۷) عملکرد سامانه تصفیه زیستی با بستر متحرک (MBBR) را در تصفیه فاضلاب صنایع نساجی بررسی کردند. برای این منظور یک واکنشگاه MBBR به حجم ۲۶ لیتر و از جنس پلکسی گلاس با فاضلاب مصنوعی با ترکیبی از نمک‌های بافرسفات، اوره، ملاس و غلظت‌های مختلف رنگ، تغذیه شد. محدوده تغییرات غلظت رنگ به کار رفته در این تحقیق ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر با COD معادل ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و غلظت رنگ ۱، ۱۰، و ۱۵ میلی‌گرم در لیتر با COD برابر ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود. پس از راه‌اندازی واکنشگاه با فاضلاب مصنوعی با COD ورودی معادل ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و انطباق و سازگاری ریزاندامگانها با شرایط موجود، طبق یک دوره زمانی مشخص رنگ با غلظت ورودی ۱، ۱۰، و ۱۵ میلی‌گرم در لیتر به سیستم اضافه شد. با راهبری واکنشگاه در دمای ۲۳ تا ۲۸ درجه سلسیوس، زمان ماند هیدرولیکی ۲۴ ساعت و COD ورودی ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، بازده حذف رشدمایه، به ترتیب، به میزان ۶۸/۵٪، ۸۹/۱۵ و ۹۰/۴۶٪ رسید. این میزان برای حذف رنگ، به ترتیب، به ۶۱/۵۶٪، ۷۵/۸۵٪ و ۸۰/۰۵٪ تغییر یافت. یعنی، با افزایش غلظت رنگ ورودی، بازدهی حذف COD و رنگ افزایش یافت. با راهبری واکنشگاه با COD معادل ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و با غلظت

1. Porter  
2. Sinder

3. Moving bed biofilm reactor

رنگ ورودی ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر، به ترتیب، ۹۱/۷۸٪ و ۷۹/۵۰٪ COD و ۹۷/۷٪ و ۶۴/۲۱٪ رنگ حذف شد. یعنی با افزایش مقدار COD ورودی و غلظت رنگ به کار رفته، بازده حذف COD و رنگ کاهش یافت. همچنین، آزمایشها نشان دادند که در غلظت ثابت رنگ ورودی با افزایش COD ورودی از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، بازده و کارایی سیستم در حذف رشدمایه و مواد آلی تغییر چندانی نمی‌کند. بنابر نتایج آزمایشها، سیستم تصفیه زیستی با بستر متحرک از نظر حذف مواد آلی و حذف رنگ می‌تواند در تصفیه فاضلاب صنایع نساجی موفق باشد [۱۹].

#### ● پتاسیم فرات

در سال ۱۳۷۶، در دانشگاه تربیت مدرس مطالعه تصفیه فاضلاب نساجی با استفاده از پتاسیم فرات انجام شد. برای تهیه نمونه فاضلاب، ابتدا کارخانه‌های نساجی بر اساس نوع الیاف مصرفی به سه دسته الیاف مصنوعی، پشم، و پنبه تقسیم شدند. از هر گروه یک کارخانه انتخاب، و سپس از فاضلاب‌های خروجی از واحدهای مختلف کارخانه نمونه برداری شد. نمونه نهایی پس از اختلاط نمونه‌ها و تهیه یک نمونه مرکب، به آزمایشگاه ارسال شد. در شرایط بهینه، حذف COD و TSS به کمک پتاسیم فرات، به ترتیب، حدود ۸۵ تا ۹۲/۴ و ۹۴ تا ۹۶ درصد ارزیابی شده است. حجم لجن تولیدی به کمک پتاسیم فرات حدود ۱ تا ۲/۵ درصد حجم اولیه ارزیابی شده که نسبت به فریک کلر ۲/۵ تا ۳ بار کمتر است. نتایج نشان می‌داد بهینه میزان مصرف پتاسیم فرات حدود ۶۰ تا ۸۵ میلی‌گرم در لیتر و pH بهینه در حدود ۵ تا ۶ بوده است. با توجه به خاصیت اکسیدکنندگی، گندزدایی و انعقادی پتاسیم فرات، می‌توان از آن به عنوان یک ماده شیمیایی چندمنظوره که باعث کاهش حجم تأسیسات تصفیه‌خانه فاضلاب این‌گونه صنایع، هزینه‌ها، اجراء، نگهداری و بهره برداری می‌شود، استفاده کرد. با توجه به واکنش‌پذیری شدید پتاسیم فرات، نگهداری‌اش در طولانی مدت باعث کاهش درصد خلوص آن خواهد شد؛ در نتیجه، تولید آن در محل مصرف از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. در یک جمع بندی کلی پتاسیم فرات نسبت به فریک کلر، قدرت حذف رنگ بیشتر، حجم لجن تولیدی کم‌تر (در حدود نصف تا یک سوم لجن تولیدی توسط فریک کلر)، بازده حذف COD بیشتر (حدود ۱/۵ تا ۱/۸ برابر فریک کلر) و بازده حذف TSS بیشتری دارد [۲۳].

رنگ ورودی ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر، به ترتیب، ۹۱/۷۸٪ و ۷۹/۵۰٪ COD و ۹۷/۷٪ و ۶۴/۲۱٪ رنگ حذف شد. یعنی با افزایش مقدار COD ورودی و غلظت رنگ به کار رفته، بازده حذف COD و رنگ کاهش یافت. همچنین، آزمایشها نشان دادند که در غلظت ثابت رنگ ورودی با افزایش COD ورودی از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، بازده و کارایی سیستم در حذف رشدمایه و مواد آلی تغییر چندانی نمی‌کند. بنابر نتایج آزمایشها، سیستم تصفیه زیستی با بستر متحرک از نظر حذف مواد آلی و حذف رنگ می‌تواند در تصفیه فاضلاب صنایع نساجی موفق باشد [۱۹].

