



فصلنامه علوم محیطی، دوره شانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷

۱۱۹-۱۳۴

به کارگیری فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی به منظور حذف رنگزا و بهینه سازی بر مبنای میزان انرژی مصرفی

پویا ارباب^۱، بیتا آیتی^{۱*} و محمدرضا انصاری^۲

^۱ گروه مهندسی عمران - محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۱

ارباب، پ.، ب. آیتی و م.ر. انصاری. ۱۳۹۷. به کارگیری فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی به منظور حذف رنگزا و بهینه سازی بر مبنای میزان انرژی مصرفی. فصلنامه علوم محیطی. ۱۶ (۳): ۱۱۹-۱۳۴.

سابقه و هدف: بسیاری از آلاینده‌های موجود در فاضلاب‌های صنعتی از قبیل رنگزاها به دلیل ماهیت پیچیده و مقاومشان به راحتی به وسیله فرآیندهای متداول تصفیه فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی قابل حذف نمی‌باشند. بنابراین دستیابی به یک فناوری تصفیه موثر که بتواند مولکول‌های مقاوم را بطور کامل تجزیه کرده و یا به مولکول‌های کوچکتر قابل تجزیه با فرآیندهای مرسوم تبدیل کند، امری ضروری به نظر می‌رسد. کاویتاسیون چنین تکنیک امروزی‌ای است که به دلیل قابلیت تولید رادیکال‌های آزاد با فعالیت بالا، به منظور شکست ترکیب‌های شیمیایی آلی و تجزیه آلاینده‌های مقاوم به تجزیه بیولوژیکی، مورد بررسی قرار گرفته است. کاویتاسیون هیدرودینامیکی، توانایی به کارگیری در مقیاس بزرگتر به دلیل قابلیت تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در شرایط محیطی با هزینه پایینتر در جهت به کارگیری اقتصادی‌تر را دارا است. هدف از این پژوهش به کارگیری کاویتاسیون هیدرودینامیکی به منظور تجزیه رنگزای راکتیو مشکی ۵ و بهینه سازی پارامترهای موثر بر فرآیند (pH، فشار ورودی، قطر روزنه و غلظت رنگزا) با توجه به میزان راندمان و انرژی مصرفی بود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش تجزیه رنگزای راکتیو مشکی ۵ به وسیله کاویتاسیون هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. ۸/۲۵ لیتر محلول رنگی در هر تست مورد آزمایش قرار گرفت. کاویتاسیون از طریق به کارگیری پمپ و صفحه روزنه‌دار تولید شد. به منظور بهینه‌سازی فرآیند، آزمایش‌های مختلف در pHهای ۳ الی ۱۱ و نیز با به کارگیری صفحه‌های با قطر روزنه مختلف ۲، ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر در فشارهای ۲، ۳، ۴ و ۵ بار و غلظت‌های رنگزای ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر انجام گرفت. با توجه به ولتاژ ثابت برق شهری، جریان الکتریکی به عنوان شاخصی برای انرژی مصرفی به وسیله آمپر متر مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

نتایج و بحث: با توجه به نتایج با کاهش pH، میزان رنگبری افزایش یافت و صفحه‌های روزنه‌دار با قطر روزنه بزرگتر در فشارهای بالاتر راندمان بهتری داشتند. مشاهده گردید که افزایش غلظت اولیه رنگ، سبب کاهش راندمان حذف شد. صفحه با روزنه ۷ میلی‌متر در فشار ورودی ۵ بار، بیشترین بازده را به دست داد ولی با در نظر گرفتن میزان انرژی مصرفی و با توجه به میزان بازده فرآیند به میزان مصرف انرژی، صفحه با قطر روزنه ۷ میلی‌متر و فشار ورودی ۴ بار به عنوان بهینه انتخاب شد. pH برابر با ۳، صفحه با روزنه به قطر ۷ میلی‌متر در

* Corresponding Author. E-mail Address: ayati_bi@modares.ac.ir

فشار ورودی ۴ بار و غلظت اولیه رنگزا برابر با ۳۰ میلی گرم بر لیتر (با توجه به میزان انرژی مصرفی پمپ از طریق اندازه‌گیری جریان الکتریکی و راندمان فرآیند) به عنوان شرایط بهینه در نظر گرفته شد. در این شرایط پس از ۱۲۰ دقیقه، میزان رنگبری برابر با ۳۸/۲۱ درصد به وسیله کاویتاسیون هیدرودینامیکی به دست آمد.

نتیجه‌گیری: کاویتاسیون هیدرودینامیکی، توانایی به کارگیری در مقیاس بزرگتر به دلیل قابلیت تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در شرایط محیطی را دارا است. مشخص شد که میزان مصرف انرژی عاملی تاثیر گذار در انتخاب شرایط بهینه بود. با کاهش غلظت اولیه رنگزا و pH، میزان حذف رنگ افزایش یافت و صفحه‌های روزنه‌دار با قطر روزنه بزرگتر در فشارهای بالاتر راندمان بهتری داشتند.

واژه‌های کلیدی: رنگزا، انرژی، کاویتاسیون هیدرودینامیکی، صفحه روزنه‌دار، فشار.

مقدمه

سمی و رنگی بودن زیاد می‌شود. در حدود ۱۰ الی ۲۰ درصد مواد رنگی در طول فرآیند ساخت و رنگرزی از دست می‌رود (Panbehkarbisheh and Ayati, 2015). رنگزاهای آلی^۲ سبب ایجاد مشکل‌های ژنتیکی، مسمومیت و سرطانزایی برای بشر شده و تخلیه مستقیم آن‌ها به محیط زیست بر روند طبیعی چرخه فتوسنتز^۳ اثر گذار است (Franco et al., 2017; Gupta et al., 2016). بنابراین دستیابی به یک فناوری تصفیه موثر که بتواند مولکول‌های مقاوم را بطور کامل تجزیه کرده و یا به مولکول‌های کوچکتر قابل تجزیه با فرآیندهای مرسوم تبدیل کند، امری ضروری به نظر می‌رسد.

روش‌های اکسیداسیون پیشرفته^۴، رویکردهای نوینی هستند که از طریق تولید رایکال‌های هیدروکسیل^۵ با فعالیت بالا قادر به اکسید کردن بیشتر ترکیب‌های آلی موجود در فاضلاب می‌باشند (Sahoo et al., 2012). روش‌های پیشرفته گوناگونی برای تصفیه آلاینده‌های آلی در طی سال‌ها از قبیل فنتون^۶، ازناسیون^۷، الکتروشیمیایی^۸، فتولیز^۹، فتوکاتالیز^{۱۰}، کاویتاسیون^{۱۱} (عمدتاً نوع آکوستیک^{۱۲}) و ترکیبات آن‌ها بررسی شده (Gharbani and Mehrizad, 2016; Papić et al., 2009; Saeid-Mohammadi et al., 2016; Panbehkarbisheh and Ayati, 2015; Ghoneim et al., 2011; Krishnakumar and Swaminathan, 2010; Sahoo et al., 2012; Asgari and Ayati, 2015; Gharibzadeh et

امروزه حفظ منابع آب، یعنی حیاتی‌ترین ماده‌ای که بشر به آن نیاز دارد به شکل فزاینده‌ای مورد توجه انجمن‌های مختلف بین‌المللی قرار گرفته است. رشد روز افزون جمعیت و در نتیجه بهره‌برداری بیش از حد از منابع محدود آب، از یک طرف و آلوده شدن آن‌ها به سبب فعالیت‌های گوناگون زیستی، کشاورزی و صنعتی بشر از طرف دیگر، همگی دست به دست یکدیگر داده و زنگ خطر بحران آب را در سال‌های آینده به صدا در آورده است. بنابراین حفظ کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی منابع آب سرلوحه فعالیت بیشتر سازمان‌هایی است که با اینگونه منابع سر و کار دارند. بسیاری از آلاینده‌های موجود در فاضلاب‌های صنعتی به راحتی به وسیله فرآیندهای متداول تصفیه فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی قابل حذف نمی‌باشند (Gharbani and Mehrizad, 2016). به دلیل پیچیدگی و ماهیت مقاوم این ترکیب‌ها، روش‌های بیولوژیکی قادر به تجزیه کامل نبوده و روش‌های فیزیکی و شیمیایی نیز سبب انتقال ترکیب‌ها از یک فاز به فاز دیگر و رویارویی با یک آلاینده جدید می‌شوند (Papić et al., 2009; Saeid-Mohammadi et al., 2016). روش‌های طبیعی مانند گیاه پالایی نیز با تولید میزان زیادی بیومس^۱ خطرناک همراه بوده که نیازمند مدیریت ثانویه می‌باشد (Avatefinezhad and Asrari, 2016).

