

Water and Wastewater, Vol. 35, No. 1, pp: 58-75

# Experimental Investigation of Hydrodynamic Cavitation Method's Operational Parameters for Removing Organic Pollutants from Water, Case Study: Methyl Orange Dye

Ali Reza Asaddokht<sup>1</sup>, Abdolah Rashidi MehrAbadi<sup>2\*</sup>, Mohmmad Reza Jalili Ghazizadeh<sup>3</sup>

1. PhD. Candidate, Dept. of Water and Wastewater Engineering, Civil, Water and Environmental Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Water and Wastewater Engineering, Civil, Water and Environmental Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran  
(Corresponding Author) [a\\_rashidi@sbu.ac.ir](mailto:a_rashidi@sbu.ac.ir)
3. Assoc. Prof., Dept. of Water and Wastewater Engineering, Civil, Water and Environmental Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received Jan. 17, 2024 Accepted March 17, 2024)

**To cite this article:**

Asaddokht, A. R., Rashidi MehrAbadi, A. and Jalili Ghazizadeh, M. R., 2024. Experimental investigation of hydrodynamic cavitation method's operational parameters for removing organic pollutants from water, case study: methyl orange dye. *Water and Wastewater*, 35(1), 58-75.  
<https://doi.org/10.22093/wwj.2023.436296.3395>

**Abstract**

The entry of large volumes of industrial effluents containing organic pollutants and dyes into water has made pollution an important issue and led to more attention being paid to advanced oxidation processes for industrial wastewater treatment. Cavitation, due to its ability to produce active free radicals, is a technique that has been considered to increase the efficiency of water and wastewater treatment processes in order to remove organic chemical compounds and decompose pollutants resistant to biological decomposition. The purpose of this research is to use hydrodynamic cavitation to remove the methyl orange dye and optimize the operating parameters for color removal efficiency. For this purpose, cavitation was produced through the use of a pump and an orifice plate with a 4 mm diameter hole, and methyl orange with a concentration of 2 mg/L was tested at each stage. In the following, the effect of operating parameters, including pressure in the range of 0.5 to 6.5 bar, temperature in the range of 8 to 40 °C, pH in acidic, neutral, and alkaline conditions after 135 minutes was determined to achieve the maximum decolonization in optimal conditions. In this study, optimal conditions for achieving the highest removal efficiency (51.7%) were obtained at an inlet pressure of 5.5 bar and a cavitation number of about 0.14 ( $Ca \approx 0.14$ ). The results of this investigation showed that the decomposition and removal of methyl orange dye using the hydrodynamic cavitation method is sensitive to the pH of the solution, especially in acidic conditions, which are more suitable conditions for the production of hydroxyl radicals than in alkaline conditions, and has higher efficiency in acidic conditions. Also, increasing the temperature of the solution due to the effect on the saturated vapor pressure will increase the decolonization rate.

**Keywords:** Hydrodynamic Cavitation, Cavitation Number, Operational Parameters, Organic Pollutants, Dye.



## 1. Introduction

The pollution of water bodies by the industrial effluent, especially the dyeing industry, has become a problem and threatens human health and the environment (Yang et al., 2017). Every year, more than ten thousand different types of synthetic dyes are produced in the world, causing concerns about water pollution (Saharan et al., 2011).

Usually, the effluents of these industries contain high amounts of dyes and organic pollutants with complex compounds, high BOD and COD, which, firstly, have low biodegradability and, more importantly, do not have constant quality. Low biodegradability and the possibility of cancer even in very small amounts increases the concerns (Randhavane Shrikant, 2019; Sejie and Tabbiruka, 2016).

Currently, various advanced oxidation processes are used alone or in combination with other methods to decompose and remove dye and organic pollutants from water which, in addition to removing the target pollutant, also have some disadvantages (Zhang et al., 2018; Mancuso et al., 2020).

The purpose of this research is to use hydrodynamic cavitation to remove methyl orange dye and optimize the operating parameters for decolorisation. For this purpose, cavitation was produced through the use of a pump and an orifice plate with a 4 mm diameter hole, and methyl orange with a concentration of 3.52 mg/L was tested at each stage. In the following, the effect of operating parameters including pressure in the range of 0.5 to 6.5 bar, temperature in the range of 8 to 40 °C, pH in acidic, neutral and alkaline conditions after 135 minutes in order to achieve the maximum decolorisation in optimal conditions was determined.

## 2. Materials and methods

In each stage of this research, the initial input solution was added to the tank, and for a duration of 15 minutes, the flow was recirculated back to the tank by the pump and through the bypass path, to ensure effective mixing. After the initial start-up, the bypass path was closed, and the flow in the main line and with determined conditions (pressure, pH, and temperature) entered the cavitation reactor, and sampling was done from the lower valve of the tank at time points of 0, 45, 90 and 135 minutes.

In this research, the effect of inlet pressure parameters (in the range of 0.5 to 6.5 bar), circulation times in the system, inlet pollutant concentration (in 2 values of 2 mg/L and 3.5

mg/L), temperature (in 4 values of 8, 22, 30 and 40 degrees Celsius) and solution pH (in acidic, neutral and alkaline conditions) were investigated separately. Also, the pressure parameter was continuously controlled by pressure gauges.