#### ۵.۳ منعقد کننده‌های معدنی

#### ● فریک کلراید و آلومینیم سولفات

امروزه، منعقدکننده‌های حاوی آلومینیم سولفات و فریک کلراید بیشترین کاربرد را در حذف کدورت از آب و فاضلاب دارند [۲۱]. پیرصاحب و همکاران (۱۳۹۱) تصفیه پذیری فاضلاب صنایع نساجی را با بهره‌گیری از منعقد کننده‌های معدنی بررسی کردند. عدم تولید محصولات میانی سمی و زیانبار از مهم‌ترین مزایای تصفیه پساب‌های رنگی با استفاده از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی است، که دلیل عمده آن، تجزیه نشدن ترکیبات رنگی است. بر خلاف بسیاری از روش‌ها، در مقیاس بزرگ انعقادسازی از صرفه اقتصادی و قابلیت اجرایی بالا برخوردار است [۱۴]. اما محدودیت‌های موجود در مقدار آلوم باقی‌مانده در پساب و مشکوک بودن ارتباط آلوم با بیماری فراموشی از معایب این روش به شمار می‌رود. در صورتی که میزان فریک کلر بیشتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر باشد، موجب رنگی شدن پساب و تغییر مزه آب می‌شود و روی اجسام لکه زرد متمایل به قرمز قهوه‌ای می‌اندازد [۲۲]. پیرصاحب و همکاران (۱۳۹۱) کارایی دو منعقدکننده آلوم و فریک کلراید در تصفیه فاضلاب کارخانجات نساجی را بررسی و تأثیر pH و غلظت مواد منعقدکننده را آزمایش و بررسی کردند. آنان دو منعقدکننده آلومینیم سولفات و فریک کلراید را در شرایط بهینه به منظور تصفیه فاضلاب کارخانه نساجی کرب ناز از طریق سنجش پارامترهایی چون رنگ، COD، BOD، TSS و pH مقایسه کردند. نتایج ۲۴۰ نمونه مورد بررسی، نشان داد که منعقدکننده فریک کلر برای حذف COD، TSS و رنگ نسبت به آلوم بازده بیشتری دارد. بیشترین میزان حذف COD، TSS، و رنگ توسط آلوم، به ترتیب، ۳۶٪، ۱۹٪ و ۶۸/۸٪ بود، در حالی که برای

## ۵.۴ ترکیب سیستم تصفیه شیمیایی و زیستی

روش‌های زیستی برای حذف رنگ فاضلاب صنایع نساجی ارزان‌تر از سایر روش‌ها هستند، اما سمیت رنگ در بسیاری موارد از رشد باکتریایی جلوگیری می‌کند و باعث محدود شدن بازده حذف می‌شود [۲۴]. رحمانی و غلامی (۱۳۹۱) در بررسی صنایع نساجی تهران بزرگ نتیجه گرفته‌اند که صنایع دارای سیستم تصفیه فاضلاب شامل سیستم تصفیه شیمیایی با استفاده از مواد منعقد کننده برای حذف فاضلاب رنگی مفید و برای تصفیه فاضلاب انسانی مخلوط شده با فاضلاب صنعتی استفاده از سیستم تصفیه زیستی لازم است. پساب خروجی صنایع، ابتدا وارد مخزن متعادل‌سازی شده و با مواد شیمیایی مانند آهک، آلومینیم سولفات و پلی‌اکترولیت، مخلوط و پس از اختلاط آرام به وسیله هوادهی به حوض ته‌نشینی وارد می‌شود. در مرحله بعدی، فاضلاب ورودی وارد سیستم تصفیه لجن فعال و بعد از آن وارد حوضچه ته‌نشینی ثانویه می‌شود. در نهایت، پساب با کلر زنی وارد چاه جذبی و یا برای آبیاری فضای سبز استفاده می‌شود [۹].

به این منظور، مسعودی‌نژاد و رضازاده آذری (۱۳۸۷) به منظور ایجاد امکان انجام فرایند تصفیه توسط ریزاندامگان موجود در لجن فعال، در مرحله اول به کمک فرایند اکسایش با حذف مواد آلی قابل تجزیه شیمیایی، مقدار COD را به مقدار قابل تزریق به حوض زیستی کاهش داده‌اند. در این روش، ابتدا فاضلاب خروجی در یک مخزن ۸ مترمکعبی جمع‌آوری می‌شود. با انجام فرایند اکسایش با استفاده از هیپوکلریت کلسیم به میزان یک گرم بر لیتر و حداکثر زمان تماس ۱۰ دقیقه، میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و میزان کدورت کاهش می‌یابد. پس از اختلاط ماده شیمیایی با فاضلاب، به همراه کنترل pH به کمک آهک، دما در اثر زمان ماند کاهش، و رنگ از فاضلاب در اثر فرایند اکسایش حذف می‌شود؛ مقدار COD موجود در فاضلاب از ۳۲۸۰ تا ۶۶۵۰ به ۱۱۹/۵ تا ۱۲۸ نیز کاهش می‌یابد. زمان ماند در حوضچه اکسایش ۱۲ ساعت بوده است؛ در این فاصله پس از کاهش دما و کنترل pH، مجدداً فاضلاب با دبی ۰/۷۵ مترمکعب بر ساعت به حوضچه هوادهی به روش لجن فعال به حجم ۱۲ مترمکعب تزریق می‌شود. با حذف بقیه عوامل آلاینده در پساب در مرحله دوم، میزان COD فاضلاب به کمتر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد [۱۸].

## ۵.۵ اکسایش

اکسایش و فوتو اکسایش در رنگ‌بری از پساب‌ها، روش‌های مؤثری‌اند. با توجه به کاربری آسان و هزینه کم، این روش‌ها در حجم‌های بزرگ قابل استفاده‌اند و به فضای بزرگی نیاز ندارند؛ غالباً لجن تولید نمی‌کنند و محیط زیست را به مخاطره نمی‌اندازند. در اکسایش، شامل اکسایش شیمیایی و اکسایش‌های ترکیبی، حذف آلودگی‌ها به وسیله مواد اکسیدکننده انجام می‌شود. اکسایش‌های ترکیبی که روش‌های مؤثرتری‌اند، از طریق بهره‌گیری از پرتو فرابنفش به همراه اکساینده‌ای چون ازون، کلراید، و پتاسیم پرمنگنات انجام می‌شود. روش‌های اکسایش برای حذف کامل یا قسمتی از رنگ‌های موجود در پساب، معمولاً برای فرایندهایی رنگ‌بری به کار گرفته می‌شوند که به مدت زمان کوتاهی نیاز دارند. اکسایش کامل رنگ‌ها تا تشکیل کربن‌دی‌اکسید و آب ادامه می‌یابد. از جمله روش‌های گوناگون فرایند اکسایش آلاینده‌های موجود در پساب، روش نوری در حضور کاتالیست‌ها، روش‌های اکسایش در دما و فشار بالا، روش‌های الکتریکی، استفاده از ترکیبات اکساینده مانند پتاسیم پرمنگنات، آب اکسیژنه، تابش پرتو فرابنفش، گاز کلر و گاز ازون، و یا ترکیبی از این اکساینده را می‌توان نام برد. در جدول (۴) مشخصه‌ها و مزایا و معایب برخی اکساینده‌های مصرفی در تصفیه و رنگ‌بری پساب درج شده‌اند. فرایند اکسایش آلاینده‌ها به تنهایی برای مقدار کم پساب و غلظت زیاد آلاینده مناسب است. اکساینده‌ها معمولاً گونه‌های موجود در محلول را بدون گزینش اکسید می‌کنند. بیشتر اکسیدکننده‌ها گران‌اند [۲۵].