در این میان می‌توان به پساب صنعت نساجی اشاره داشت که سبب مشکل‌های زیست محیطی جدی به دلیل

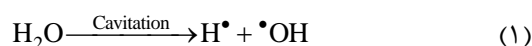
کاویتاسیون هیدرودینامیکی، هم به وسیله تجزیه حرارتی^{۱۹} توسط شکل‌گیری نقطه داغ ناشی از فروپاشی حفره‌ها و هم اکسیداسیون شیمیایی با گونه‌های فعال رادیکالی ایجاد شده انجام می‌گیرد (Raut-Jadhav *et al.*, 2013a) که در این میان رادیکال هیدروکسیل به‌عنوان مهمترین عامل اکسید کننده در فرآیند کاویتاسیون شناخته شده است (Aseev and Batoeva, 2014).

کاویتاسیون هیدرودینامیکی، توانایی به‌کارگیری در مقیاس بزرگتر به دلیل قابلیت تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در شرایط محیطی با هزینه پایینتر در جهت به‌کارگیری اقتصادی‌تر را دارا است (Gore *et al.*, 2014). تاکنون اکثر کارهای تحقیقی زیست محیطی، بر روی کاویتاسیون نوع آکوستیک به‌منظور تولید و به‌کارگیری حفره‌ها تمرکز داشته است (Gharbani and Mehrizad, 2016; Saeid-Mohammadi *et al.*, 2016; Madhavan *et al.*, 2010; Wang and Yuan, 2016). تنها به تازگی محققان شروع به تحقیق در زمینه راه جدید تولید حفره‌ها بنام کاویتاسیون هیدرودینامیکی نموده‌اند. بررسی‌های اندکی در زمینه به‌کارگیری کاویتاسیون هیدرودینامیکی به‌منظور تجزیه آلاینده‌های آبی گزارش شده است که در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود.

Parsa and Zonouzian (2013) تجزیه رنگزای رودامین بی (Rh B)^{۲۰} را مورد بررسی قرار داده و در غلظت ۵ میلی گرم بر لیتر، بازده ۱۰ درصد را پس از ۱۲۰ دقیقه، گزارش کردند. Raut-Jadhav *et al.* (2013b) ۲۵ میلی گرم بر لیتر حشره کش ایمیداکلوپرید^{۲۱} را به روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی پس از ۴۵ دقیقه حدود ۱۱ درصد حذف کردند. Gore *et al.* (2014) تجزیه راکتیو اورتج ۴ (RO4)^{۲۲} با استفاده از کاویتاسیون هیدرودینامیکی را بررسی و معدنی شدن حدود ۱۵ درصد پس از ۶۰ دقیقه را برای رنگزا با غلظت ۴۰ میلی گرم بر لیتر گزارش کردند. Bagal and

al., 2016; Asgari and Ayati, 2016; Franke *et al.*, 2011) که برخلاف موفقیت خوب در مقیاس آزمایشگاهی، در به‌کارگیری صنعتی به دلیل هزینه بالا و محدودیت‌های طراحی در مقیاس بزرگ، کم کاربرد می‌باشند (Gore *et al.*, 2014).

کاویتاسیون، رویکردی است که به دلیل قابلیت تولید رادیکال‌های آزاد با فعالیت بالا، به عنوان یک راهکار امید بخش در زمینه شکست ترکیب‌های شیمیایی آلی و تجزیه آلاینده‌های مقاوم به تجزیه بیولوژیکی، مطرح شده است (Bis *et al.*, 2015; Rajoriya *et al.*, 2016). کاویتاسیون به شکل‌گیری، رشد و به دنبال آن فروپاشی میکروحباب‌ها یا حفره‌ها که در فاصله زمانی بسیار کوچک (میلی ثانیه) همراه با آزادسازی میزان زیادی انرژی در محل فروپاشی اتفاق می‌افتد، اشاره دارد (Madhavan *et al.*, 2010; Gogate, 2011). ایجاد شده سبب شکل‌گیری محلی نقطه داغ^{۱۳} (با دمای حدود ۱۰,۰۰۰ کلوین و فشار ۱,۰۰۰ اتمسفر) شده که منجر به تفکیک مولکول‌های آب به گونه‌های فعال رادیکالی H^\bullet و OH^\bullet (معادله ۱) می‌شود (Saharan *et al.*, 2011; Wang and Yuan, 2016)

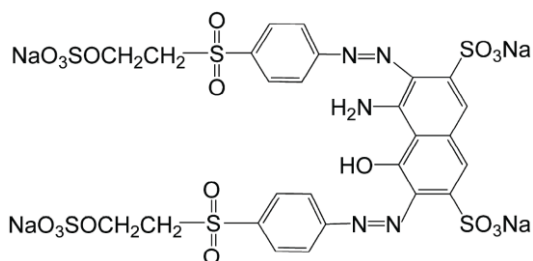


نوع هیدرودینامیکی^{۱۴} کاویتاسیون از طریق عبور مایع از میان تنگ شدگی‌ها از قبیل، صفحه‌های روزنه‌دار^{۱۵}، کانال‌های انحناء‌دار^{۱۶} و ونتوری^{۱۷} یا شیرهای محدود کننده^{۱۸} و همچنین حرکت اجسام در مایع توسط تجهیزات چرخنده به‌وجود می‌آید (Gogate, 2011). در کاویتاسیون هیدرودینامیکی، هنگامی که مایع از میان یک تنگ شدگی عبور می‌کند در گلوبی آن سرعت به یکباره با کاهش فشار، افزایش می‌یابد. هنگامی که فشار در گلوبی (تنگ شدگی) به زیر فشار بخار مایع در دمای عملکردی می‌رسد، کاویتاسیون اتفاق می‌افتد. حفره‌های ایجاد شده در پی آن هنگامی که فشار در پایین دست بهبود می‌یابد، دچار فروپاشی می‌شوند. تجزیه آلاینده‌های آلی از طریق

جدول ۱- ویژگی‌های عمومی راکتیو مشکی ۵

Table 1. Characteristics of RB5

نام Name	راکتیو مشکی ۵ (دی آزو) Reactive Black 5 (diazo)
نام معادل Synonym	ریمازول مشکی بی Remazol Black B
فرمول مولکولی Molecular formula	C ₂₆ H ₂₁ N ₅ Na ₄ O ₁₉ S ₆
وزن مولکولی (گرم بر مول) Molecular weight (g. mol ⁻¹)	991.82
شماره شاخص رنگ C.I. number	C.I. 20505
شماره کتاب شیمی C.B. number	CB0419426
رده کاربردی Application class	پارچه نخی Cotton
رده شیمیایی Chemical class	آزو Azo
شماره مخفف ثبت CAS registry number	17095-24-8
طول موج ماکزیمم جذب (نانومتر) $\lambda_{max}(nm)$	598



شکل ۱- ساختار شیمیایی راکتیو مشکی ۵

Fig. 1- RB5 chemical structure

ویژگی‌های پایلوت^{۲۰} آزمایشگاهی

تصویر واقعی و طرح الگو وار پایلوت آزمایشگاهی مورد استفاده، به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. این مجموعه به صورت یک مدار بسته با ظرفیت حجمی ۸/۲۵ لیتر شامل تانک^{۳۱} تغذیه، پمپ با توان ۱/۶ کیلو وات، گیج‌های فشار و شیرها بود. تانک مورد استفاده در این پژوهش از جنس استیل ضدزنگ با ژاکت حرارتی به منظور کنترل دما بود.