The concentration of the methyl orange pollutant could be calculated based on the changes in the absorption rate, and the amount and percentage of color removal of the samples in this research were measured and evaluated by a spectrophotometer using calibration at a wavelength of 464 nm, and then the percentage of pollutant removal from water was calculated.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Effect of inlet pressure

According to the inlet pressure and the recovered pressure downstream, followed by the calculation of the cavitation number, it can be seen that with increasing inlet pressure from 0.5 to 6.5 bar, the cavitation number decreases from 4.29 to 0.075. The results show that by decreasing the cavitation number up to 0.14, pollutant removal increases and reaches 51.7%, and further, the removal efficiency decreases.

Observations during this process show that by decreasing the cavitation number, more cavities are creating in the reactor; they deteriorate and collapse (visible in the line consisting of plexiglass tubes), which leads to the formation of more active hydroxyl radicals in the reactor, and finally increases efficiency of pollutant removal.

### 3.2. Effect of circulation times in the reactor

The results of this phase show that as the retention time in the system increases, the number of times the fluid circulates in the system increases, and then the efficiency of pollutant removal from water increases. This increase in efficiency is due to the collision of more molecules with the collapsed cavities, followed by more contact with shock waves and active hydroxyl radicals as an oxidizing agent.

### 3.3. Effect of initial concentration of the pollutant

It has been shown that in the same condition, the efficiency of a lower concentration will be higher. Conversely, while the initial pollutant concentration is higher, the decolorisation rate will be higher. Although the dye removal efficiency may be close in both tests after more time, a higher initial concentration will have a faster rate of pollutant removal.

### 3.4. Effect of temperature

The temperature of the solution has an effect on the saturated vapor pressure of the liquid, and according to the standard tables, increasing the temperature of the solution leads to an increase in the saturated vapor pressure. Based on the results, since in the process of cavitation, the expectation is that the pressure after the orifice plate (assuming cavitation occurs) will decrease below the vapor pressure, therefore, with the increase in the temperature of the solution entering the reactor, the saturated vapor pressure will increase, and in the process of cavitation, the pressure will decrease. Therefore, by increasing the temperature of the inlet solution, the efficiency of decomposition and removal of methyl orange pollutants will increase.

In addition, based on the kinetic theory, increasing the temperature of the solution intensifies molecular movements, which results in the acceleration of chemical oxidation between oxidizing agents and pollutant molecules. Also, increasing the temperature increases the reaction rate of hydroxyl radicals and increases the collision rate (between pollutant molecules and radicals).

### 3.5. Effect of pH

The results indicate that the pH of the solution is

an important parameter in determining the effectiveness of hydrodynamic cavitation due to the possibility of influencing the chemical properties of the solution and the possible location of the dissolved substance.

The results show that the effect of pH on the removal efficiency of methyl orange pollutant is slightly better in acidic conditions than in neutral conditions. But in alkaline conditions, the removal efficiency decreases relatively. The reason for this is the molecular structure of methyl orange in acidic and alkaline conditions.

## 4. Conclusion

The results of this research show that using the hydrodynamic cavitation method to decolorize water is an efficient method that has the ability to decompose and remove this pollutant from water without any byproducts.

The maximum removal efficiency at 5.5 bar pressure (cavitation number 0.14) was achieved by 51.7% and after that, the efficiency decreases. The main parameter affecting the efficiency of cavitation in this process, apart from the geometry of the orifices, is the cavitation number, which plays a major role in the beginning of this process.

آب و فاضلاب، دوره ۳۵، شماره ۱، صفحه: ۷۵-۵۸

## بررسی آزمایشگاهی پارامترهای عملکردی روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی در حذف آلاینده آلی از آب، مطالعه موردی: ماده رنگزای متیل اورانژ

علیرضا اسدخت<sup>۱</sup>، عبدالله رشیدی مهرآبادی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا جلیلی قاضی زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی محیط‌زیست، گروه مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
 ۲- دانشیار، گروه مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
 (نویسنده مسئول) [a\\_rashidi@sbu.ac.ir](mailto:a_rashidi@sbu.ac.ir)  
 ۳- دانشیار، گروه مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت ۱۴۰۲/۱۰/۲۷ پذیرش ۱۴۰۲/۱۲/۲۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

اسدخت، ع. ر.، رشیدی مهرآبادی، ع. و جلیلی قاضی زاده، م. ر.، رشیدی، ع. و جلیلی قاضی زاده، م. ر.، ۱۴۰۳، بررسی آزمایشگاهی پارامترهای عملکردی روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی در حذف آلاینده آلی از آب، مطالعه موردی: ماده رنگزای متیل اورانژ. <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.436296.3395>. ۵۸-۷۵، (۱) ۳۵، آب و فاضلاب، ۱۴۰۳.