## ۵.۶ روش فنتون

اکسایش شیمیایی به روش فنتون یکی از روش‌های مؤثر در حذف مواد رنگزا از آب‌های آلوده است. در روش فنتون، با واکنش یون آهن با هیدروژن پراکسید در محیط اسیدی رادیکال هیدروکسید، یک اکساینده بسیار قوی تولید می‌شود. رادیکال هیدروکسید به سرعت و به صورت غیر انتخابی به ساختار آلی حمله و ترکیبات آلی را به آب، کربن دی‌اکسید و یون‌های معدنی تبدیل می‌کند. در خلال این واکنش‌ها، یون‌های فرو به یون آهن سه ظرفیتی، فریک، اکسید می‌شود. به نظر می‌رسد روش فنتون می‌تواند جایگزین خوبی برای سیستم‌های قدیمی تصفیه پساب صنایع نساجی مانند لخته‌سازی

جدول ۴. اکساینده‌های مورد مصرفی در تصفیه و رنگبری از پساب [۲۵].

مشخصات	پتانسیل (v)	اکساینده
تولید بالای لجن، در حجم‌های بالا فاقد توجه اقتصادی	۱/۵	پتاسیم پرمنگنات
هزینه کم، تولید آلودگی با پایه کلرین، اثر خوردگی روی تجهیزات فولادی، غیراقتصادی برای حجم‌های بالا	۱/۳۶	کلر
مناسب برای آب‌های با غلظت کم آلودگی	-	تابش UV
واکنش انتخابی با ازون و غیر انتخابی با رادیکال هیدروکسیل تولید شده، لزوم تولید در مکان مصرف، امکان بازیافت ازون مصرف نشده	۲/۰۷	ازون
حلالیت بالا در آب، تجزیه در محیط، ضرورت تجهیزات مناسب برای انبار کردن	۱/۷۷	هیدروژن پراکساید
سرعت اکسایش بالا، بازده بالا، کاهش زیاد COD و TOC نسبت به سایر روش‌ها	۲/۸	رادیکال هیدروکسیل

مشکل زیست محیطی ایجاد نمی‌کند. قیمت بالای آب اکسیژنه، و جمع‌آوری و بازیابی یون آهن پس از اتمام واکنش که به عنوان کاتالیست به کار می‌رود، از معایب اصلی این روش به‌شمار می‌آیند. بسیاری از پژوهشگران، استفاده از روش فنتون را برای تصفیه پساب‌های بسیار آلوده مانند پساب‌های نساجی پیشنهاد کرده‌اند [۲۵].

متفاوت انتخاب می‌شود و با توجه به نوع الکتروود انتخاب شده، pH بهینه متفاوت خواهد بود [۲۱]. الکتروودهای به‌کار رفته در این فرایند معمولاً از جنس آلومینیم و آهن هستند [۲۸، ۲۶، ۲۷، ۲۱]. جعفرزاده و دانشور (۱۳۸۵) تصفیه پساب نساجی حاوی مواد رنگزای بازی را با بهره‌گیری از روش انعقاد الکتریکی بررسی کرده‌اند. انعقاد الکتریکی و استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی از روش‌های مؤثر جهت تصفیه پساب‌های صنایع رنگرزی است. در انعقاد الکتریکی، با برقرار کردن جریان برق بین دو یا چند الکتروود شناور فلزی از جنس آهن و یا آلومینیم در نمونه فاضلاب، لخته‌های هیدروکسید فلزی تولید می‌شوند که با جذب سطحی مواد آلاینده باعث ترسیب آن‌ها و تصفیه فاز آبی می‌شوند. جعفرزاده و دانشور تصفیه پساب رنگی حاوی مواد رنگزای بازی شرکت پشم و پتوی نقش جهان تبریز را با استفاده از روش انعقاد الکتریکی بررسی کرده‌اند. تأثیر چگالی جریان الکتریکی و زمان کنترل‌لیز در یک واکنشگاه ناپیوسته و با استفاده از الکتروودهای آهن ارزیابی شده است. نتایج آزمایش‌ها برای ۲۵۰ میلی‌لیتر پساب، با برقراری جریان‌هایی با شدت ۸۰ تا ۹۰ آمپر بر مترمربع و زمان الکتروولیز ۸ دقیقه، حذف ۹۴ درصد شدت رنگ و ۸۲ درصد میزان COD پساب را نشان می‌دهد. تحت شرایط یاد شده، توان الکتریکی مورد نیاز حدود ۱/۲ کیلو وات ساعت بر مترمکعب و شدت جریان مؤثر حدود ۱۰۳٪ محاسبه شده است [۲۸]. مسعودی‌نژاد و همکارانش (۱۳۹۲) کارایی فرایند انعقاد الکتریکی را در حذف رنگ از فاضلاب صنایع نساجی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که کارایی حذف رنگ و COD به میزان تولید یون‌های الکتروود به‌کار گرفته شده بستگی

شود، زیرا با این روش می‌توان COD و TOC پساب‌هایی را که با روش‌های زیستی قابل تخریب‌اند، کاهش داد. یکی از مزایای مهم روش فنتون فقدان خطرات زیست‌محیطی آن است، زیرا آهن به کار رفته غیر سمی و در دسترس است و آب اکسیژنه مصرفی مشکل زیست محیطی ایجاد نمی‌کند. قیمت بالای آب اکسیژنه، و جمع‌آوری و بازیابی یون آهن پس از اتمام واکنش که به عنوان کاتالیست به کار می‌رود، از معایب اصلی این روش به‌شمار می‌آیند. بسیاری از پژوهشگران، استفاده از روش فنتون را برای تصفیه پساب‌های بسیار آلوده مانند پساب‌های نساجی پیشنهاد کرده‌اند [۲۵].