Gogate (2014) تجزیه دیکلوفناک سدیم^{۲۳} از طریق کاویتاسیون هیدرودینامیکی را بررسی کرده و برای غلظت ۲۰ میلی گرم بر لیتر آلاینده به ۲۷ درصد تجزیه دست یافتند. Sayyaadi (2015) به تجزیه حدود ۱۵ درصد در مدت ۶۰ دقیقه برای دوکلروفلن^{۲۴} با غلظت اولیه ۱۳ میلی گرم بر لیتر از طریق کاویتاسیون هیدرودینامیکی دست یافت. Rajoriya *et al.* (2017) به میزان تجزیه حدود ۳۲ درصد در مدت ۱۲۰ دقیقه برای رنگزای رودامین ۶جی^{۲۵} (Rh6G) با غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر از طریق کاویتاسیون هیدرودینامیکی دست یافتند. Wang *et al.* (2017) از طریق به کارگیری کاویتاسیون هیدرودینامیکی، تتراسایکلین^{۲۶} با غلظت اولیه ۳۰ میلی گرم بر لیتر را در مدت ۹۰ دقیقه به میزان ۱۲ درصد تجزیه کردند.

در پژوهش حاضر با به کارگیری کاویتاسیون هیدرودینامیکی از طریق صفحه روزنه‌دار در تجزیه رنگزای راکتیو مشکی ۵ (RB5)^{۲۷}، پارامترهای عملکردی در کاویتاسیون هیدرودینامیکی شامل قطر روزنه، فشار ورودی، pH و غلظت رنگزا با تاکید بر راندمان بالا بر مبنای میزان انرژی مصرفی بهینه‌سازی شد. دیگر تحقیق‌های انجام شده تنها راندمان را برای بهینه‌یابی ملاک قرارداده و انرژی مصرفی را در نظر نگرفته‌اند.

مواد و روش‌ها

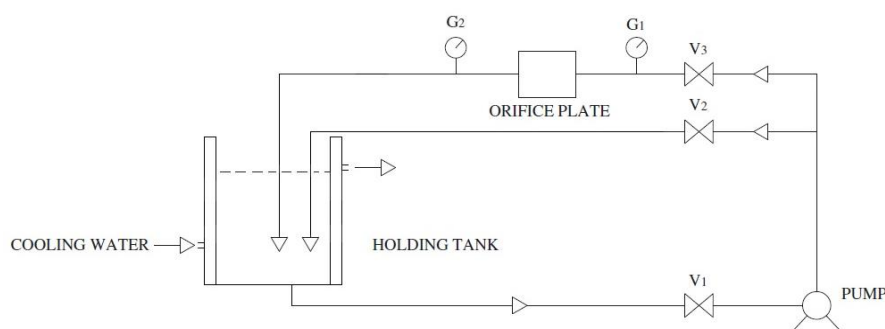
مواد

رنگزای نساجی راکتیو مشکی ۵ از شرکت نساج ثابت (ایران) خریداری و بدون خالص سازی بیشتر استفاده شد. ویژگی‌ها و ساختار شیمیایی این رنگزا در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است. اسید H₂SO₄ و باز NaOH برای تنظیم pHهای مورد نیاز از شرکت مرک^{۲۸} آلمان تهیه شد. گفتنی است از آب دیونیزه^{۲۹} برای آماده سازی محلول‌ها استفاده گشت.



شکل ۲- تصویر پایلوت آزمایشگاهی
Fig. 2- Hydrodynamic cavitation reactor

انتهای مخزن تغذیه به قسمت مکنده پمپ متصل و خروجی پمپ به دو شاخه جریان کنار گذر و دارای وسیله تولید کاویتاسیون تقسیم شد. در این تحقیق از صفحه روزنه‌دار به عنوان وسیله تولید کاویتاسیون استفاده و به منظور بررسی این فرآیند صفحه‌های با قطر روزنه ۲، ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر به کار برده شد. شاخه کنار گذر به منظور کنترل جریان عبوری از شاخه دارای وسیله تولید کاویتاسیون و شیرهای کنترلی ۱، ۲ و ۳ در قسمت ورودی پمپ، قبل از وسیله تولید کاویتاسیون و در شاخه کنار گذر در نظر گرفته شد. گیج‌های فشار ۱ و ۲ در قبل و بعد از وسیله تولید کاویتاسیون برای کنترل فشار ورودی و فشار پایین دست جریان تعبیه گردید.



شکل ۳- طرح الگو وار پایلوت آزمایشگاهی (V1, V2, V3: شیرهای کنترلی - G1, G2: گیج‌های فشار)
Fig. 3- Schematic representation of the experimental setup (V1, V2, V3: Control Valves - G1, G2: Pressure Gauges)

نظر با اضافه کردن رنگزای RB5 تهیه شد و پس از تنظیم pH با اضافه کردن H_2SO_4 یا NaOH وارد تانک شده، سپس پمپ روشن و از طریق شیر کنترلی مسیر کنار گذر میزان فشار ورودی به میزان مشخص رسانده شد. دمای محلول با استفاده از ژاکت حرارتی در میزان 30 ± 2 درجه سلسیوس ثابت و هر آزمایش به مدت ۱۲۰ دقیقه با فاصله نمونه‌گیری ۲۰ دقیقه‌ای انجام شد. میزان رنگبری بر مبنای معادله ۲ محاسبه گردید:

$$ED(\%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

که در آن ED^{۳۹}، میزان رنگبری بر حسب درصد، C_i و C_f ، غلظت اولیه و لحظه‌ای راکتیو مشکی ۵ در طول

دستگاه‌ها

از اسپکتروفتومتر^{۳۲} هج^{۳۳} مدل DR-4000 برای اندازه‌گیری میزان تجزیه محلول‌های RB5 با استفاده از کالیبراسیون در طول موج ماکزیمم ۵۹۸ نانومتر، pH متر^{۳۴} مدل 691 برای اندازه‌گیری pH نمونه‌ها، ترازوی کرن^{۳۵} مدل PLS360-3 با دقت ۰/۰۰۱ گرم برای توزین و آمپر متر هیوکی^{۳۶} مدل 3280-10 به منظور ثبت جریان مصرفی استفاده شد. پمپ ۱/۶ کیلو واتی پنتاکس^{۳۷} ایتالیا و گیج‌های فشار ویکتوری^{۳۸} در پایلوت به کار گرفته شد.