### چکیده

با توجه به ورود حجم قابل توجهی از پساب‌های صنعتی حاوی آلاینده‌های آلی و رنگ‌زا به آب، موضوع آلودگی‌های احتمالی آن به یک مسئله مهم تبدیل شده که این موضوع باعث توجه بیشتر به فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی شده است. کاویتاسیون از جمله روش‌هایی است که به دلیل قابلیت تولید رادیکال‌های آزاد فعال به منظور شکست ترکیب‌های شیمیایی آلی و تجزیه آلاینده‌های مقاوم در برابر تجزیه زیستی، برای افزایش کارایی فرایندهای تصفیه آب و فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، بهره‌گیری از روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی به منظور تجزیه و حذف رنگزای متیل اورانژ و بهینه‌یابی پارامترهای عملیاتی با توجه به میزان کارایی حذف رنگ بود. به این منظور کاویتاسیون از طریق به‌کارگیری پمپ و صفحه روزنه‌دار (اریفیس) با قطر روزنه ۴ میلی‌متر تولید و در هر مرحله از پژوهش متیل اورانژ با غلظت ۳/۵۲ میلی‌گرم در لیتر آزمایش شد و تأثیر پارامترهای عملیاتی فشار در محدوده ۰/۵ تا ۶/۵ بار، دما در محدوده ۸ تا ۴۰ درجه سلسیوس، pH در شرایط اسیدی، خنثی و قلیایی بعد از گذشت ۱۳۵ دقیقه به منظور دستیابی به حداکثر میزان رنگ‌زایی در شرایط بهینه تعیین شد. در این پژوهش، بهینه‌ترین شرایط برای دستیابی به بیشترین کارایی حذف در فشار ورودی ۵/۵ بار و عدد کاویتاسیون حدود ۰/۱۴ (Ca≈0.14) به میزان ۵۱/۷ درصد حاصل شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که تجزیه و حذف ماده رنگزای متیل اورانژ با استفاده از روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی نسبت به pH محلول ورودی حساس و عملکرد راکتور به‌خصوص در شرایط اسیدی که برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل شرایط مساعدتری است، نسبت به شرایط قلیایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای ارتقا می‌یابد. همچنین افزایش دمای محلول به دلیل اثرگذاری بر فشار بخار اشباع، سرعت تجزیه و حذف رنگ از محیط را بالاتر خواهد برد.

واژه‌های کلیدی: کاویتاسیون هیدرودینامیکی، عدد کاویتاسیون، پارامترهای بهره‌برداری، آلاینده آلی، رنگ‌زا



## ۱- مقدمه

آلودگی مجاری آبی توسط پساب تولید شده برخی صنایع به خصوص صنعت چاپ، نساجی و رنگریزی به مشکلی بزرگ و تهدیدکننده برای سلامت انسان و محیط زیست تبدیل شده است (Yang et al., 2017).

استقرار این صنایع به خصوص در مجاورت بدنه‌ها و مجاری آبی با توجه به تولید سالانه بیش از ۱۰۰۰۰ نوع از رنگ‌های سنتزی مختلف در آنها، نگرانی‌هایی را در مورد آلودگی آب ایجاد کرده است (Saharan et al., 2011).

پساب تولیدی این صنایع کیفیت ثابتی ندارند و عموماً حاوی مقدار زیاد BOD و COD، رنگ و آلاینده‌های با ترکیبات پیچیده هستند. آلاینده‌های موجود در این پساب‌ها علاوه بر سمیت، تجزیه‌پذیری زیستی کمی دارند و از این رو وجود چنین آلاینده‌هایی در پساب صنایع فوق، حتی در مقدار بسیار کم احتمال تأثیر روی ژن‌ها و حتی بروز سرطان را افزایش داده است (Sejje and

Tabbiruka, 2016, Randhavane Shrikant, 2019)

حضور این رنگ‌ها در محیط‌های آبی منجر به کاهش نفوذ نور در آب و تهدیدی برای زندگی آبزیان می‌شود. علاوه بر این عدم تجزیه این رنگ‌ها و جذب آنها توسط گیاهان می‌تواند زمینه‌ساز جهش‌های ژنتیکی در نسل‌های آینده شود و به همین دلیل امروزه حذف آنها از آبهای آلوده به یک اولویت تبدیل شده است. در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی در راستای ارتقا و بهبود روش‌های تجزیه و یا حذف آلاینده‌ها به خصوص آلاینده‌های با سمیت بالا و رنگ‌زا انجام شده است (Haji et al., 2011).

در حال حاضر معمولاً فرایندهای مختلف اکسیداسیون پیشرفته به تنهایی یا به صورت ترکیبی با سایر روش‌ها برای تجزیه و حذف آلاینده‌های رنگ‌زا از آب به کار گرفته می‌شوند. پژوهشگران دیگر، روش‌های متنوعی از قبیل روش‌های الکتروشیمیایی، اکسیداسیون فتوکاتالیک، استفاده از فنتون و امواج ماورای صوت را نیز برای تجزیه این گونه آلاینده‌ها به کار گرفته‌اند (Mancuso et al., 2020).

از جمله این پژوهش‌ها، اثربخشی تجزیه و حذف رنگ ماده آلی اورانژ ۲ از محلول آبی با استفاده از فرایند فوتوکاتالیک در ترکیب با پوشش اکسید روی (ZnO) فعال است (Marto et al., 2009).

همچنین، کارایی استفاده از غشاها در تصفیه پساب‌های صنعتی

حاوی رنگ و اثر هم‌افزای کاربرد فراصوت علاوه بر ازن بر حذف رنگ از محلول متیل اورانژ اثبات شده است (Haji et al., 2011, Zhang et al., 2018)

علاوه بر موارد فوق پژوهشگران دیگر حذف آلاینده رنگ‌زای بلو ۱۹ با استفاده از ترکیب پرسولفات پتاسیم و اشعه ماورای بنفش، اثر شدت تابش UV، pH بر محلول و دز پراکسید هیدروژن بر حذف رنگ‌زای سولفور آبی، تجزیه اسید اورانژ ۸، اسید بلو ۷۴ را از طریق فرایند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بررسی کردند. نتایج پژوهش‌ها نشان دادند که پراکسید هیدروژن نقش مهمی در ارتقای نرخ سرعت حذف رنگ از محلول‌ها داشته است (Haji et al., 2011).

