

بررسی فرآیند کائیتاسیون هیدرودینامیکی به عنوان یک روش اکسیداسیون پیشرفته جهت تصفیه فاضلاب صنعتی

امیرحسین جهان تیغی^{۱*}، علی میرابی^۲، سید علی وزیری^۳، بهرام قدیری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران- ایران

۲- دکتری شیمی، عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر- ایران

۳- دکتری مهندسی شیمی، عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران- ایران

۴- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر- ایران

*a.h_jahantighi@yahoo.com

ارسال: اسفند ماه ۹۵ پذیرش: اردیبهشت ماه ۹۶

خلاصه

امروزه وجود آلودگی های فراوان در انواع فاضلاب ها و بخصوص فاضلاب های صنعتی باعث شده روش های جدید در تصفیه انواع آلاینده ها، در کنار روش های متداول قرار گیرند. فرآیند اکسیداسیون پیشرفته به روش کائیتاسیون هیدرودینامیکی با تولید ترکیبات رادیکالی همچون \dot{O}_2^- ، \dot{H} ، OH محیطی مساعد برای اکسایش انواع آلاینده های آلی و معدنی در فاضلاب ایجاد می کند. این تحقیق یک مطالعه تجربی- تحلیلی است. در این خصوص یک راکتور کائیتاسیون هیدرودینامیکی در مقیاس پایلوت آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. در طی آزمایشات ۱۰ لیتر از نمونه اولیه فاضلاب در هر یک از مراحل، مورد استفاده قرار گرفته است و پارامترهای pH ، TDS ، COD و کدورت برای آنها بررسی گردید. تغییرات در TDS و کدورت پساب تهیه شده نشان از تولید ترکیبات نامحلول و کلونیدی در محیط آبی را می دهد. همچنین افزایش pH ، ناشی از قلیایی شدن محیط آبی در اثر فعل و انفعالات شیمیایی می باشد.

کلمات کلید: کائیتاسیون هیدرودینامیکی، اکسیداسیون پیشرفته، تصفیه فاضلاب.

۱. مقدمه

امروزه با توجه به کمبود منابع آب شیرین مدیریت فاضلاب تولید شده به عنوان نگرانی در محیط زیست معرفی می گردد، اهمیت جهانی این مساله باعث شده تا بهبود و رشد انواع روش های تصفیه فاضلاب تسریع گردد [۱]. با پیشرفت روزافزون صنایع، فاضلاب ناشی از آنها نیز روز به روز در حال افزایش است. از صنایع آلوده کننده محیط زیست می توان به صنایع آهن و فولاد، صنایع غذایی، صنایع کاغذ و مقوا، صنایع نساجی، صنایع شیشه سازی، صنایع نفت و گاز و پتروشیمی و سایر صنایع

اشاره نمود. با پیشرفت تکنولوژی و تعدد صنایع مختلف، پساب حاصل از فرآیندهای صنعتی تهدیدی جدی برای محیط زیست به شمار می رود. در این بین، صنایع با بار آلودگی زیاد که نقش عمده ای در آلودگی زیست محیطی ایفا می کنند سبب ایجاد مشکلاتی در تصفیه فاضلاب می شوند که این امر لزوم متمایز کردن روشهای تصفیه فاضلاب این صنایع را بیش از پیش بیان میکند [۲]. اکنون در جهان بیش از ۵۰۰ کیلومتر مکعب آب در رابطه با صنعت مورد استفاده قرار می گیرد که نصف آن پس از تصفیه پسابهای صنعتی مجدداً استفاده می شود. در جوامع صنعتی سرچشمه های گوناگونی برای وارد شدن آلودگی های شیمیایی به درون آب وجود دارد، فضولات حاصل از صنایع شیمیایی و آبکاری و عبور از میان زمینهای کشاورزی منابع جدی آلودگی شیمیایی آب هستند. در حال حاضر مواد سمی که توسط آب منتقل می شوند مهمترین عوامل زیان بار موجود در آبهای آشامیدنی هستند.