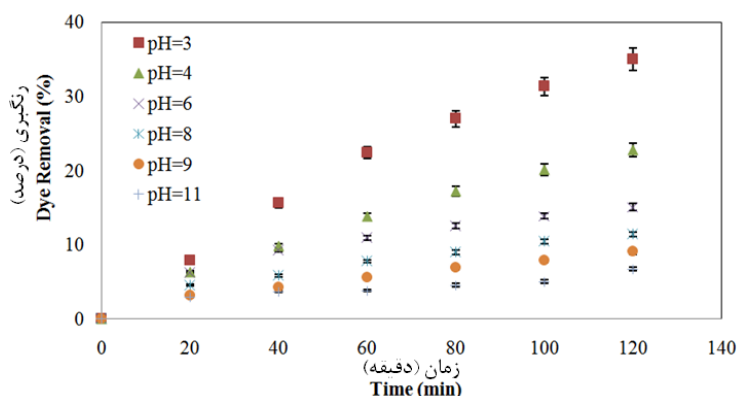
روش آزمایش

در هر آزمایش به میزان ۸/۲۵ لیتر محلول مورد

نتایج و بحث pH اولیه

برای بررسی اثر pH بر روی میزان تجزیه RB5 با استفاده از کایتاسیون هیدرودینامیکی، آزمایش‌هایی در سطح‌های مختلف pH از ۳ الی ۱۱ انجام شد. آزمایش‌های این مرحله با استفاده از صفحه روزنه دار با قطر ۵ میلی‌متر و در فشار ورودی ۴ بار و میزان رنگزا برابر با ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام گرفت. شکل ۴ میزان رنگبری را در سطح‌های مختلف pH در گذشت زمان نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، میزان رنگبری با تغییر pH از محدوده بازی به اسیدی افزایش یافته بطوریکه pH برابر با ۱۱ کمترین و pH برابر با ۳ بیشترین میزان رنگبری را به همراه داشت.

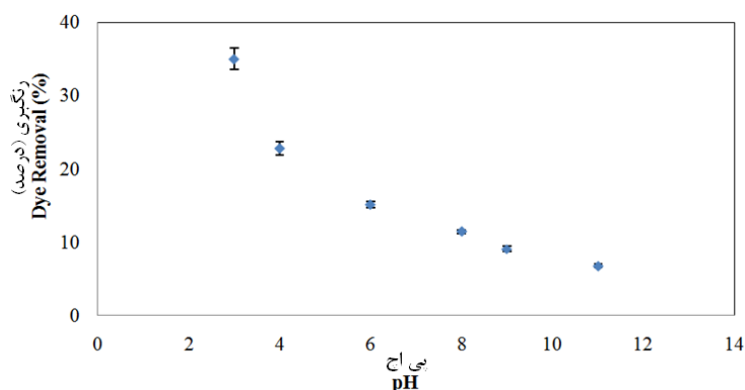
فرآیند است. در این تحقیق، فرآیند کایتاسیون مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای مختلف قطر روزنه (۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر)، فشار ورودی (۲، ۳، ۴ و ۵ بار)، pH (۳، ۴، ۶، ۸، ۹ و ۱۱) و غلظت (۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) آزمایش شد و سطح‌های بهینه به دست آمد. آزمایش‌ها به روش تک فاکتوریل (در هر مرحله یک پارامتر متغیر و بقیه پارامترها ثابت بود) انجام و همه تست‌ها حداقل دو بار تکرار شد (آزمایش‌های مربوط به pH هر کدام ۳ تکرار، آزمایش‌های قطر روزنه صفحه و فشار ورودی هر کدام ۴ تکرار و آزمایش‌های مربوط به غلظت اولیه رنگزا هر کدام ۲ تکرار) و خطای نتایج گزارش شده در محدوده ۵ درصد بود.



شکل ۴- رنگبری RB5 در سطح‌های مختلف pH در طول زمان

(غلظت اولیه رنگزا ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، صفحه با روزنه ۵ میلی‌متر، فشار ۴ بار)

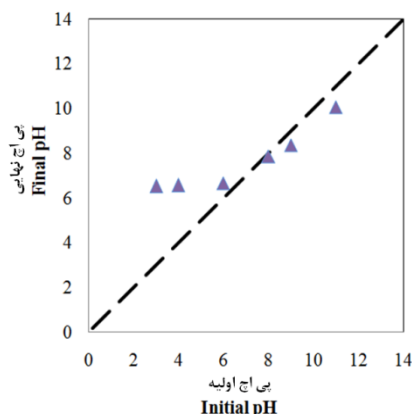
Fig. 4- Extent of dye removal for process at different levels of pH (dye concentration=30 mg/L , hole diameter=5mm, pressure=4 bar)



شکل ۵- میزان رنگبری در سطح‌های مختلف pH پس از ۱۲۰ دقیقه

(غلظت اولیه رنگزا ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، صفحه با روزنه ۵ میلی‌متر، فشار ۴ بار)

Fig. 5- Extent of dye removal for process at different levels of pH after 120 minutes (dye concentration=30 mg/L , hole diameter=5mm, pressure=4 bar)



شکل ۶- pHهای انتهایی واکنش برای سطح‌های pH اولیه (غلظت اولیه رنگزا ۳۰ میلی گرم بر لیتر، صفحه با روزنه ۵ میلیمتر، فشار ۴ بار)

Fig. 6- Final amounts of pHs after 120 minutes process at different levels of initial pH (dye concentration=30 mg/L, hole diameter=5mm, pressure=4 bar)

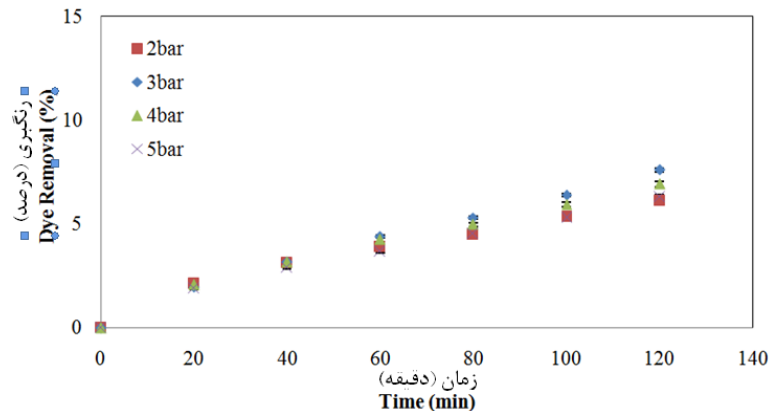
قطر روزنه صفحه و فشار ورودی

در این قسمت صفحه‌ها با قطر روزنه‌های مختلف در سطح‌های فشار متفاوت در شرایط pH برابر با ۸ (به علت تعداد زیاد آزمایش‌های این بخش برای پایین آوردن ریسک خوردگی پمپ و لوله‌های ارتباطی، بررسی‌های این قسمت در pH برابر با ۸ (pH طبیعی رنگ) بجای pH بهینه به دست آمده ۳، انجام شد) و غلظت رنگزا ۳۰ میلی گرم بر لیتر به مدت ۱۲۰ دقیقه تحت آزمایش قرار گرفت. نتایج در شکل‌های ۷ الی ۱۰ به ترتیب برای صفحه‌های با قطر روزنه ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ میلیمتر نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، در صفحه با روزنه ۲ میلیمتر با افزایش فشار، بازده فرآیند ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است به طوری که در فشار ۳ بار بیشترین بازده به میزان ۷/۶۱ درصد به دست آمد. در صفحه‌های با روزنه ۳ و ۵ میلیمتر نیز روند مشابه بود با این تفاوت که بیشترین بازده در فشار برابر با ۴ بار به ترتیب به میزان ۸/۰۹ و ۱۱/۴۱ درصد به دست آمد. در صفحه با روزنه ۷ میلیمتر در محدوده فشار مورد بررسی، افزایش فشار با افزایش بازده همراه بود و بیشترین میزان در فشار برابر با ۵ بار به میزان ۱۲/۵۱ درصد به دست آمد.