به صورت ویژه برای رنگ‌زای متیل اورانژ فرایندهای مختلف الکتروشیمیایی، اکسیداسیون فوتوکاتالیک، روش فنتون و امواج ماورای صوت و سایر روش‌های اکسیداسیون پیشرفته به تنهایی یا به صورت ترکیبی با سایر روش‌ها برای تجزیه و حذف این ماده از آب به کار گرفته شده است. با وجود اینکه این روش‌ها متیل اورانژ را حذف می‌کنند، اما دارای معایبی از جمله نیاز به مواد شیمیایی، مصرف انرژی زیاد و باقی ماندن مواد حاصل از واکنش در آب، در مرحله آزمایشگاهی بودن، سخت بودن آماده‌سازی کاتالیست‌ها، شرایط بسیار سخت واکنش و مصرف انرژی بالا بوده‌اند (Rauf and Salman Ashraf, 2009, Yang et al., 2017).

همچنین روش‌هایی مانند اولترافیلتراسیون، اسمز معکوس، جذب توسط کربن فعال، تراشه‌های چوب و سیلیکاژل نیز برای حذف رنگ به کار گرفته شده‌اند. ولی با وجود موفقیت‌های نسبی، از آنجایی که تنها آلودگی را از یک فاز به فاز دیگر منتقل می‌کنند، به روش‌های فراگیری تبدیل نشدند (Randhavane Shrikant, 2019).

امروزه فرایندهای بیولوژیکی به دلیل سهولت در بهره‌برداری و دوستدار محیط زیست بودن، پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی هستند، اما این فرایند به دلیل ویژگی مقاوم به تجزیه بودن رنگ‌ها، کارایی چندانی ندارند. از این رو، توسعه روشی مقرون به صرفه که علاوه بر مصرف انرژی کم، کارایی زیادی در حذف آلاینده‌های رنگ‌زا از آب داشته و همچنین شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر آن، موضوع اصلی این پژوهش شد. کاویتاسیون از جمله تکنیک‌هایی است که به دلیل قابلیت کنترل ساده‌تر، مصرف کم انرژی، سهولت کاربرد در مقیاس



و اختلاف فشار مایع در دو طرف آن ایجاد می‌شوند (Sarc et al., 2017, Jain et al., 2014).

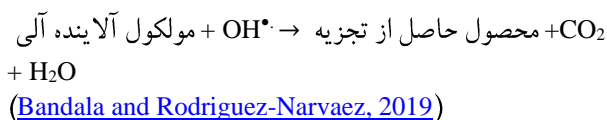
افزایش سرعت در گلوگاه سبب کاهش در فشار محلی می‌شود و زمانی که این فشار به پایین‌تر از سطح فشار بخار اشباع برسد، تعداد زیادی از این حفره‌ها در سیال ایجاد خواهد شد. با حرکت سیال به سمت پایین‌دست و بازتر شدن جت‌های سیال شکل گرفته، فشار بازیابی و به دنبال آن حباب‌ها به صورت پیوسته و مسلسل‌وار در پایین‌دست جزء تولیدکننده کائیتاسیون و در ناحیه‌ای که فشار افزایش پیدا کرده است، دچار زوال و فروپاشی می‌شوند (Gogate and Pandit, 2005, Wang et al., 2008).

زوال و فروپاشی حفره‌ها منجر به شکل‌گیری شرایط فوق بحرانی محلی و ناحیه‌ای با دمای ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بار که به نقاط داغ<sup>۱</sup> مشهور است، می‌شود. انرژی زیاد ناشی از فروپاشی و زوال حفره‌های (حباب‌ها) ایجاد شده طی فرایند کائیتاسیون، امکان تجزیه مؤثر طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی و حتی میکرواورگانسیم‌ها را فراهم می‌آورد. حذف این آلاینده‌ها از محیط به واسطه تجزیه حرارتی ناشی از قرارگیری مولکول آلاینده در مجاورت همین نقاط داغ به وقوع می‌پیوندد (Jyoti and Pandit, 2004, Didenko et al., 1999).

در شرایط کائیتاسیون هیدرودینامیک، مکانیسم اصلی دیگر تجزیه آلاینده‌ها، به اکسایش آنها توسط رادیکال‌هایی (غالباً رادیکال‌های هیدروکسیل) که در محیط تشکیل می‌شوند مربوط می‌شود (Gagol et al., 2020). علاوه بر این شوک‌های حاصل از موج ایجاد شده و پالس‌های فشاری ناشی از فروپاشی حفره‌ها، قدرت و توانایی شکست مولکول‌ها و حتی بازآرایی زنجیره‌های شکسته شده را خواهد داشت (Saharan et al., 2011).



(3)



<sup>1</sup> Hotspots

صنعتی، بهره‌برداری پیوسته از سیستم و تولید رادیکال‌های آزاد فعال، به‌منظور شکست ترکیب‌های پیچیده آلی و آلاینده‌های مقاوم به تجزیه بیولوژیکی، در تصفیه آب مورد توجه قرار گرفته است (Wang et al., 2020).

در این پژوهش، بررسی کاملی از فرایند کائیتاسیون هیدرودینامیکی با هدف بهینه‌یابی پارامترهای عملیاتی (فشار ورودی، دما، pH و زمان گردش در سیستم) با توجه به میزان کارایی حذف رنگ انجام شد.