#### ۵. ۷. انعقاد الکتریکی

روش انعقاد الکتریکی از سال ۲۰۰۰ برای حذف بسیاری از مواد محلول و غیر محلول به‌کار گرفته شده است. در سال‌های اخیر، این فرایند با توجه به این که مؤثر، مقرون به صرفه و دوستدار محیط‌زیست است بسیار مورد توجه قرار گرفته است. فرایند انعقاد الکتریکی در کاهش نیترات، آرسنیک، فلوراید، مواد آلی و مواد معدنی به کار رفته است و بازده حذف آن برای برخی آلاینده‌ها تا ۹۰ درصد گزارش شده است [۲۱]. این روش به دلیل برخورداری از مزایایی چون بازده بالای حذف، لجن دفعی اندک، زمان ماند کوتاه، هزینه کم و زمان کوتاه راه‌اندازی، تجهیزات ساده، بهره‌برداری آسان و عدم نیاز به مواد شیمیایی ویژه برای فاضلاب‌های قوی و سمی بسیار مناسب است [۲۶، ۲۱]. با توجه به نوع آلاینده‌ی هدف، جنس الکتروودها که یکی از مهم‌ترین عوامل در تصفیه به‌شمار می‌آید،



دارد و این میزان به شدت جریان و زمان الکترولیز وابسته است و در زمان طولانی تر و پتانسیل بیشتر بازده حذف رنگ افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش میزان مصرف انرژی افزایش می‌یابد به طوری که در زمان واکنش ۶۰ دقیقه و شدت جریان‌های ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ آمپر میزان مصرف انرژی به ترتیب، ۵/۱۳، ۳۷/۵ و ۶۵/۶۲ کیلووات بر مترمکعب بوده است [۲۷].

#### ۵. ۸. ازون زنی و پرتو دهی فرابنفش برای تصفیه پساب حاوی مواد رنگزای واکنش پذیر

گندزدایی پساب به منظور باز مصرف، اغلب با استفاده از عوامل شیمیایی و پرتو دهی صورت می‌گیرد. با توجه به افزایش آگاهی در خصوص معایب بهره‌گیری از گندزداهای شیمیایی، انتخاب روش پرتو دهی مورد استقبال قرار گرفته است. پرتو فرابنفش عامل شناخته شده‌ای است و تصفیه‌خانه‌هایی در اروپا و آمریکای شمالی پرتو تابانی با نور فرابنفش را به عنوان مرحله اصلی گندزدایی برگزیده‌اند و به طور کلی فناوری برتری برای انجام گندزدایی آب و فاضلاب محسوب می‌شود. در بهره‌گیری از پرتو فرابنفش، مواعی وجود دارد. مثلاً کدورت، مواد معلق، رنگ، مواد کلوییدی و آلی محلول به عنوان پناهگاه باکتری عمل می‌کنند و از سوی دیگر سبب پراکندگی و جذب پرتو می‌شوند که از شدت پرتو و بازده حذف آن می‌کاهد. همچنین، رسوب ایجاد شده بر روی دیواره لامپ، موجب کاهش عمر و قدرت لامپ می‌شود [۲۹]. ازون زنی نیز از جمله روش‌های اکسایش است که می‌تواند مواد آلی موجود در پساب را بسیار سریع و بدون تولید لجن اکسید کند [۳۰]. ازون زنی به خاطر پتانسیل بالای ازون در اکسایش و تبدیل اجزای سخت تجزیه‌پذیر به کربن‌دی‌اکسید و ترکیبات تجزیه‌شدنی زیستی به طور گسترده در تصفیه آب و فاضلاب مصرف می‌شود. ازون، علاوه بر حذف آلاینده‌های آلی و غیر آلی توانایی بسیار زیادی در حذف رنگ و بو دارد و بر خلاف سایر روش‌ها، پسماند و لجنی از خود باقی نمی‌گذارد. با توجه به خواص متغیر و پیچیده شیرابه، معمولاً به مقادیر زیادی ازون و زمان طولانی تماس برای انجام واکنش زیاد است که باعث غیراقتصادی شدن فرایند و محدودیت کاربرد این روش می‌شود [۳۱]. تهرانی بقا و نیک‌کار (۱۳۹۳) تصفیه پساب‌های نساجی شبیه‌سازی شده با فرایندهای اکسایش پیشرفته

بر پایه ازون زنی و پرتو دهی فرابنفش را به طور انفرادی و ترکیبی بررسی کرده‌اند. به این منظور، دو منبع نوری فرابنفش کم فشار و با فشار متوسط، به کار بردند و اثر هر یک را به تنهایی و در ترکیب با فرایند ازون زنی بر روی سه رنگزای واکنش پذیر مرسوم آبی ۴، قرمز ۴۵ و نارنجی ۱۴ معین شده است. نتایج نشان می‌داد پرتو دهی فرابنفش با بهره‌گیری از لامپ‌های کم فشار و فشار متوسط، باعث افزایش بازده حذف COD و کل کربن آلی (TOC) پساب می‌شود. نیز، با استفاده از ترکیب فرایند ازون زنی و پرتو دهی فرابنفش صرف نظر از ساختار مواد رنگزا، رنگبری کامل ۱۰۰٪، حذف COD بیش از ۹۵٪ و حذف TOC به میزان ۵۶٪ امکان پذیر می‌شود [۳۰]. این فناوری گاهی آلودگی ثانویه و حجم لجن زیادی تولید می‌کند [۲۴].

#### ۵. ۹. تلفیق فرآیند انعقاد - لخته‌سازی و پرتو دهی با باریکه الکترونی

روش‌های الکتروشیمیایی و منعقدکننده‌ها نه تنها رنگ بلکه هم‌زمان BOD، COD، مواد معلق جامد و فلزات سنگین ایجاد می‌شوند را از فاضلاب حذف می‌کنند. در این روش‌ها لخته‌های سنگینی ایجاد می‌شوند که به راحتی ته‌نشین می‌شوند، و بازده بالایی در زلال‌سازی فاضلاب پدید می‌آورند. از سوی دیگر، پرتو دهی در تصفیه فاضلاب توجه زیادی را در سراسر دنیا به خود جلب کرده و از این روش می‌توان برای تصفیه موادی آلی که به سختی با روش زیستی تجزیه می‌شوند، استفاده کرد. به نظر می‌رسد تلفیق روش‌های انعقاد و الکترواکسایش با تابش پرتو، روش مؤثری در تصفیه فاضلاب است [۳۲]. پرتو دهی از جمله روش‌های جدید برای گندزدایی و تصفیه به‌شمار می‌آید. از قدیم با کشف خاصیت گندزدایی نور خورشید، استفاده از پرتوها مورد توجه بوده است ولی امروزه استفاده از پرتوهای یوننده، روشی نوین است که با توجه به قدرت نفوذ و کارایی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. پرتوهای مورد استفاده در تصفیه به دو دسته پرتوهای یوننده (شامل پرتو ایکس، گاما، باریکه الکترون، آلفا و بتا) و نایوننده (پرتو فرابنفش) تقسیم می‌شوند. تابش‌های یون‌ساز آب را پرتو کافت، الکترون‌های هیدراته، رادیکال آزاد OH و هیدروژن ایجاد می‌کنند، که خاصیت واکنش‌پذیری قوی آن‌ها سبب غیرفعال کردن ریزاندامگانها و تجزیه آلودگی‌ها می‌شود. پرتوهای یون‌ساز با دو سازوکار یون‌سازی و تحریک با محیط تبادل

از تابش گاما، بررسی کردند. نتایج نشان می‌داد الکترواکسایش تمام ذرات کلوییدی و رنگ اولیه موجود در محلول آبی را حذف می‌کند و تابش پرتو گاما، مواد باقی‌مانده را از بین می‌برد [۳۲].