در شکل ۵ بازده نهایی پس از ۱۲۰ دقیقه برای pHهای اولیه مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در حالت pH طبیعی رنگ (pH=8) میزان بازده حدود ۱۱ درصد و با تغییر آن به سمت بازی در pH برابر با ۱۱ میزان بازده حدود ۷ درصد (روند کاهشی) و با تغییر به سمت اسیدی در pH برابر با ۳ میزان بازده حدود ۳۵ درصد (روند افزایشی) به دست آمده است.

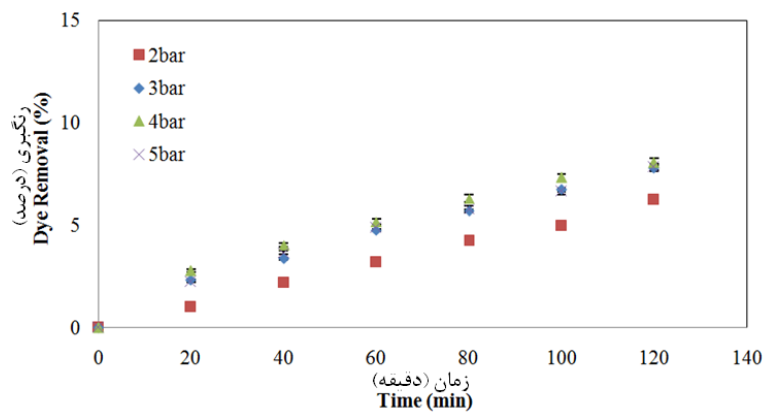
افزایش میزان رنگبری در شرایط اسیدی به دلیل سرعت پایین‌تر بازترکیب شدن رادیکال‌های OH^{\bullet} در شرایط اسیدی و به دنبال آن در دسترس بودن میزان بیشتر رادیکال-ها برای اکسیداسیون RB5 می‌باشد (Gharbani and Mehrizad, 2016; Gore et al., 2014). همچنین با توجه به میزان پایین pK_a (حدود ۴) برای RB5 (Wong et al., 2015) تحت شرایط اسیدی، RB5 از حالت یونی به حالت مولکولی درآمده و به دلیل افزایش ماهیت آبگریزی، مولکول‌ها در سطح رویایی آب حفره قرار می‌گیرند، بنابراین به دلیل میزان غلظت بالاتر رادیکال‌ها در سطح رویارویی آب حفره به نسبت آنچه که در حجم آب قرار دارند (برای هنگامی که رنگزا در حجم آب به حالت یونی در pHهای بالاتر قرار دارد) مولکول‌ها مورد حمله مستقیم رادیکال‌های OH^{\bullet} قرار گرفته و بازده فرآیند افزایش می‌یابد (Goel et al., 2004).

در شکل ۶، pHهای به دست آمده در انتهای فرآیند (پس از ۱۲۰ دقیقه) برای سطح‌های مختلف pH اولیه نشان داده شده است. بنابر نتایج، بطور کلی فرآیند، میل به نزدیک شدن به سمت خنثی را داشت و در pHهای بازی با روند کاهشی و در pHهای اسیدی با روند افزایشی همراه بود، به عنوان نمونه در میزان pH اولیه ۱۱ به حدود ۱۰ و در میزان pH اولیه ۳ به حدود ۶/۵ تغییر یافت. بیشترین تغییرات pH مربوط به سطح‌های اسیدی (بازده‌های بالاتر) بود و در پایین‌ترین سطح (pH برابر با ۳) افزون بر ۳ واحد تغییر در انتهای آزمایش مشاهده شد. بنابراین pH اولیه ۳ به عنوان بهینه انتخاب شد زیرا که با بالاترین بازده همراه بوده و pH انتهایی فرآیند در این حالت حدود ۶/۵ (نزدیک خنثی) به دست آمد.



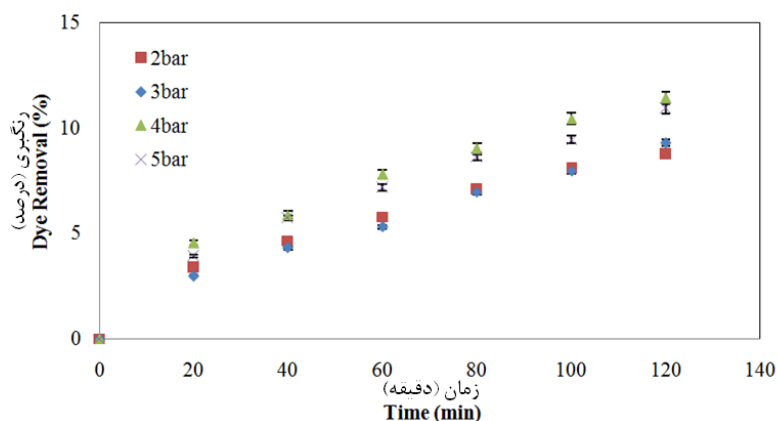
شکل ۷- میزان رنگبری در سطح‌های مختلف فشار در طول زمان برای صفحه با روزنه ۲ میلی‌متر (غلظت اولیه رنگزا ۳۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر با ۸)

Fig. 7- Extent of dye removal for orifice with 2 mm hole diameter at different pressures (dye concentration=30 mg/L , pH=8)



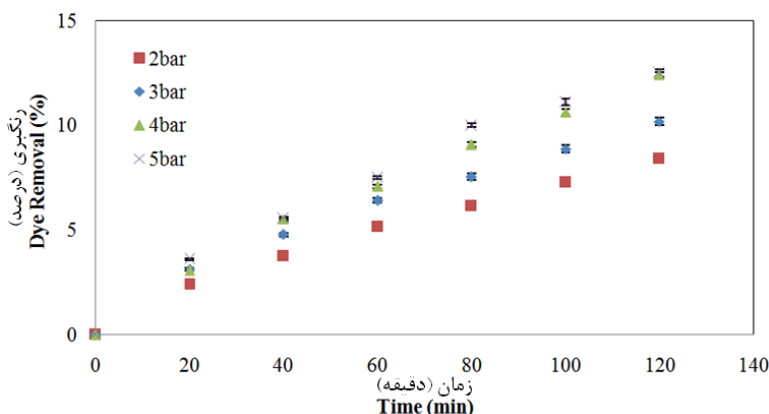
شکل ۸- میزان رنگبری در سطح‌های مختلف فشار در طول زمان برای صفحه با روزنه ۳ میلی‌متر (غلظت اولیه رنگزا ۳۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر با ۸)

Fig. 8- Extent of dye removal for orifice with 3 mm hole diameter at different pressures (dye concentration=30 mg/L , pH=8)



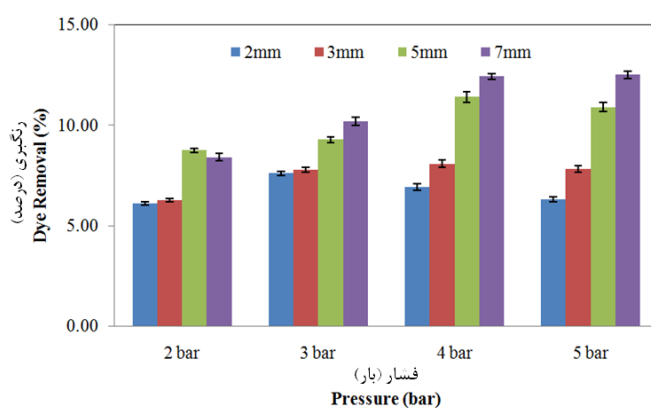
شکل ۹- میزان رنگبری در سطح‌های مختلف فشار در طول زمان برای صفحه با روزنه ۵ میلی‌متر (غلظت اولیه رنگزا ۳۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر با ۸)