کاویتاسیون هیدرودینامیکی به عنوان یک تکنولوژی جدید و جایگزین مناسب نسبت به دیگر انواع کاویتاسیون به نظر می رسد. بگونه ای که در استراتژی های نظری و همچنین در بهینه سازی فاکتورهای عملیاتی و نوع طراحی دارای حداکثر منافع می باشد [۳]. کاویتاسیون به سادگی می تواند به عنوان یک فرآیند فیزیکوشیمیایی معرفی شود که با استفاده از فرآیند اکسیداسیون و تخریب حرارتی با ایجاد شرایط دما و فشار بالا به عنوان نیرو محرکه مکانیزم های واکنش تجزیه می تواند باعث تصفیه انواع آلاینده ها در فاضلاب شود [۴، ۵]. تخریب پسابهای آلی و معدنی با استفاده از فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی روشی جهت حذف این ترکیبات است [۴]. در خصوص تصفیه فاضلاب دارویی به عنوان یک نمونه از فاضلاب های دارای مواد آلی فراوان با استفاده از مقایسه روشهای کاویتاسیون اکوستیک و هیدرودینامیکی، توانسته اند به روش هیدرودینامیکی به حذف ۸۰/۳۶٪ دست یابند [۶]. روش های حذف رنگ به عنوان یک مساله گسترده در پالایش های صنعتی حائز اهمیت است در این زمینه نیکیتا و همکارانش با بررسی فاضلاب صنایع رنگ مشخص کردند کاهش فاکتور COD تا ۶۴٪ به عنوان معرف آلاینده گی بوسیله فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی و بدون استفاده از مواد شیمیایی قابل دست یابی است [۷]. صنایع تولید کننده کود های شیمیایی به عنوان عاملی دیگر در ایجاد فاضلاب های با آلاینده گی بالا مورد توجه بوده به گونه ای که این نوع از فاضلاب ها اغلب دارای بار آلی بالا، الکل، آمونیاک، نترات، فسفر، فلزات سنگین مانند کادمیم و مواد جامد معلق هستند. بهنداری و همکارانش در مطالعه موردی در این خصوص به حذف ۸۵٪ از فاکتور COD دست یافتند [۸]. با توجه به موارد بیان شده و دیگر مطالعات صورت گرفته کاویتاسیون هیدرودینامیکی به عنوان فناوری پیشرفته در تصفیه فاضلاب معرفی می شود. استفاده از این فناوری در مهندسی محیط زیست، جایگاه ویژه ای را در خصوص آب و فاضلاب ایجاد کرده است. تخریب انواع ترکیبات خطرناک و سرطانزا و همچنین مواد مقاوم به تجزیه به روش مذکور از قابلیت های اصلی این فرآیند می باشد.

با توجه به میزان آلودگی های انواع آب ها و فاضلاب صنایع با ترکیبات آلی و افزایش غلظت این مواد در منابع آبی، تصفیه هرچه بهتر این منابع جزو اهداف اصلی در سیستم های محیط زیستی است. در تصفیه آب و فاضلاب فرآیندهای اکسیداسیون جهت ضد عفونی آب، کاهش مواد سمی، حذف بو و رنگ و یا به منظور کاهش سطح فلزاتی همچون منگنز و آهن در آب استفاده می شوند. این نوع از فرآیندها ممکن است تمام سموم را از بین نبرده و پتانسیل کامل فرآیندهای اکسیداسیون را به مرحله اجرا نگذارد [۹]. لذا فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته با بهره گیری از قدرت اکسندگی رادیکال های هیدروکسیل می تواند ترکیبات آلی را به محصولات نهایی بی ضرر همچون آب و دی اکسید کربن و همچنین دیگر مواد شیمیایی را به ترکیبات غیر سمی تبدیل کند [۱۰].

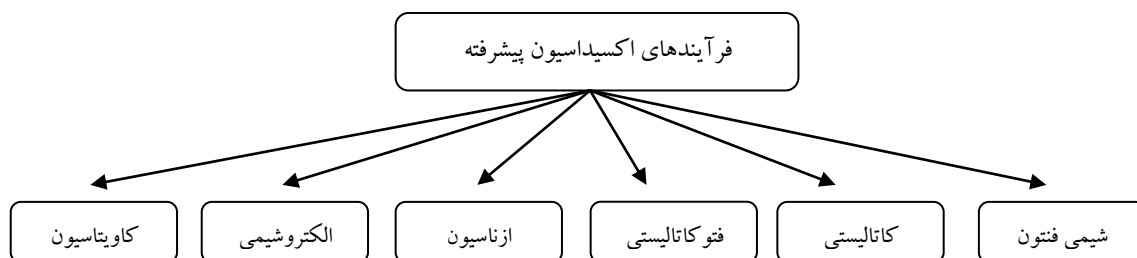
با توجه به این موضوع فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته با بهره گیری از روش های گوناگون در پی تولید عامل اکسند رادیکال هیدروکسیل هستند. انتخاب عامل OH به لحاظ پتانسیل بالای اکسندگی آن در بین دیگر ترکیبات و همچنین شرایط