در مورد پیشینه این روش باید بیان کرد تاکنون تجزیه رنگ ۲-کلروفنول در آب از طریق روش کائیتاسیون اکوستیک بررسی شده است و فروپاشی بیشتر و سریع‌تر این ماده در pH معادل ۳ نسبت به pH معادل ۱۱ حاصل شده که دلیل این رخداد به حالت مولکولی این ماده در شرایط اسیدی، مربوط دانسته شده است (Ku et al., 1997).

در بررسی اثرات تغییر فشار ورودی بر روند حذف آلاینده‌های آلی طی روش کائیتاسیون هیدرودینامیکی، مشاهده شد که با کاهش عدد کائیتاسیون تا کمتر از ۰/۱۵، کارایی حذف آلاینده صعودی خواهد بود، اما در ادامه سیر نزولی به خود خواهد گرفت (Saharan et al., 2011).

مشابه پژوهش پیش گفته یک بررسی روی تجزیه و فروپاشی KI در محلول آبی انجام و مشخص شد که کارایی حذف با افزایش فشار ابتدا زیاد شده و سپس روند آن کاهش خواهد شد و حداکثر کارایی را در محدوده  $0.15 \leq \text{Ca} \leq 0.25$  تخمین زده است (Senthikumar et al., 2000).

علاوه بر این موارد اثربخشی بهره‌گیری از روش کائیتاسیون هیدرودینامیک در حذف آلاینده آلی دی-نیتروفنول در شرایط دمایی مختلف، بررسی و مشخص شد که بر اثر افزایش دمای محلول ورودی ابتدا کارایی حذف افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند (Tao et al., 2016).

## ۱-۱- فرایند کائیتاسیون

کائیتاسیون را می‌توان پدیده‌ای شامل تشکیل، رشد و فروپاشی حباب‌های ایجاد شده درون سیال تعریف کرد که در نوع هیدرودینامیکی آن، حفره‌ها یا همان حباب‌ها به واسطه عبور سیال از اجزایی از جمله اریفیس یا ونتوری به واسطه انرژی جنبشی سیال



برای اندازه‌گیری فشار در بالادست و پایین‌دست صفحه اریفیس بود (شکل ۱).

لوله مکش پمپ به قسمت تحتانی مخزن نگه‌دارنده و لوله رانش آن به خط توزیع‌کننده جریان میان ۳ شاخه (۲ شاخه اصلی و ۱ شاخه کنارگذر) متصل و در ابتدای ورودی هر شاخه یک شیر برای کنترل میزان جریان و فشار و علاوه بر آن یک شیر نیز در پایین‌دست هر راکتور با هدف کنترل فشار پایین‌دست تعبیه شد. همچنین مسیر کنارگذر برای کنترل فرایند، پایین آوردن فشار سیستم و اختلاط کامل محلول قبل از آغاز به کار راکتور کاویتاسیون در نظر گرفته شد. مسیر برگشت جریان هم از شاخه‌های اصلی و هم شاخه کنارگذر به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شدند که در یک محل و در نقطه‌ای پایین‌تر از سطح تراز مایع به منظور به حداقل رساندن نفوذ هوا در مایع به مخزن وارد شوند. گیج‌های فشار هم در بالادست هر راکتور و هم در پایین‌دست آن با هدف سنجش فشار ورودی و فشار بازیابی شده در پایین‌دست پیش‌بینی و تعبیه شدند، به‌گونه‌ای که سنجش فشار و محاسبه عدد کاویتاسیون در راکتور کاویتاسیون شماره ۱ توسط گیج‌های فشار G1 و G2 و در راکتور کاویتاسیون شماره ۲ توسط گیج‌های فشار G3 و G4 انجام شد. سرعت چرخش پمپ که متناسب با میزان فشار تولیدی آن است توسط یک اینورتر کنترل شد. برای انجام این آزمایش‌ها از یک اریفیس با قطر روزنه ۴ میلی‌متر از جنس استیل ضدزنگ و ضخامت ۲ میلی‌متر بهره‌گیری شد.

## ۲-۲- متیل اورانژ

متیل اورانژ ( $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$ ) یک ماده رنگ‌زای معمول و رایج است که یک شاخص با پایه اسیدی در محلول‌های آبی است (Seije and Tabbiruka, 2016) در این پژوهش از ماده متیل اورانژ با وزن مولکولی ۳۲۷/۲۲ گرم بر مول محصول شرکت مرک<sup>۲</sup> آلمان و با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شد.

به‌منظور بررسی عوامل تأثیرگذار بر روند و کارایی حذف این ماده از جریان آب با استفاده از روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی، در هر مرحله از آزمایش‌ها، مقدار ۰/۲۵ گرم از این ماده ابتدا در ۱ لیتر آب به‌طور کامل حل و سپس به مخزن اصلی پایلوت حاوی ۷۰

ترکیب مکانیسم‌های اکسیدکنندگی رادیکالی هیدروکسیل و اثراتی که فروپاشی و زوال حباب‌ها به دنبال دارند، امکان شکستن مولکول یا اکسید شدن اکثر آلاینده‌های آلی که توسط سایر روش‌های متعارف و متداول قابل حذف نیستند یا کارایی کمی دارند را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، نیروی ایجاد شده ناشی از فروپاشی حفره‌ها، سبب همگن‌سازی بهتر در پایین‌دست اریفیس یا هر نوع ابزار تولیدکننده کاویتاسیون می‌شود که این امر کارایی فرایند اکسیداسیون توسط رادیکال‌های فعال تولید شده را بهبود می‌بخشد (Carpenter et al., 2017, Gagol et al., 2020).