Fig. 9- Extent of dye removal for orifice with 5 mm hole diameter at different pressures (dye concentration=30 mg/L , pH=8)



شکل ۱۰- میزان رنگبری در سطح‌های مختلف فشار در طول زمان برای صفحه با روزنه ۷ میلی‌متر (غلظت اولیه رنگزا ۳۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر با ۸)

Fig. 10- Extent of dye removal for orifice with 7 mm hole diameter at different pressures (dye concentration=30 mg/L , pH=8)



شکل ۱۱- میزان رنگبری پس از ۱۲۰ دقیقه برای حالت‌های مختلف فشار ورودی و قطر روزنه (غلظت اولیه رنگزا ۳۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر با ۸)

Fig. 11- Extent of dye removal after 120 minutes for different hole diameters and pressures (dye concentration=30 mg/L , pH=8)

ناحیه کائوئاسیونی و در پی آن افزایش شدت کائوئاسیون می‌شود (Huang et al., 2013). در پژوهش‌ها آمده که بهینه کردن می‌بایست بر اساس کاربرد انجام شود. قطرهای بالا برای کاربردهایی که کائوئاسیون شدید مد نظر است از قبیل تجزیه مواد شیمیایی پیچیده مانند رودامین ب و قطرهای پایین برای کاربردهای با شدت کم از قبیل تجزیه دید پتاسیم^{۴۱} استفاده می‌شود. توصیه شده که فشارهای بالا یا سرعت گرداننده زیاد به کار گرفته شود، اما از کائوئاسیون بیش از حد از طریق عملکرد در یک میزان بهینه اجتناب شود (Gogate and Pandit, 2004). افزایش فشار ورودی باعث شکل‌گیری آسان‌تر

در شکل ۱۱ میزان بازده نهایی پس از ۱۲۰ دقیقه نمایش داده شده است. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود، بطور کلی با افزایش قطر صفحه و نیز افزایش فشار ورودی تا میزان بهینه، بازده فرآیند بهبود یافته است. کمترین بازده مربوط به صفحه با روزنه ۲ میلی‌متر و فشار ۲ بار به میزان ۶/۱۲ درصد و بیشترین میزان مربوط به صفحه با روزنه ۷ میلی‌متر در فشار ۵ بار به میزان ۱۲/۵۱ درصد می‌باشد. افزایش قطر روزنه می‌تواند سبب افزایش فشار فروپاشی شود (Parsa and Zonouzian, 2013)، به‌علاوه بیشتر شدن مساحت جریان عبوری سبب افزایش وسعت

همانطور که ملاحظه می‌شود، با در نظر گرفتن جریان مصرفی (آخرین سطر جدول)، صفحه با روزنه ۷ میلی‌متر در فشار ۴ بار با بیشترین میزان نسبت بازده به جریان مصرفی برابر با ۱/۹۴ در بین کلیه حالت‌ها به عنوان بهینه انتخاب شد.

غلظت رنگزا

در این قسمت در سه سطح غلظت ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر و میزان pH و قطر روزنه صفحه و فشار بهینه (pH برابر با ۳، روزنه ۷ میلی‌متر و فشار ورودی ۴ بار) آزمایش‌هایی به مدت ۱۲۰ دقیقه انجام شد. نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود افزایش غلظت اولیه از ۳۰ به ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر سبب افت بازده فرآیند از حدود ۳۴ درصد به ۲۴ و ۱۹ درصد شد. بنابراین غلظت ۳۰ میلی گرم بر لیتر با بیشترین بازده همراه بود. در اغلب پژوهش‌های مربوط به اکسیداسیون ترکیب‌های آلی، افزایش غلظت آلاینده مورد بررسی با کاهش کارایی فرآیند همراه بوده است. علت را می‌توان به کاهش نسبت رادیکال تولیدی به غلظت آلاینده و همچنین افزایش غلظت مواد حد واسط ناشی از اکسیداسیون آلاینده که تمایل به مصرف رادیکال دارند، نسبت داد (Wu et al., 2012). همچنین افزایش میزان غلظت اولیه سبب افزایش ویسکوزیته^{۴۳} محلول شده و این افزایش در ویسکوزیته سبب می‌شود که شکل‌گیری کاویتاسیون و حرکت آن با روند کندتری انجام شود و بنابراین به دلیل ثابت بودن انرژی ورودی، حالتی که ویسکوزیته بالاتری دارد، بازده پایینتری به دست می‌دهد (Huang et al., 2013).

بنابراین در شرایط بهینه نهایی یعنی استفاده از صفحه با روزنه به قطر ۷ میلی‌متر، فشار ورودی ۴ بار، pH برابر با ۳ و غلظت رنگزا برابر با ۳۰ میلی گرم بر لیتر، پس از ۱۲۰ دقیقه میزان رنگبری برابر با ۳۸/۲۱ درصد به دست آمد.

کاویتاسیون و تولید حباب‌های بیشتر می‌شود و بنابراین تجزیه بهبود می‌یابد (Huang et al., 2013)، ولی با افزایش بیش از حد فشار (بالاتر از نقطه بهینه) شمار چگالی^{۴۲} حفره‌ها بسیار زیاد شده که ممکن است سبب خفگی کاویتاسیون و کاهش شدت آن شود، چراکه پایین دست وسیله تولید کاویتاسیون با شمار زیادی از حفره‌های بهم آمیخته در شکل یک حباب بزرگتر پر شده که سبب فروپاشی نرم یا ناقص حفره‌ها می‌شود (Gore et al., 2014; Bagal and Gogate, 2014).

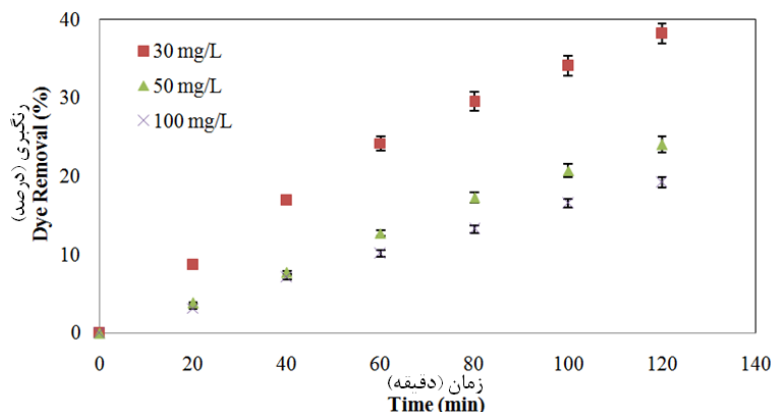
صفحه با روزنه ۷ میلی‌متر در فشار ورودی ۵ بار بیشترین بازده را به دست داد، ولی در این پژوهش با در نظر گرفتن پارامتر مهم انرژی مصرفی به منظور بهینه‌یابی صحیح از طریق اندازه‌گیری جریان مصرفی پمپ، نسبت میزان بازده به جریان مصرفی تعیین و بر مبنای آن حالتی که با نسبت بالاتری همراه بود به عنوان بهینه انتخاب شد. نتایج این محاسبه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- میزان بازده و انرژی مصرفی برای قطرهای روزنه متفاوت و سطح‌های مختلف فشار

Table 2. Energy consumption and dye removal for different hole diameters and pressures