#### ۵. بهره‌گیری از غشا

امروزه، از غشاهای نیمه تراوا در بسیاری از کاربردهای مربوط به تصفیه آب استفاده می‌شود. غشاها ورقه‌های باریک یا فیلم‌های سطحی طبیعی یا سنتزی دارای حفره‌اند که مولکول‌های کوچک را عبور می‌دهند و مولکول‌های بزرگ را گیر می‌اندازند. غشاها می‌توانند ذرات را تا محدوده ابعاد مولکولی یا یونی فیلتر کنند. محصولات غشایی حاوی حفره‌های نانومقیاس در سه دسته عناصر غشایی اسمز معکوس، نانوصافش و فراصافش طبقه‌بندی می‌شوند [۳۶].

#### ● اسمز معکوس

اسمز معکوس به عبور آب از یک غشای نیمه تراوا تحت فشار بالا و از طریق سازوکار انتشار محلول گفته می‌شود. بخش اصلی سامانه اسمز معکوس، یک غشای نیمه تراواست که بیش از ۹۹ درصد از ذرات نامحلول را حذف می‌کند. غشاهای اسمز معکوس در دو مدل "میزان دفع استاندارد" یا "میزان دفع بالا" یافت می‌شود. فشار عملیاتی غشاهای اسمز معکوس ۱۵ تا ۱۰۰ بار است [۳۶]. در روش اسمز معکوس ضمن نیاز به فرایند پیش تصفیه هزینه فرایند نسبت به سایر روش‌ها بسیار گزاف است [۱۱].

#### ● نانوصافش

غشاهای نانوصافش امکان عبور نمک، آب و مولکول‌های آلی با وزن مولکولی پایین‌تر از ۲۰۰ را فراهم می‌آورند. از آنجا که وزن مولکولی ۲۰۰ معادل با یک مولکول بزرگ با اندازه یک نانومتر است، این غشاها به غشاهای نانوصافش معروف شدند [۳۶]. امروزه غشاهای نانوصافش به دلیل عبور دادن آب و یون‌های تک ظرفیتی (مانند یون‌های حاصل از NaCl) توجه بسیار زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این غشاها دسته‌ای از غشاهای لایه مرکب نازک هستند که عملکرد آنها بین غشاهای اسمز معکوس و فراصافش قرار دارد. برخی پژوهشگران در تحقیقاتشان، نمونه‌های گوناگونی از عملکرد

انرژی می‌کنند. یون‌سازی در بافت زنده موجب ایجاد رادیکال‌های آزاد، تغییر ساختارهای مولکولی درون سلولی و در نهایت مرگ سلول می‌شود [۳۳]. رادیکال‌های آزاد می‌توانند با مواد شیمیایی موجود ترکیب شوند و مواد شیمیایی جدیدی را تشکیل دهند که برخی از آنها مانند بنزن و اکسیدهای چربی می‌توانند سمی باشند. علم هنوز تأیید نکرده است که غذاهای پرتو دهی شده اثر سوء دراز مدت برای سلامتی انسان ندارند. تردیدی که در تجاری کردن فرایند پرتو دهی وجود دارد، به جنبه‌های قانونی و ایمنی این فرایند، هزینه و تجهیزات مربوط می‌شود [۳۴]. در تحقیقی، انوری و همکارانش بازده حذف رنگ و کدورت پساب نساجی شبیه‌سازی شده را با تلفیق دو فرایند انعقاد-لخته‌سازی و پرتو دهی با باریکه الکترونی بررسی کرده‌اند. آزمایشها روی محلول رنگی تهیه شده از ده رنگ شامل: سه رنگ از هر یک از گروه‌های اصلی پاشنده، کنشگر، مستقیم، و یک رنگ گوگردی از کارخانه نساجی یزدباف، انجام گرفته است. از آلوم به عنوان منعقدساز برای تعیین شرایط بهینه و حذف کدورت استفاده شده است. نمونه‌ها با شتابگر الکترونی ۱۰ MeV در مقادیر ۱، ۳ و ۶ کیلوگری پرتو دهی شد. نتایج نشان می‌دهد که در فرایند انعقادسازی با افزایش مقدار منعقدکننده آلوم، بازده حذف رنگ و کدورت افزایش می‌یابد و در مقدار ۱۱۲ ppm بازده حذف رنگ به ۶۴٪ و کدورت به ۹۰٪ می‌رسد. در ادامه تحقیق، این میزان به عنوان مقدار بهینه منعقدساز استفاده شده است. با شروع پرتو دهی بر اثر تخریب مولکول‌های بزرگ رنگ و تبدیل به ترکیبات آلی کوچکتر، شدت جذب در طول موج ۵۴۰ نانومتر به شدت کاهش یافته و با افزایش دوز تا ۳ کیلوگرم، بازده رنگ‌دایی به ۹۵ درصد رسیده است. در طول پرتو دهی، با تولید اسیدهای آلی به عنوان نوع اصلی محصولات واسطه موقتی، pH کاهش می‌یابد. نتایج تلفیق دو فرایند انعقاد-لخته‌سازی و پرتو دهی با الکترون‌های پر انرژی، حاکی از حذف بسیار مؤثر کدورت و رنگ‌دایی از محلول‌های رنگی است. در عین حال، با حذف ذرات معلق و رنگ‌های پاشنده در فرایند انعقادسازی، پرتو دهی قادر است ساختار مولکول‌های رنگ‌های محلول را تخریب کند و بازده حذف رنگ را به میزان چشمگیری افزایش دهد [۳۵]. در تحقیق دیگری، موسویان و رضایی (۱۳۸۳) فرایند تصفیه فاضلاب حاوی رنگ را با تلفیق الکترواکسایش و پرتو دهی با استفاده

پژوهش از فیلمهای کامپوزیتی نانوساختار تیتانیم دی اکسید به عنوان یک فوتوکاتالیست شاخص در تخریب و تجزیه آلاینده‌های زیست‌محیطی استفاده شده است. در این کار تحقیقاتی، سه نوع فیلم کامپوزیتی تیتانیم دی اکسید ساخته شده است که ذرات معلق پایداری از نانوپودرها به وسیله دستگاه فراصوت در تیتانیم دی اکسید، پخش و سپس به روش لایه نشانی چرخشی بر روی اسلایدهای شیشه‌ای پوشش داده می‌شود. فیلمهای کامپوزیتی حاصل، با غلظت و اسیدیته مشخص، بعد از به اشباع رساندن با گاز اکسیژن در معرض نور فرابنفش قرار می‌گیرند. از فیلمهای کامپوزیتی حاصل می‌توان برای تخریب برخی رنگینه‌های معروف پساب کارخانه‌های نساجی مانند رنگینه‌های متیل نارنجی، سولوفنیل قرمز، زرد روشن GX و تترترو آبی روشن استفاده کرد [۳۷].