مساعد جهت تولید آن بوده است. با توجه به جدول ۱ ترکیب اکسنده قوی تر از رادیکال هیدروکسیل، فلئور بوده که به دلیل تولید ترکیبات سمی به عنوان اصلی ترین عامل، شرایط استفاده از آن دچار محدودیت شده است.

جدول ۱- انواع مواد اکسنده شیمیایی به همراه پتانسیل الکترو شیمیایی آنها

اکسید کننده	پتانسیل الکتروشیمیایی اکسیداسیون (ولت)
Fluorine (F2)	3.06
Hydroxyl radicals (OH·)	2.80
Oxygen radical ($\frac{1}{2}O_2$) or atomic oxygen (O)	2.42
Ozone (O3)	2.08
Hydrogen peroxide (H2O2)	1.78
Potassium Permanganate (KMnO4)	1.67
Hypochlorous acid (HOCl)	1.49
Chlorine (Cl2)	1.36
Chlorine dioxide (ClO2)	1.27
Oxygen (O2)	1.23

روش های اکسیداسیون پیشرفته بر پایه ۳ عامل اصلی طرح ریزی شدند که شامل ازن، هیدروژن پراکسید و اشعه ماورای بنفش هستند. با گسترش مطالعات فرآیندهای مختلف جهت تولید رادیکال هیدروکسیل توسعه پیدا کرده و در گروه های زیر دسته بندی می شوند.



هریک از فرآیندهای فوق به صورت واحد در تصفیه انواع آب و فاضلاب کاربرد داشته و در شرایط خاص با توجه به نوع و شدت آلایندهای جهت بالا بردن راندمان تصفیه از سیستم های مرکب استفاده می شود. اثر بخشی و بهره وری فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته وابستگی زیادی به ترکیبات فاضلاب خام دارد که این امر در استفاده از سیستم های ترکیبی نیازمند برنامه ریزی دقیق است [۱۰].

۲. مواد و روش ها

۱.۲. فاضلاب صنعتی

فاضلاب های صنعتی با دارا بودن پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و سمی خاص خود و همچنین آلودگی های میکروبی متنوع، دارای آلاینده های متفاوت بوده که روش های تصفیه تخصصی خود را جهت بازیافت آب خواستار هستند. لذا با توجه به غلظت و تنوع آلودگی ها در فاضلاب های صنعتی می توان روش های خاصی را جهت بهبود کیفیت آب طراحی نمود [۱۱].

وجود چنین حد بالایی از آلودگی های صنعتی باعث شده ات علاوه بر سیستم های کلاسیک تصفیه فاضلاب، روش های جدید با کارایی بالا مورد مطالعه قرار بگیرد تا بتوان با طراحی مناسب از آنها در تصفیه فاضلاب های صنعتی از آنها بهره برد.

۲.۲. کاویتاسیون هیدرودینامیکی

تغییرات فشار در جریان مایع به خاطر هندسه سیستم سبب بوجود آمدن این پدیده می شود. سیال در حال حرکت، در مسیر حرکتش بطور موضعی دارای سرعتهای متفاوت است، این تغییر سرعت عامل اصلی تغییر فشار موضعی سیال می شود. با افزایش بیش از حد سرعت موضعی مایع، فشار موضعی آن کمتر از مقدار بحرانی (وابسته به خواص فیزیکی سیال) می گردد. که خود سبب بوجود آمدن حباب در مایع می شود. مراحل این نوع کاویتاسیون به شرح زیر است:

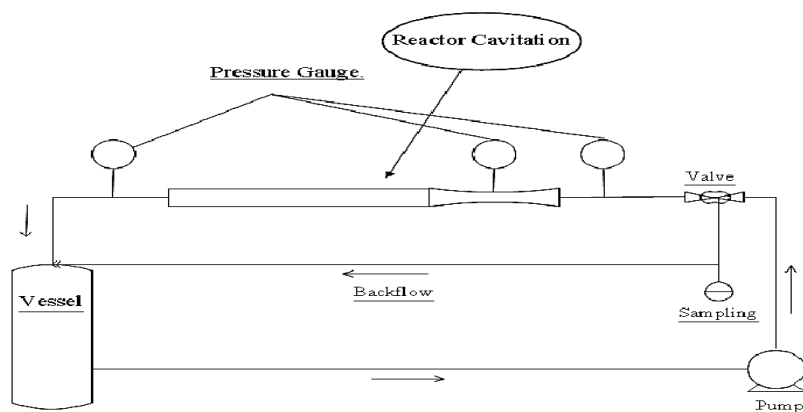
الف- مرحله نخستین: در این مرحله حبابهای قابل رویت کوچک و منطقه کاویتاسیون محدود است.

ب- مرحله توسعه یافته: در اثر تغییر دادن شرایط فشار، سرعت و دما در جهت افزایش نرخ تبخیر، کاویتاسیون رشد می کند و مرحله توسعه یافته قابل تشخیص می شود.

ج- مرحله پایانی: این مرحله قبل از ناپدید شدن کاویتاسیون است. در مرحله نهایی و مرحله اولی کاویتاسیون نزدیک به شرایط آستانه می باشد. شرایطی که مرز با آستانه بین نبودن و ظاهر شدن کاویتاسیون را نشان دهد همیشه قابل تشخیص نیست تا هنگام ظهور و ناپدید شدن مشاهده گردد.

۳.۲. پیکربندی راکتور کاویتاسیون

ساختار راکتور کاویتاسیون طراحی شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. فرآیند در یک سیستم بسته با ایجاد سیرکولاسیون بواسطه جت پمپ نصب شده بر روی فرآیند صورت گرفته است. توان پمپ نصب شده ۱ اسب بخار بوده و دبی خروجی از آن بوسیله جریان برگشتی کنترل می شود. در این سیستم جهت ایجاد شرایط حباب سازی از طراحی و نتوری به عنوان مولد حباب ساز استفاده شد. همچنین در جهت کنترل تغییرات جریان در طی فرآیند، با استفاده از نصب گیج های فشار سنج در ورودی راکتور، مرکز وقوع حباب سازی و خروجی راکتور جریان کنترل گردید. در نهایت جریان به مخزن تعبیه شده تخلیه شده و مجددا در فرآیند سیرکولاسیون قرار می گیرد.



شکل ۱- شماتیک راکتور کاویتاسیون هیدرودینامیکی

۴.۲. اکسیداسیون پیشرفته

روش های اکسیداسیون پیشرفته این قابلیت را دارند که مواد آلوده کننده همچون کانی ها، میکروارگانیزم ها و مواد آلی را بطور کامل نابود کرده و به آب، گاز دی اکسید کربن و نمک هایشان تبدیل و غلظت آنها را کاهش دهد. این در حالست

که بر اثر اکسیداسیون مواد دچار تغییر ساختار ملکولی شده و به مواد غیر سمی و یا زیست تخریب پذیر تبدیل می شوند. از طرف دیگر تغییر ساختار ملکولی مواد تحت اکسیداسیون باعث می شود تا مواد در تصفیه بیولوژیکی با راندمان بالاتری تصفیه شده و از زمان آداپته شدن محیط بیولوژیکی با آلودگی ها می کاهد [۱۲]. کائیتاسیون با تولید ترکیبات رادیکالی محیطی مساعد برای اکسیداسیون را فراهم کرده که با توجه به تولید ترکیب رادیکالی هیدروکسیل، دارای پتانسیل بالا در از بین بردن انواع آلاینده های آبی می باشد. با توجه به نوع مکانیزم تولید و اثر فرآیند کائیتاسیون، این روش از لحاظ شیمیایی در دسته فرآیند های اکسیداسیون پیشرفته دسته بندی می شود.