H (mm)	P (bar)	2	3	4	5
2	D (%)	6.12	7.61	6.92	6.31
	D/I	1.20	1.36	1.08	0.96
3	D (%)	6.27	7.79	8.09	7.83
	D/I	1.23	1.39	1.26	1.19
5	D (%)	8.76	9.28	11.41	10.90
	D/I	1.72	1.66	1.78	1.65
7	D (%)	8.41	10.20	12.43	12.51
	D/I	1.65	1.82	1.94	1.90
	I (A)	5.1	5.6	6.4	6.6

P: Pressure (bar) فشار (بار)
H: Hole diameter (mm) قطر روزنه (میلی‌متر)
D: Dye removal (%) رنگبری (درصد)
I: Current consumption (A) جریان مصرفی (آمپر)



شکل ۱۲- رنگبری RB5 در سطح‌های مختلف غلظت رنگزا

(صفحه با روزنه ۷ میلی‌متر، فشار ورودی ۴ بار، pH برابر با ۳)

Fig. 12- Extent of dye removal at different levels of initial dye concentration (pH=3 , hole diameter=7mm, pressure=4 bar)

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس به جهت حمایت مالی تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Biomass
- 2 Organic dyes
- 3 Photosynthesis cycle
- 4 Advanced Oxidation Processes (AOPs)
- 5 Hydroxyl radical
- 6 Fenton
- 7 Ozonation
- 8 Electrochemical
- 9 Photolysis
- 10 Photocatalysis
- 11 Cavitation
- 12 Acoustic
- 13 Hot spot
- 14 Hydrodynamic
- 15 Orifice plate
- 16 Curved channel
- 17 Venturi
- 18 Throttling valve
- 19 Pyrolysis
- 20 Rhodamine B
- 21 Imidacloprid
- 22 Reactive Orange 4
- 23 Diclofenac Sodium
- 24 2-Chlorophenol
- 25 Rhodamine 6G
- 26 Tetracycline
- 27 Reactive Black 5
- 28 Merck
- 29 Deionized Water
- 30 Pilot
- 31 Tank

نتیجه‌گیری

کاویتاسیون هیدرودینامیکی رویکردی نوین و امید بخش برای مقابله با آلاینده‌های صنعتی مقاوم می‌باشد. مزیت این فرآیند بزرگ کردن آسان‌تر مقیاس به دلیل مکانیسم تولید رادیکال‌های فعال و تجزیه آلاینده توسط آن‌ها می‌باشد.

کارکرد در pHهای پایین و به‌کارگیری صفحه‌ها با قطر روزنه بزرگتر در فشار بالاتر و غلظت اولیه آلاینده کمتر بازده بالاتری را در رنگبری منجر شد. صفحه با روزنه ۷ میلی‌متر در فشار ورودی ۵ بار بیشترین بازده را به دست داد ولی با در نظر گرفتن میزان انرژی مصرفی و با توجه به میزان بازده فرآیند به میزان مصرف انرژی، صفحه با قطر روزنه ۷ میلی‌متر و فشار ورودی ۴ بار به‌عنوان بهینه انتخاب و مشخص شد افزایش غلظت رنگزا کاهش بازده را در پی داشت. میزان رنگبری در مدت زمان ۲ ساعت در شرایط بهینه (pH برابر با ۳، صفحه با روزنه به قطر ۷ میلی‌متر، فشار ورودی ۴ بار و غلظت رنگزا برابر با ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر) برابر با ۳۸/۲۱ درصد به‌دست آمد.

در پایان باید توجه شود به‌کارگیری این فرآیند در صنعت، همچنان نیازمند بررسی‌های بیشتر بوده و نیز مناسب است که تاثیرهای ترکیب این فرآیند با دیگر فرآیندهای پیشرفته مورد بررسی قرار گیرد.

32 Spectrophotometer
33 Hach
34 Metrohm
35 Kern
36 Hioki
37 Pentax

38 Victory
39 Extent of Decolorization
40 Cavity water interface
41 KI
42 Number density
43 Viscosity

منابع

Aseev, D.G. and Batoeva, A.A., 2014. Effect of hydrodynamic cavitation on the rate of OH radical formation in the presence of hydrogen peroxide. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 88(1), 28-31.

Asgari, R. and Ayati, B., 2015. Using the EDTA hole scavenger to accelerate decolonization in the immobilized photocatalytic process. *Journal of Water and Wastewater*. 26(3), 19-27. (In Persian with English abstract).

Asgari, R. and Ayati, B., 2016. Scavenger effects on accelerating photocatalytic removal of direct blue 71 dye with nano TiO₂ immobilized on a cementitious bed. *Sharif Civil Engineering Journal*. 31(4.2), 25-35. (In Persian with English abstract).

Avatefinezhad, G. and Asrari, E., 2016. Evaluation of nitrate removal from the water using eichhornia crassipes. *Iran-Water Resources Research*. 12(2), 141-151. (In Persian with English abstract).

Bagal, M.V. and Gogate, P.R., 2014. Degradation of diclofenac sodium using combined processes based on hydrodynamic cavitation and heterogeneous photocatalysis. *Ultrasonics Sonochemistry*. 21(3), 1035-1043.

Bis, M., Montusiewicz, A., Ozonk, J. and Pasieczna-Patkowska, S., 2015. Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of mature landfill leachate. *Ultrasonics Sonochemistry*. 26, 378-387.

Franco, D.S.P., Tanabe, E.H., Bertuol, D.A., Reis, G.S.D., Lima, E.C. and Dotto, G.L., 2017. Alternative treatments to improve the potential of rice husk as adsorbent for methylene blue. *Water*

Science & Technology. 75(2), 296-305.

Franke, M., Braeutigam, P., Wu, Z.L., Ren, Y. and Ondruschka, B., 2011. Enhancement of chloroform degradation by the combination of hydrodynamic and acoustic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 18(4), 888-894.

Gharbani, P. and Mehrizad, A., 2016. Evaluation of Ultrasound/H₂O₂ process efficiency in removal of Benzaldehyde from aqueous solutions. *Modares Civil Engineering Journal*. 16(5), 119-127. (In Persian with English abstract).

Gharibzadeh, N., Fatehifar, E., Alizadeh, R., Haghlesan, A.N. and Chavoshbashi, M., 2016. Modeling and optimization of removal of toluene from aqueous solutions using iron oxide nanoparticles by RSM method. *Modares Civil Engineering Journal*. 16(2), 203-213. (In Persian with English abstract).

Ghoneim, M.M., El-Desoky, H.S. and Zidan, N.M., 2011. Electro-fenton oxidation of sunset yellow FCF azo-dye in aqueous solutions. *Desalination*. 274(1), 22-30.

Goel, M., Hongqiang, H., Mujumdar, A.S. and Ray, M.B., 2004. Sonochemical decomposition of volatile and non-volatile organic compounds – a comparative study. *Water Research*. 38(19), 4247-4261.

Gogate, P.R., 2011. Hydrodynamic cavitation for food and water processing. *Food and Bioprocess Technology*. 4(6), 996-1011.