#### ۵. ۱۲ کربن فعال

در تحقیقات پیشین، در خصوص تصفیه فاضلاب صنایع نساجی با استفاده از کربن فعال و کیتوزان نتایج مطلوبی گزارش شده است. فرایند تصفیه اولیه، نیاز به کنترل pH و تنظیم آن، یکی از دشواریهای عمده این روش به‌شمار می‌آید. نیز، در صورتی که غلظت ترکیب رنگی از حد مشخصی بیشتر شود. جاذب به سرعت اشباع می‌شود و نیاز به تعویض و احیای مجدد خواهد داشت و در نتیجه برای حجم‌های زیاد فاضلاب این روش مقرون به صرفه نخواهد بود [۲۵، ۱۱].

#### ۵. ۱۳ تبادل یونی

استفاده از روش تبادل کننده یونی برای فاضلاب‌های حاوی مواد نامحلول، بازده پایینی دارد. در این روش، تبادل کننده یونی نیاز به فعال‌سازی دائمی خواهد داشت و هم‌چون روش کربن فعال در حجم‌های زیاد مقرون به صرفه نیست.

#### ۵. ۱۴ الکتروشیمی

الکتروشیمی به منظور بهبود فرایند تصفیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده از این روش نشان می‌دهد که میزان COD کاهش اما میزان سختی و رسانش الکتریکی در پساب خروجی افزایش می‌یابد.

فاضلاب‌های رنگی توسط غشاهای نانوصافش مختلف را بررسی کرده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده، فرایند جداسازی رنگ‌هاها به کمک غشا را روشی امکان‌پذیر از نظر اقتصادی و تکنیکی دانسته‌اند [۲۵]. در این روش نیز، مشابه با بسیاری از روش‌های فیزیکوشیمیایی آلودگی‌های ثانویه و حجم لجن زیادی تولید می‌شود [۲۴]. فشار عملیاتی غشاهای نانوصافش ۱۰ تا ۴۰ بار است [۳۶].

#### ● فراصافش

غشاهای فراصافش دارای حفره‌های ۱ تا ۱۰۰ نانومتری‌اند. نمک‌ها و اجزای دارای وزن مولکولی پایین می‌توانند از غشای فراصافش عبور کنند و جامدات معلق بزرگ‌تر در سمت جریان ورودی باقی می‌مانند و تغلیظ می‌شوند. غشاهای فراصافش می‌توانند مولکول‌های زیستی، قندها، تانین‌ها، لیگنین‌ها، برخی مواد رنگی، رنگدانه‌های رنگ و جوهر، پشم شیشه، ویروس‌ها، باکتری‌ها، عناصر قابل اشتعال، اندوتوکسین‌ها، اسپارها و ذرات کلوئیدی را جدا کنند. این غشاهای نمی‌توانند یون‌ها را از آب جدا کنند. فشار عملیاتی غشاهای فراصافش ۲ تا ۷ بار است [۳۶].

#### ۵. ۱۱ نانوذرات فوتوکاتالیستی

تیتانیم اکسید و روی دو نانوذره فوتوکاتالیستی فراوان، ارزان و با سمیت پایین‌اند و قابلیت آنها در حذف آلاینده‌های آلی از محیط‌های مختلف در حال بررسی است. نانوذرات اکسید روی می‌توان به عنوان یک فوتوکاتالیزور، فنول‌های کلردار را به خوبی تصفیه کنند. از نانوذرات تیتانیم دی اکسید هم در ضد عفونی کردن آب و یا دفع آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی و فاضلاب‌های حاوی آلاینده‌های آلی و معدنی بهره برد. هم‌چنین، از این نانو ذرات در تصفیه برخی فاضلاب‌های صنعتی مانند رنگریزی منسوجات، پالایشگاه‌ها، معادن و چرم‌سازی‌ها می‌توان بهره گرفت [۳۶]. نصر اصفهانی و حبیبی با تولید نانو ذرات فوتوکاتالیستی روش جدیدی برای رفع آلودگیهای ناشی از رنگهای نساجی ارائه کرده‌اند. بهره‌گیری از نانوفوتوکاتالیستها به منظور بهره برداری همزمان از ناحیه فرابنفش نور خورشید (یک منبع انرژی همیشگی) و کوچک شدن ذرات در حد نانومتر به عنوان کاتالیزور در بسیاری از واکنشهای شیمیایی همواره مورد توجه است. از این رو در این

## ۶. نتیجه‌گیری کلی

فرایند رنگ‌رزی و تکمیل بیشترین میزان آلودگی را به پساب صنعت نساجی وارد می‌کند. در صنعت نساجی به ازای رنگ‌رزی و تکمیل هر کیلو الیاف در حدود ۳۰ الی ۶۰ لیتر پساب تولید می‌شود. حضور هم‌زمان مواد رنگ‌زا و فاضلاب انسانی سبب می‌شود که هر یک از روش‌های زیستی و روش‌های شیمیایی به تنهایی مؤثر واقع نشوند. به طور کلی، ترکیبی از فرایند زیستی و یکی از روش‌های شیمیایی مانند انعقاد و لخته‌سازی، اکسایش، روش فنتون، انعقاد الکتریکی، و روش‌های دیگر می‌تواند در حذف آلاینده‌ها مفید باشد. در جدول (۵) انواع کلی روش‌های تصفیه فاضلاب صنایع نساجی به همراه مزایا و

معایب آن را درج کرده‌ایم. استفاده از روش‌های نانو، کربن فعال، اسمز معکوس، الکتروشیمی، تبادل یونی، غشاهای نانوصافش، و ازون‌زنی و دیگر روش‌ها به دلیل مشکلات عملیاتی و هزینه بر بودنشان، علی‌رغم بازدهی بالا در حذف آلاینده‌ها در تصفیه فاضلاب نساجی چندان مرسوم نیستند.