۵.۲. روش های آنالیز شیمیایی

در خصوص انجام آنالیزهای مذکور مطابق با روش های استاندارد از فدراسیون محیط زیست آب تهیه شده توسط انجمن بهداشت عمومی امریکا اعمال شده است که در جدول ۲ ارائه می گردد [۱۳].

جدول ۲- معرفی متدهای استاندارد تصفیه فاضلاب

عنوان آزمون	روش استاندارد
COD	Standard methods 5220-D
TDS	Standard methods 2540-C
pH	Standard methods 4500H+ - B
کدورت	Standard methods 2130-B

۳. بحث و نتایج

۱.۳. روش تشخیص کائیتاسیون

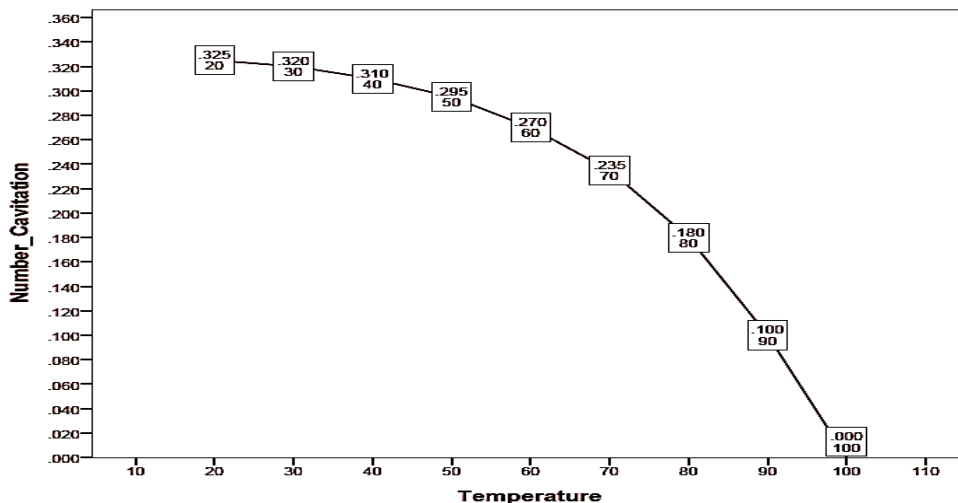
مکانیسم های اتخاذ شده جهت شناسایی وقوع کائیتاسیون را می توان به وقوع اتفاقات فیزیکی و شیمیایی که حاصل از فرآیند های کائیتاسیون است مرتبط دانست. بر این اساس روش های فیزیکی عکس برداری فوق سریع، تغییرات دمایی، اندازه گیری شوک های ارتعاشی و لرزشی، سیستم های شناسایی لیزینگ، سیستم های شناسایی با فرآیند لومینسانس و روش های شیمیایی واکنش های اگزالیک اسید و اسید سالیسیلک بررسی شد. از بین موارد گفته شده روش شناسایی بر پایه مشاهده عینی و واکنش های اگزالیک اسید انتخاب گردید. ابتدا با توجه به طراحی تجهیزات، در فضای تعبیه شده حباب های تولید شده بر اثر افت فشار جریان در مولد حباب ساز مشاهده شدند و سپس برای اطمینان از انجام کامل فرآیند کائیتاسیون در روش شیمیایی رادیکال های هیدروکسیل به عنوان یکی از فرآورده های کائیتاسیون بطور اختصاصی با اگزالیک اسید وارد واکنش شده که در اثر این واکنش اسید اگزالیک اکسیده شده و در نهایت به دی اکسید کربن و آب تجزیه می شود. انجام این واکنش ها باعث تغییرات در pH محیط شده که با اندازه گیری آن در طی فرآیند تغییرات از ۴ تا ۷ مشاهده و مطابق آن تحولات فرآیند پیش بینی و اندازه گیری شد.