کارایی و اثربخشی این روش تا حد زیادی به میزان رخداد کاویتاسیون (تعداد حفره‌ها) ایجاد شده در راکتور و شدت زوال و فروپاشی حفره‌ها وابسته است که این عوامل به نوبه خود به ژئومتری ابزار تولیدکننده کاویتاسیون و شرایط جریان مایع (آشفتگی و نرخ بازیابی فشار در پایین‌دست)، بستگی دارد. در نتیجه بهینه‌سازی کاویتاسیون هیدرودینامیکی با تعداد حفره‌های ایجاد شده، زمان ماند حفره در زون کم فشار و نرخ بازیابی فشار در پایین‌دست اریفیس<sup>۱</sup> مرتبط خواهد بود (Braeutigam et al., 2012).

## ۲- مواد و روش‌ها

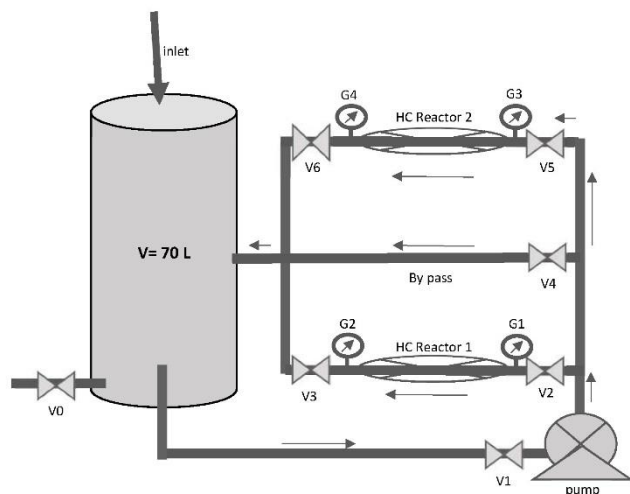
### ۲-۱- پایلوت آزمایشگاهی کاویتاسیون هیدرودینامیکی

پایلوت آزمایشگاهی مورد استفاده شامل صفحه اریفیس به عنوان جزء تولیدکننده کاویتاسیون با قطر روزنه ۴ میلی‌متر، شبکه لوله‌ها به‌صورت بسته و لوپ (یک مسیر اصلی با قطر  $\frac{3}{4}$  اینچ و از جنس فولاد بدون درز و یک مسیر از جنس پلکسی گلس)، مخزن نگه‌دارنده مایع ورودی به سیستم با حجم ۷۰ لیتر از جنس پلی‌اتیلن ۳ جداره به منظور حفظ دمای مایع، پمپ سانتریفیوژ (ساخت کارخانه Pedrollo مدل PQ-3000) با هدف تأمین فشار ورودی موردنیاز و انرژی لازم برای عملکرد کاویتاسیون و همچنین چرخش آب در سیستم، شیرهای کنترلی برای کنترل جریان ورودی به هر مسیر و نیز کنترل فشار در پایین‌دست راکتور کاویتاسیون، شیرهای کنترل جریان خروجی از پمپ، فلج‌ها برای جای‌گذاری صفحات اریفیس و سهولت تعویض آنها، گیج‌های فشاری ۲۵ بار

<sup>2</sup> Merck

<sup>1</sup> Orifice





Reactor No. 1: Steel Cavitation Reactor  
 Reactor No. 2: Plexiglass Cavitation Reactor  
 V0: Sampling/Drainage Valve  
 V2: Inlet Valve to Reactor No. 1  
 V3: Outlet Valve from Reactor No. 1 (Controlling downstream pressure)  
 V4: Bypass Valve  
 V5: Inlet Valve to Reactor No. 2  
 V6: Outlet Valve from Reactor No. 2 (Controlling downstream pressure)  
 G1: Inlet pressure measuring gauge for reactor No. 1 (Upstream)  
 G2: Outlet pressure measuring gauge for reactor No. 1 (Downstream)  
 G3: Inlet pressure measuring gauge for reactor No. 2 (Upstream)  
 G4: Outlet pressure measuring gauge for reactor No. 2 (Downstream)

Fig. 1. Schematic representation of hydrodynamic cavitation reactor set-up

شکل ۱- پایلوت آزمایشگاهی

جدول ۱- ویژگی‌های متیل اورانژ

Table 1. Methyl orange properties

(IUPAC name)	Sodium 4-[(4-dimethylamino) phenyldiazenyl]benzenesulfonate
Chemical formula	$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$
Molar mass	327.33 g/mol
Density	1.28 g/cm <sup>3</sup> (solid)
Melting point	>300 °C (Not precisely defined)
Boiling point	Decomposes
Solubility in water	Soluble

متیل اورانژ در حال نابودی هستند (Yang et al., 2017).

### ۲-۳- آماده‌سازی محلول اولیه ورودی

برای هر مرحله از آزمایش‌ها، مقدار ۰/۲۵ گرم پودر متیل اورانژ در ۱ لیتر آب، حل و پس از یکنواخت شدن به مخزن اصلی پایلوت اضافه شد. همچنین برای توزیع یکنواخت آن در مخزن، به مدت ۱۵ دقیقه پمپ روشن و جریان از طریق مسیر کنارگذر و بدون وارد شدن به راکتور کاویتاسیون جریان و دوباره به مخزن بازگردانده شد. در کلیه مراحل آزمایش از آب شرب شهری به‌عنوان بستر اصلی با pH معادل ۷/۱ استفاده شد.