## ۷. سپاسگزاری

مؤلفان این مقاله از مدیریت محترم شرکت نساجی نور پایتخت که در انجام این پژوهش کمک زیادی کردند، سپاسگزاری می‌کنند.

جدول ۵. انواع کلی روش‌های تصفیه فاضلاب صنایع نساجی.

روش تصفیه	مزایا	معایب
تصفیه زیستی	ارزان، ساده و با کارایی مناسب	وابسته به شرایط محیطی، نیاز به زمان ماند طولانی، کاهش بازده با افزایش سمیت
منعقدکننده‌های معدنی	بازده حذف بالا	تولید لجن زیاد، محدودیت در مقدار باقی‌مانده منعقدکننده در پساب، نیاز به انبار ذخیره و نگهداری منعقدکننده
اکسایش	کاربری آسان، کم هزینه، قابل استفاده در حجم‌های بزرگ، عدم نیاز به فضای بزرگ، عدم تولید لجن در اغلب موارد، دوستدار محیط زیست	عدم گزینش پذیری آلاینده در واکنش اکسایش، هزینه گزاف و غیر اقتصادی
روش فنتون	بدون ایجاد مخاطرات زیست‌محیطی	بهای گزاف آب اکسیژنه، نیاز به جمع‌آوری و بازیابی یون آهن پس از پایان واکنش
انعقاد الکتریکی	بازده بالای حذف، لجن دفعی اندک، زمان ماند کوتاه، هزینه و زمان کوتاه راه‌اندازی، تجهیزات ساده، بهره‌برداری آسان و عدم نیاز به مواد شیمیایی	مصرف انرژی زیاد، به خصوص در هنگام نیاز به درصد حذف بالا
پرتودهی	سریع، مناسب برای تصفیه مواد آلی که به سختی با روش زیستی تجزیه می‌شوند	مواد کلوبیدی و آلی محلول سبب کاهش پراکندگی، جذب پرتو و بازده می‌شود، رسوب ایجاد شده بر روی دیواره لامپ موجب کاهش عمر و قدرت لامپ می‌شود
غشا	بازده بالا	نیاز به فرایند پیش‌تصفیه، بسیار پرهزینه، تولید آلودگی‌های ثانویه و لجن زیاد، نیاز به ایجاد فشار بالا
کربن فعال و تبادل یونی	بازده بالا	نیاز به فرایند پیش‌تصفیه، نیاز به کنترل و تنظیم pH، اشباع سریع جاذب و نیاز به احیا و تعویض مکرر در غلظت‌های بالای رنگ، نامناسب برای حجم‌های بالا

- [1] Merouani. S., Hamdaoui. O., Saoudi. F., Chiha. M., "Sonochemical degradation of rhodamine B in aqueous phase: Effects of additives", *Chemistry Engineering Journal*, 550-557, (2010).
- [2] Mahmoodi. N. M., Arami. M., "Bulk phase degradation of acid red 14 by nano photocatalysis using immobilized titanium (IV) oxide nano particles", *Journal of Photochemistry Photobiology A: chemistry*, (182): 60-66, (2006).
- [3] Kaslech. Y., Perkowski. M., "Decoloration of real textile wastewater with advanced oxidation processes", *J. Fiber & Textile in eastern Europe*, 11(4): 81-86, (2003).
- [4] Lourenco. N., Novais. J. M., "Effect of operational parameters on textile dye biodegradation in a sequential batch reactor", *Journal Bio Technology*, 89: 163-174, (2001).
- [5] Shi. B., Li. G., Wang. D., Feng. C., Tang. H., "Removal of direct dyes by coagulation: the performance of preformed polymeric aluminum species", *Journal of Hazardous Material*. 143(1-2): 567-574, (2007).
- [6] Saquib. M., Muneer. M., "TiO<sub>2</sub>-mediated photocatalytic degradation of a triphenylmethane dye. (Gentian violet), in aqueous suspensions", *Dyes Pigments*, (56): 37-49, (2003).
- [7] قانعیان، م. ت.، حوائجی، ز.، «مقدمه‌ای بر مدیریت فاضلاب صنایع نساجی»، نشر مرکز آموزش و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۸۸).
- [8] حمیدیان، ا. ح.، «بررسی فاضلاب‌های کارخانجات شهر صنعتی سمنان و ارائه بهترین روش تصفیه (با مقایسه سایر روش‌های تصفیه فاضلاب)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).
- [9] رحمانی، ز.، غلامی، م.، «بررسی کمی و کیفی فاضلاب صنایع نساجی واقع در منطقه ۲۱ تهران بزرگ و مقایسه پساب آن با استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست در سال ۱۳۸۹»، دو ماهنامه سلامت کار ایران، دوره ۱۰، شماره ۴، مهر و آبان (۱۳۹۲).
- [۱۰] سازمان حفاظت محیط زیست، «استانداردهای خروجی فاضلاب»، ماده ۵ آیین‌نامه جلوگیری از آلودگی آب مورخ ۷۳/۹/۵.
- [۱۱] حمیدیان، ا. ح.، دالوند، م.، «مروری بر اثرات زیست محیطی و آلاینده‌های صنایع نساجی (بخش اول)»، نشریه علمی تخصص صنعت نساجی و پوشاک، صفحه ۸۰، (۱۳۹۲).
- [۱۲] مجنونیان، ه.، میرابزاده، پ.، دانش، م.، «راه‌نما ارزیابی پیامدهای توسعه به محیط زیست (دستورالعمل ارزیابی طرح- های توسعه بخشی، انرژی و صنعت)». سازمان حفاظت محیط زیست. صفحات ۳-۶، (۱۳۸۳).
- [۱۳] بوکایف، پ. ت.، ترجمه طاهری عراقی، ا.، «تکنولوژی عمومی صنعت نساجی پنبه‌ای»، نشر آقا بیگ، ۳۱۴ صفحه، (۱۳۶۹).
- [۱۴] پیرصاحب، م.، شرفی، ک.، درگاهی، ع.، «تصفیه‌پذیری فاضلاب صنایع نساجی با استفاده از منعقدکننده‌های معدنی»، مجله تحقیقات علوم پزشکی زاهدان، (۱۳۹۱).
- [۱۵] امامی، ف.، تهرانی بقا، ع.، «مطالعه‌ای بر روش‌های اکسایش تصفیه پساب نساجی»، مجله شیمی نساجی، شماره ۹۶، صفحات ۴۲-۴۵ و شماره ۹۷، صفحات ۵۸-۶۰، (۱۳۸۹).
- [16] Tunc. M.S., Yilmaz. L., Yetis. U., Culfaz-Emecen. P. Z., "Purification and concentration of caustic mercerization wastewater by membrane processes and evaporation for reuse", *Separation science and thechnology*, 49(13), 1968-1977, (2014).
- [17] Wang, Z., Xue, M., Huang, K., Liu, Z., "Textile dyeing wastewater treatment advanced in treating textile effluent", Prof. Peter Hauser (Ed).
- [۱۸] مسعودی‌نژاد، م.، رضازاده آذری، م.، «کاهش شاخص‌های آلودگی فاضلاب صنایع نساجی به منظور امکان تصفیه بیولوژیک آن»، فصلنامه دانش میکروبی شناسی، سال اول، شماره ۱، زمستان (۱۳۸۷).
- [۱۹] برقی، م.، حسنی، ا.، شریفی، ر.، «بررسی عملکرد سیستم تصفیه بیولوژیکی با بستر متحرک (MBBR) در تصفیه فاضلاب نساجی»، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره سیزدهم، شماره یک، تابستان (۱۳۹۰).
- [۲۰] جنیدی جعفری، ا.، عزیزی، ص.، «بررسی مقایسه‌ای کارایی حذف رنگ (دیسپرس آبی ۵۶) از فاضلاب سنتتیک با استفاده از آلوم و فریک‌کلر»، یازدهمین همایش ملی بهداشت محیط- زاهدان، (۱۳۸۷).
- [۲۱] ایزانلو، ح.، محسنی، س. م.، نظری، ش.، سرخوش، م.، علیزاده متبوع، س.، «کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی در کاهش کدورت از آب»، مجله سلامت و بهداشت. دوره پنجم، شماره اول، صفحات ۶۷ تا ۷۴، (۱۳۹۳).
- [22] Sadeddin. K., Firas. A., "Removal of turbidity and suspended solids by electro-coagulation to improve feed water quality of reverse osmosis plant", *Desalination*, 268 (1): 204-207, (2011).
- [۲۳] جمالی، ح. ع.، «ارائه روش بهینه تصفیه فاضلاب صنایع نساجی»، مجله دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی قزوین، شماره ۲۹، (۱۳۸۲).