۲.۳. بررسی عدد کائیتاسیون

ماهیت چندگانه کائیتاسیون موجب شده است که یک عدد بی بعد برای آن تعریف شود. این عدد شامل پارامترهای خواص فیزیکی سیال (جرم مخصوص و فشار بخار) و خواص هیدرولیکی جریان است. عدد کائیتاسیون بیان کننده نسبت افت انرژی هیدرودینامیک به انرژی کل است و به شکل زیر تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{P_2 - P_V}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} \quad (1)$$

در معادله فوق P_2 فشار پایین دست جریان سیال، P_V فشار بخار سیال، ρ دانسیته سیال و V_0^2 سرعت سیال در گلوگاه نازل می باشد. شایان ذکر است که عدد کاویتاسیون با استفاده از پارامترهای دینامیکی تعریف می شود و پارامترهای هندسی سیستم در تعریف آن دخالت ندارند. هم چنین در یک جریان غیر کاویتاسیون این پارامتر بی بعد نمی تواند به عنوان یک پارامتر تشابه قلمداد شود، زیرا اختلاف بین P_2 و P_V اهمیت فیزیکی برای جریان واقعی ندارد. عدد کاویتاسیون، تنها در شروع کاویتاسیون یک پارامتر تشابه است. پارامتر σ برای اندازه گیری کاویتاسیون بکار می رود. انواع مختلف پارامترهای هیدرودینامیکی مانند ضریب دراگ و لیفت وقتی که تشابه هندسی درست بین مدل و نمونه اولیه برقرار باشد توابع منحصر بفردی از σ هستند. با توجه به تغییرات دمایی در راکتور کاویتاسیون به واسطه انجام فعل و انفعالات شیمیایی، فرآیند در تحولات دمایی شرکت می کند. این تغییرات در شکل ۲ پیش بینی شده است. فاکتور دما به عنوان یک عامل مستقیم بر خواص فیزیکی سیال اثر گذاشته و مطابق با تغییرات آن پارامترهای جرم مخصوص و فشار بخار سیال که در عدد کاویتاسیون شرکت دارند تغییر می کند. آثار این تغییرات در وقوع و شدت کاویتاسیون اثر گذار بوده و مشاهده می شود با افزایش دما در دبی ثابت از سیال عدد کاویتاسیون با شیب زیاد رو به صفر میل می کند که این تحول نشان از افزایش شدت وقع کاویتاسیون دارد. لذا افزایش دمای سیال σ را کاهش و درصد وقوع کاویتاسیون را افزایش می دهد. همچنین با افزایش دمای سیال روند تغییرات در عدد کاویتاسیون با شیب بیشتری انجام می شود.