- Gogate, P.R. and Pandit, A.B., 2004. A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*. 8(3-4), 501-551.
- Gore, M.M., Saharan, V.K., Pinjari, D.V., Chavan, P.V. and Pandit, A.B., 2014. Degradation of reactive orange 4 dye using hydrodynamic cavitation based hybrid techniques. *Ultrasonics Sonochemistry*. 21(3), 1075-1082.
- Gupta, V.K., Agarwal, S., Olgun, A., Demir, H.I., Yola, M.L. and Atar, N., 2016. Adsorptive properties of molasses modified boron enrichment waste based nanoclay for removal of basic dyes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 34, 244-249.
- Huang, Y., Wu, Y., Huang, W., Yang, F. and Ren, X., 2013. Degradation of chitosan by hydrodynamic cavitation. *Polymer Degradation and Stability*. 98(1), 37-43.
- Krishnakumar, B. and Swaminathan, M., 2010. Solar photocatalytic degradation of acid black 1 with ZnO. *Journal of Chemistry*. 49, 1035-1040.
- Madhavan, J., Grieser, F. and Ashokkumar, M., 2010. Degradation of Orange-G by advanced oxidation processes. *Ultrasonics Sonochemistry*. 17(2), 338-343.
- Panbehkarbisheh, M. and Ayati, B., 2015. Compare the two oxidizing NaIO_4 and NaBrO_3 on improving the photocatalytic process by UV/ TiO_2 in removal of Direct Blue 71 dye. *Sharif Civil Engineering Journal*. 30(4.1), 57-65. (In Persian with English abstract).
- Papić, S., Vujević, D., Koprivanac, N. and Šinko, D., 2009. Decolourization and mineralization of commercial reactive dyes by using homogeneous and heterogeneous Fenton and UV/Fenton processes. *Journal of Hazardous Materials*. 164(2-3), 1137-1145.
- Parsa, J.B. and Zonouzian, S.A.E., 2013. Optimization of a heterogeneous catalytic hydrodynamic cavitation reactor performance in decolorization of Rhodamine B: Application of scrap iron sheets. *Ultrasonics Sonochemistry*. 20(6), 1442-1449.
- Rajoriya, S., Bargole, S. and Saharan, V.K., 2017. Degradation of a cationic dye (Rhodamine 6G) using hydrodynamic cavitation coupled with other oxidative agents: Reaction mechanism and pathway. *Ultrasonics Sonochemistry*. 34, 183-194.
- Rajoriya, S., Carpenter, J., Saharan, V.K. and Pandit, A.B., 2016. Hydrodynamic cavitation: an advanced oxidation process for the degradation of bio-refractory pollutants. *Reviews in Chemical Engineering*. 32(4), 379-411.
- Raut-Jadhav, S., Saharan, V.K., Pinjari, D., Sonawane, S., Saini, D. and Pandit, A., 2013a. Synergetic effect of combination of AOP's (hydrodynamic cavitation and H_2O_2) on the degradation of neonicotinoid class of insecticide. *Journal of Hazardous Materials*. 261, 139-147.
- Raut-Jadhav, S., Saharan, V.K., Pinjari, D.V., Saini, D.R., Sonawane, S.H. and Pandit, A.B., 2013b. Intensification of degradation of imidacloprid in aqueous solutions by combination of hydrodynamic cavitation with various advanced oxidation processes (AOPs). *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1(4), 850-857.
- Saeid-Mohammadi, A., Asgari, G., Mehralipour, J., Shabanlo, A., Almasi, H. and Zaheri, F., 2016. Sonochemical oxidation of Acid Blue 113 by Fe (II) - activated Hydrogen Peroxide and Persulfate in aqueous environment. *Journal of Water & Wastewater*. 27(2), 2-13. (In Persian with English abstract).

Saharan, V.K., Badve, M.P. and Pandit, A.B., 2011, Degradation of Reactive Red 120 dye using hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering Journal*. 178, 100-107.

Sahooa, M.K., Sinhaa, B., Marbanianga, M., Naikb, D.B. and Sharanc, R.N., 2012. Mineralization of Calcon by UV/oxidant systems and assessment of bio-toxicity of the treated solutions by *E. coli* colony forming unit assay. *Chemical Engineering Journal*. 181-182, 206-214.

Sayyaadi, S., 2015. Enhanced cavitation-oxidation process of non-VOC aqueous solution using hydrodynamic cavitation reactor. *Chemical Engineering Journal*. 272, 79-91.

Wang, M. and Yuan, W., 2016. Modeling bubble dynamics and radical kinetics in ultrasound induced microalgal cell disruption. *Ultrasonics Sonochemistry*. 28, 7-14.

Wang, X., Jia, J. and Wang, Y., 2017. Combination of photocatalysis with hydrodynamic cavitation for degradation of tetracycline. *Chemical Engineering Journal*. 315, 274-282.

Wong, C.P.P., Lai, C.W., Lee, K.M. and Hamid, S.B.A., 2015. Advanced chemical reduction of reduced Graphene Oxide and its photocatalytic activity in degrading Reactive Black 5. *Materials*. 8(10), 7118-7128.

Wu, J., Zhang, H. and Qiu, J., 2012. Degradation of acid orange 7 in aqueous solution by a novel electro/ Fe^{2+} /peroxydisulfate process. *Journal of Hazardous Materials*. 215-216, 138-145.





Environmental Sciences Vol.16 / No.3 / Autumn 2018

119-134

Application of hydrodynamic cavitation process for dye removal and optimization based on energy consumption

Pouya Arbab¹, Bita Ayati^{1*} and Mohammad Reza Ansari²

¹Department of Environmental Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Department of Energy Conversion, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2017.12.05

Accepted: 2018.04.10

Arbab, P., Ayati, B. and Ansari, M.R., 2018. Application of hydrodynamic cavitation process for dye removal and optimization based on energy consumption. *Environmental Sciences*. 16 (3), 119-134.

Introduction: Many pollutants in industrial wastewaters, such as dyes, can't be removed easily by the conventional physical, biological and chemical purification processes, because of their complexity and intractability. Therefore, it is necessary to find an effective treatment technology that can degrade complex bio-refractory molecules or can breakdown them into smaller molecules which can be further degraded by conventional methods. Cavitation is one such recent technique which has been extensively studied for the treatment of complex wastewater due to its ability of generating highly reactive free radicals. Hydrodynamic cavitation has a potential of application on larger scale due to its capability in generating hydroxyl radicals at ambient condition, easy scale up and less material cost making it more economical to employ. The purpose of this study was application of hydrodynamic cavitation process for removing Reactive Black 5 and optimization the affecting parameters (pH, inlet pressure, hole diameter and initial concentration of dye) based on the amount of efficiency and energy consumption.

Material and methods: In this research, removal of Reactive Black 5 with the use of hydrodynamic cavitation process was studied. 8.25 liters of colored solution was examined in each test. The cavitation was produced by orifice plate and pump. In order to optimize process, various trials were performed in pH of 3 to 11 and also using different orifice plates with hole diameter of 2, 3, 5 and 7 mm at inlet pressures of 2, 3, 4 and 5 bar and dye concentration of 30, 50 and 100 ppm. Due to the constant voltage of urban electricity, the electric current was measured as an indicator of energy consumption by ammeter.

Results and discussion: According to the results by reducing the pH, dye removal was increased and orifice plates with larger hole diameter in upper pressures had better efficiency. It was observed that increasing the initial concentration of dye resulted in decreasing dye removal efficiency. The orifice with 7 mm hole diameter

* Corresponding Author. *E-mail Address:* ayati_bi@modares.ac.ir

at 5 bar inlet pressure yielded the highest efficiency, but by involving the amount of energy consumed and considering the process efficiency to energy consumption, the orifice with 7 mm hole diameter at 4 bar inlet pressure was chosen as the best. The pH of 3, orifice with 7 mm hole diameter at 4 bar pressure and initial concentration of 30 ppm (with regards to pump energy consumption obtained from measuring the electrical current and the efficiency of process) were selected as optimum conditions. In these conditions after 120 minutes, 38.21% dye removal was obtained using hydrodynamic cavitation.

Conclusion: Hydrodynamic cavitation has a potential of application on larger scale due to its capability in generating hydroxyl radicals at ambient condition. It was found that the energy consumption was an effective factor in selecting the optimum conditions. By reducing the initial dye concentration and pH, dye removal was increased and orifice plates with larger hole diameter in upper pressures had better efficiency.

Keywords: Dye, Energy, Hydrodynamic Cavitation, Orifice Plate, Pressure.