لیتر آب شرب شهری به‌عنوان بستر اصلی اضافه و محلولی با غلظت آلاینده ۳/۵۲ mg/L تهیه شد. در کلیه مراحل اصلی آزمایش pH معادل ۷/۱ بود.

بر اساس نتایج حاصل از پژوهش برخی پژوهشگران، وجود یک گروه آزو<sup>۱</sup> و حلقه بنزن در مولکول متیل اورانژ منجر به پیک جذب به‌ترتیب در ۲ طول موج ۲۷۰ و ۴۶۴ نانومتر می‌شود. شکل‌گیری پیک در این طول موج‌ها ناشی از وجود گروه‌های کروموفوریک<sup>۲</sup> در ساختار مولکول متیل اورانژ است که با آغاز اکسیداسیون محلول پیک مربوط به ۴۶۴ نانومتر شروع به کاهش می‌کند و این نشان می‌دهد که گروه‌های آزو (-N=N-) در مولکول

<sup>1</sup> Azo

<sup>2</sup> Chromophoric



### ۲-۴- روش انجام آزمایش، نمونه برداری و سنجش نمونه‌ها

در هر مرحله از آزمایش‌ها، محلول اولیه ورودی به مخزن پایلوت اضافه و به مدت ۱۵ دقیقه جریان به وسیله پمپ و از طریق مسیر کنارگذر دوباره به مخزن بازگردانده شد تا اختلاط به خوبی انجام شود. پس از پیش راه‌اندازی اولیه، مسیر کنارگذر بسته و جریان در خط اصلی و با شرایط تعیین شده (فشار، pH و دما) وارد راکتور کاویتاسیون و در مقاطع زمانی صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ دقیقه از شیر تحتانی مخزن نمونه‌گیری انجام شد. در این پژوهش اثر پارامترهای فشار ورودی (در محدوده ۰/۵ تا ۶/۵ بار)، زمان ماند یا تعداد دفعات گردش در سیستم (به دلیل بسته بودن تا ۱۳۵ دقیقه گردش در سیستم)، غلظت آلاینده ورودی (در ۲ مقدار ۲ میلی‌گرم در لیتر و ۳/۳ میلی‌گرم در لیتر)، دما (در ۴ مقدار ۸، ۲۲، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس و pH محلول (در شرایط اسیدی، خنثی و قلیایی) به صورت مجزا بررسی شد. همچنین کنترل پارامتر فشار به‌طور پیوسته توسط گنج‌های فشاری نصب شده در بالادست و پایین دست راکتور کاویتاسیون، دما توسط دماسنج نصب شده داخل مخزن اصلی و pH توسط محیط به‌وسیله دستگاه pH Meter ساخت شرکت ATC چین انجام شد.

غلظت آلاینده متیل اورانژ بر اساس تغییرات میزان جذب قابل محاسبه بود که میزان و درصد حذف رنگ نمونه‌ها در این پژوهش به‌وسیله دستگاه اسپکتوفتومتر Shimadzu (مدل UV mini 1240) با استفاده از کالیبراسیون در طول موج ۴۶۴ نانومتر سنجش، ارزیابی و به دنبال آن درصد حذف ماده آلاینده از آب از این طریق مشخص شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- شرایط هیدرولیکی راکتور کاویتاسیون

برای تولید کاویتاسیون هیدرودینامیکی در این پژوهش از یک صفحه اریفیس با قطر روزنه ۴ میلی‌متر که ساختاری ساده و اثرات حفره‌زایی قوی‌تری نسبت به ونتوری ایجاد می‌کند، استفاده شد (Balasundaram and Harrison, 2011, Yang et al., 2017).

فشار ورودی (P1) به وسیله تنظیم دور موتور پمپ از طریق کانورتر انجام شد. همچنین با توجه به لزوم اختلاط جریان در مخزن، بخشی از جریان از مسیر کنارگذر به صورت مستقیم و بدون عبور از راکتور کاویتاسیون به مخزن برگردانده شد. جریان در خط

اصلی با لحاظ شرایط جریان در پایین دست راکتور توسط شیر تعبیه شده قابل تنظیم و به‌گونه‌ای است که با تغییر فشار در پایین دست که منجر به تغییر عدد کاویتاسیون می‌شود، در پایین دست شرایط کاویتاسیون در راکتور قابل ایجاد است. عدد کاویتاسیون، عدد بی‌بعدی است که برای تعیین شرایط و درجه کاویتاسیون در این سیستم به کار گرفته می‌شود و بر اساس معادله ۴ قابل محاسبه است (Gogate and Pandit, 2000)

$$Ca = \frac{P2 - Pv}{0.5 \rho V0^2} \quad (4)$$

که در آن

Ca عدد کاویتاسیون، P2 فشار بازیابی شده در پایین دست، Pv فشار بخار اشباع مایع، ρ دانسیته مایع و V0 سرعت در روزنه اریفیس است.