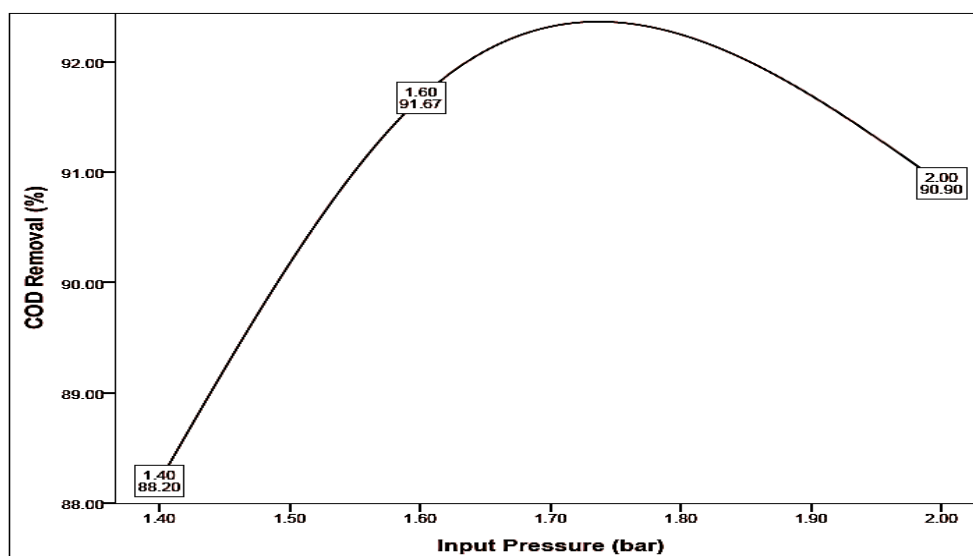


شکل ۲- تاثیرات دمای سیال بر عدد کاویتاسیون

۳.۳. تاثیرات کاویتاسیون بر حذف COD

با توجه به تعریف COD مبنی بر اکسیژن لازم جهت انجام اکسیداسیون مواد شیمیایی موجود در محیط، مشاهده شد افزایش فشار ورودی سیال به راکتور که مستقیماً بر شدت کاویتاسیون متاثر است، باعث افزایش حذف COD از فاضلاب شده و راندمان حذف دارای بیشینه می باشد. تغییرات میزان حذف COD نسبت به فشار ورودی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد میزان حذف COD با افزایش فشار ورودی تا رسیدن به فشار بهینه ۱/۷۴ bar افزایش می یابد. افزایش بیشتر فشار باعث افت در میزان حذف COD می شود. بیشتر شدن میزان حذف COD را می توان به علت افزایش فعالیت کاویتاسیونی در راکتور مربوط دانست. همچنین کاهش میزان راندمان حذف COD با ادامه افزایش فشار ناشی از ایجاد شرایط سوپر کاویتاسیونی می باشد. وقوع شرایط سوپر کاویتاسیون باعث افت فعالیت کاویتاسیونی می شود. در این

شرایط بیشتر فضای پایین دست در نازل و تئوری را حباب ها تشکیل می دهند. تجمع حباب در این فضا باعث می شود تا چگالی تعداد حباب ها افزایش داشته و تمام فضای پایین دست را فاز گازی اشغال کند. وقوع چنین شرایطی از تولید فرآورده های شیمیایی کائیتاسیون کاسته و تولید مواد اکسید کننده را کاهش می دهد. به طبع چنین واقعه ای حذف COD کاهش خواهد داشت.



شکل ۳- تاثیرات فشار ورودی بر حذف COD فاضلاب

۴.۳. اثر کائیتاسیون بر تغییرات TDS، pH و کدورت

فاکتور های مذکور جزو بخشی از پارامتر های شاخص آلاینده گی بوده که مقدار آلاینده گی مواد در انواع آب و فاضلاب با این فاکتور ها ارزیابی می گردد. تغییرات پارامتر های pH، TDS و کدورت بواسطه فرآیند راکتور کائیتاسیون در جدول ۲ گزارش شده است. اندازه گیری و بررسی نحوه تغییرات پارامتر های بیان شده اطلاعات جامعی از انجام انواع فرآیند های شیمیایی و فیزیکی را ارائه می دهد. در این خصوص با توجه به انجام فرآیند اکسیداسیون در راکتور کائیتاسیون، در کنار آنالیز COD پارامتر های pH، TDS و کدورت نیز بررسی شدند.

با توجه به نتایج حاصل شده مشاهده می شود با کاهش عدد کائیتاسیون و افزایش فعالیت کائیتاسیونی pH از حالت خنثی رو به سمت بازی شدن می رود. وجود این تغییر ناشی از افزایش OH^- در محیط در طی فعالیت کائیتاسیونی می باشد. لذا با توجه به هیدرولیز آب بواسطه فرآیند کائیتاسیونی تولید یون های محلول OH^- و H^+ در فاضلاب اتفاق می افتد و با وجود شرکت نامتقارن این یون ها در واکنش های شیمیایی مشاهده می شود که بازی شدن محلول ناشی از افزایش غلظت یون OH^- بواسطه انجام فعالیت کائیتاسیون و شرکت کمتر آن نسبت به H^+ در فعل و انفعالات شیمیایی و همچنین تولید آن در دیگر واکنش های شیمیایی می باشد.

با توجه به تغییرات همزمان TDS و کدورت مشخص می شود که مواد جامد محلول که اغلب شامل مواد معدنی و فلزی هستند در اثر اکسایش بوسیله فاکتورهای اکسید کننده در فرآیند کائیتاسیون، به حالت نامحلول در آمده و ایجاد ساختار های کلوئیدی کرده و به طبع آن کدورت محلول افزایش پیدا کرده است. وجود ترکیبات دارای یون های هیدروکسید و اکسید بطور معمول در آب نامحلولند و همچنین ترکیبات محلول موجود در فاضلاب در اثر ترکیب با این یون ها به حالت نامحلول در می آیند. کاهش سطح حلالیت مواد در آب از طریق فرایندهای اکسیداسیون باعث تغییر

اندازه املاح در آب می شود. این امر با توجه به نتایج حاصل شده بیان می کند که مواد از دسته TDS به TSS وارد شده اند. مواد جامد محلول بواسطه تحولات شیمیایی به حالت معلق در آب در آمده و حالت سوسپانسیونی بخود گرفته اند.