- [۲۴] قدرتی، س.، موسوی، س. غ.، «بهینه‌سازی فرایند انعقاد الکتریکی در تصفیه فاضلاب نساجی با استفاده از روش سطح پاسخ»، مجله سلامت و محیط، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران، دوره هفتم، شماره دوم، صفحات ۲۳۹-۲۵۲، (۱۳۹۳).
- [۲۵] حمیدیان، ا. ح.، دالوند، م.، «اثرات زیست محیطی و آلاینده‌های صنایع نساجی؛ بخش دوم: روش‌های کنترل آلودگی‌های موجود در پساب صنایع نساجی»، نشریه علمی تخصص صنعت نساجی و پوشاک، صفحه ۷۹، (۱۳۹۲).
- [۲۶] رضوی، م.، سعیدی، م.، جباری، ا.، «پساب رختشوی خانه با استفاده از روش انعقاد الکتریکی با الکتروود آلومینیم»، محیط‌شناسی، شماره ۳، صفحات ۷۵-۸۴، (۱۳۹۱).
- [۲۷] مسعودی‌نژاد، م. ر.، یزدانبخش، ا. ر.، شریفی ملکسری، ه.، «بررسی کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف رنگ از فاضلاب صنایع نساجی پلی آکرلیک»، آب و فاضلاب، شماره ، صفحات ۴۰-۴۸، (۱۳۹۲).
- [۲۸] جعفرزاده، ن.، دانشور، ن.، «تصفیه پساب نساجی حاوی مواد رنگزای بازیگ به روش انعقاد الکتریکی»، آب و فاضلاب، شماره ۵۷، (۱۳۸۵).
- [۲۹] واعظی، ف.، بذرافشان، ا.، «پرتوتابی فرابنفش و کاربرد آن در گندزدایی آب و فاضلاب»، انتشارات اندیشمند، (۱۳۸۷).
- [۳۰] تهرانی بقا، ع. ر.، نیک‌کار، ح.، «مقایسه فرایندهای مختلف اکسایش پیشرفته بر پایه ازن‌دهی و پرتودهی فرابنفش برای تصفیه پساب حاوی مواد رنگزای واکنش‌پذیر»، مجله علوم و فناوری نساجی، سال چهارم، شماره ۱، صفحه ۳۵-۴۲، (۱۳۹۳).
- [۳۱] نصیری، ع.، مختارانی، ن.، گنجی دوست، ح.، «تصفیه تکمیلی شیرابه به وسیله‌ی ترکیب ازن‌زنی و جذب سطحی»، مجله علمی و پژوهشی عمران مدرس، دوره دوازدهم، شماره ۱، صفحات ۸۵-۱۳۶، (۱۳۹۱).
- [۳۲] موسویان، س. م.، رضایی، ع.، «تصفیه فاضلاب آلوده و حاوی رنگ زیاد صنایع به روش تلفیقی الکتروشیمیایی- تابش اشعه گاما»، چهارمین همایش سراسری بهداشت حرفه‌ای ایران، همدان، صفحات ۳۵۳-۳۶۲، (۱۳۸۲).
- [۳۳] هاشمی، ح.، بینا، ب.، امین، م. م.، عبدالهی، م.، «گندزدایی آب و پساب تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب اصفهان با استفاده از اشعه گاما»، سیزدهمین همایش ملی بهداشت محیط ایران، کرمان، (۱۳۸۹).
- [۳۴] «چه مقدار از غذای شما پرتودهی شده است؟»، ماهنامه سیاحت غرب، سال هفتم، شماره ۷۵، صفحه ۱۲۶، (۱۳۸۸). قابل دسترسی در: <http://www.magiran.com/magarchive.asp?mgID=3532>
- [35] Anvari. F., Kheikhah. M., Amraei. R., "Treatment of synthetic textile wastewater by combination of coagulation/flocculation process and electron beam irradiation", Journal of community health research. 2014, 3 (1) 31-38.
- [۳۶] عباسی، ع.، «فناوری نانو در تصفیه آب. به سفارش ستاد ویژه توسعه فناوری نانو»، (۱۳۹۱).
- [37] Nasr-Esfahani. M., Habibi. M. H., "Silver doped TiO<sub>2</sub> nanostructure composite photocatalyst film synthesized by sol-gel spin and dip coating technique on glass", Internationa Journal of Photoenergy. 2008. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2008/628713>