جدول ۳- تغییرات پارامترهای pH، TDS و کدورت در فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک

شماره	فشار ورودی (bar)	فشار گلوگاه (bar)	عدد کاویتاسیون	TDS (mg/L)	pH	کدورت (NTU)
۱	-	-	-	۸۶۶	۶/۹	۱۴
۲	۱/۴	-۰/۵۸	۰/۵۳	۷۳۲	۷/۲۶	۲۶
۳	۱/۶	-۰/۷	۰/۳۴	۶۹۵	۷/۹۴	۳۸
۴	۲	-۰/۸۷	۰/۳۲	۷۲۰	۷/۶	۳۴

۴. نتیجه گیری

وجود مکانیسم های خاص در فرآیند اکسایش که بر مبنای واکنش های شیمیایی طراحی شده اند، وجود این مواد را در یک فرآیند اکسیداسیون ضروری می کند. با توجه به این موضوع طراحی سیستم مولد مواد اکسید کننده بدون حضور مواد شیمیایی واسطه به عنوان روشی کارآمد مد نظر بوده است. لذا با تکیه بر پدیده کاویتاسیون طراحی راکتور کاویتاسیون هیدرودینامیکی صورت گرفت. در این راکتور مواد اکسید کننده بر اساس تحولات جریان بطور مستقیم در داخل سیال تولید و مصرف می شوند. مشخص شد رادیکال هیدروکسیل و اکسیژن نوزاد تولید شده در این فرآیند به عنوان عوامل اصلی اکسایش آلاینده ها نقش ایفا کرده و باعث فروپاشی ساختار شیمیایی آنها شده اند. همچنین نتایج حاصل از آزمایشات نشان می دهد مولد حباب ساز و تئوری با توجه به شرایط حاکم بر دینامیک جریان سیال، نازلی مناسب جهت ایجاد کاویتاسیون هیدرودینامیکی می باشد.

۵. منابع

1. Martin Petkovšek, et al, "Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment", Separation and Purification Technology 118, pp.414-423, 2013.
۲. وزیری، وحید، [و همکاران]، "معرفی روش های تصفیه پساب صنایع سلولزی"، مجموعه مقالات اولین همایش ملی مدیریت منابع طبیعی، ۱۳۹۲.
3. Parag R. Gogate, "Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing", Food Bioprocess Technol, pp.996-1011, 2011.
4. Rajendrasinh R.Gaekwad, Prof. Reshma L. Patel, "PESTICIDE WASTEWATER TREATMENT BY HYDRODYNAMIC CAVITATION PROCESS", International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology, Vol2, pp.1-5, 2015.
5. Parag R.Gogate, Aniruddha B.Pandit, A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions, Advances in Environmental Research 8 (2004) 501-551
6. Rajendrasinh R.Gaekwad, Reshma L. Patel, Treatability study of pharmaceutical wastewater by hydrodynamic cavitation process, International Journal of Engineering Research and General Science, 2015, 74-78

7. Thakor Nikita Pareshbhai, Huma Syed, "Dye Wastewater Treatment By Hydrodynamic Cavitation Process", IJARIII- 2395-4396, Vol-2 ,pp. 461-465, 2016
8. Vinay M. Bhandari, et al, "Industrial wastewater treatment for fertilizer industry- A case study", Chemical Engineering & Process Development Division CSIR- National Chemical Laboratory Pune-411 008. India.
9. J. M. Poyatos, et al, "Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: State of the Art", Water Air Soil Pollut, pp. 187-204, 2010.
10. Bill Grote, "Application Of Advanced Oxidation Processes (Aop) In Water Treatment", 37th Annual Qld Water Industry Operations Workshop ,Parklands, Gold Coast - 5 to 7, pp.17-23, 2012.
11. M. O. Awaleh, Y. D. Soubaneh "Waste Water Treatment in Chemical Industries: The Concept and Current Technologies", Waste Water Treatment in Chemical Industries, the Concept and Current Technologies. Hydrol Current, Vol 5, pp.1-12, 2014.
12. Brunauer, Emmett, Teller, J. Am. Chem, Soc. 60, 309, 1938.
13. American Water Works Association, "American Public Health Association", Water Environment Federation, 1999.