افزایش دور پمپ منجر به افزایش فشار و دبی جریان (Q) در خط اصلی می‌شود و با توجه به ویژگی‌های فیزیکی اریفیس، مقدار این افزایش دبی متفاوت و بر اساس معادله ۴ شرایط کاویتاسیونی غیریکسانی برای فشارهای مختلف حاکم خواهد بود. هم‌زمان با افزایش دبی در شاخه اصلی، سرعت در گلوگاه اریفیس افزایش خواهد یافت و به دنبال این افزایش سرعت، عدد کاویتاسیون کاهش خواهد یافت. مشخصات جریان برای اریفیس در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی مربوط به اریفیس (قطر روزنه ۴ میلی‌متر)

Table 2. Orifice hydraulic specifications (Hole size: 4 mm)

Inlet pressure (Bar)	Q (L/s)	Cavitation number (Ca)
0.5	0.0593	4.29
1	0.0969	2.96
1.5	0.124	2.01
2.5	0.164	0.91
3.5	0.197	0.47
4.5	0.225	0.24
5.5	0.249	0.14
6.5	0.272	0.075

همان‌گونه که در جدول ۲ بیان شده است، با افزایش فشار ورودی، دبی جریان افزایش و به دنبال این شرایط سرعت در اریفیس بالا می‌رود و این افزایش سرعت در مقطع اریفیس کاهش عدد کاویتاسیون را سبب می‌شود (معادله ۱).



### ۲-۳- فشار ورودی و آغاز فرایند کائوتاسیون

برای بررسی اثر تغییرات فشار ورودی بر کارایی حذف آلاینده از سیستم و نیز شناسایی بیشترین کارایی ممکن در پایلوت آزمایشگاهی، تعیین فشار ورودی بهینه ضروری است. از این رو بهینه‌یابی عملکرد کائوتاسیون در فشارهای ورودی مختلف بر اساس حداکثر میزان حذف ماده رنگ‌زا از آب طی زمان ماند ۱۳۵ دقیقه انجام شد. همچنین محاسبه عدد کائوتاسیون و به دنبال آن شناسایی نقطه آغاز این فرایند در گرو سنجش فشار بازیابی شده در پایین دست اریفیس برای هر مقدار از فشار ورودی بود. در بازه‌های فشاری ۰/۵ تا ۶/۵ بار، فشار بازیابی شده در پایین دست اریفیس در محدوده ۰/۲ تا ۱ بار تنظیم شد تا بر اساس مشخصات هندسی اریفیس، عدد کائوتاسیون در هر مرحله قابل محاسبه باشد (جدول ۲).

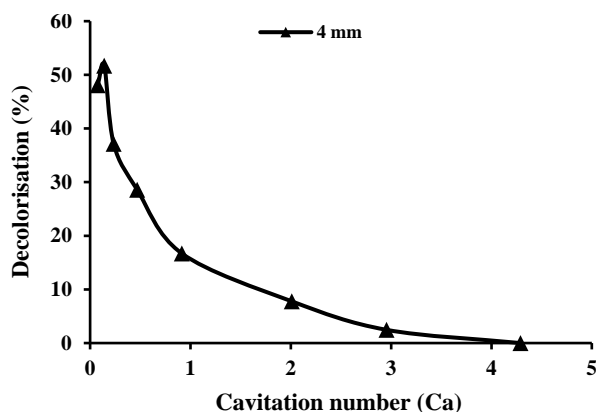
با توجه به فشار ورودی و فشار بازیابی شده در پایین دست و به دنبال آن محاسبه عدد کائوتاسیون، مشاهده شد که با افزایش فشار ورودی از ۰/۵ تا ۶/۵ بار، عدد کائوتاسیون برای اریفیس مورد استفاده از ۴/۲۹ به ۰/۰۷۵ کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی از کاهش عدد کائوتاسیون ناشی از افزایش فشار ورودی در پژوهش‌های سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Chuah et al., 2016).

(Randhavane Shrikant, 2019)

در شکل‌های ۲ و ۳ اثر عدد کائوتاسیون بر میزان حذف ماده آلاینده رنگ‌زا از آب در اریفیس با قطر روزه ۴ میلی‌متر نشان داده شده است. همان گونه که در نمودار مشخص است، تا فشار ۱/۵ بار حذف چندانی در سیستم مشاهده نمی‌شود. اما با افزایش فشار و عبور آن از ۲/۵ بار کارایی حذف افزایش پیدا می‌کند. در این فشار عدد کائوتاسیون حدود ۱ است، اما با توجه به روند حذف می‌توان این گونه برداشت کرد که از عدد کائوتاسیون ۱/۳، روند حذف آلاینده آغاز خواهد شد.

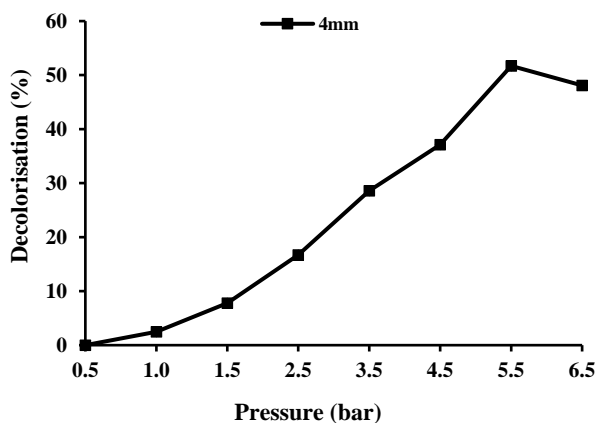
بهینه‌یابی عملکرد کائوتاسیون در این مرحله بر اساس حداکثر میزان حذف ماده رنگ‌زا از آب در بازه فشارهای ورودی اشاره شده طی زمان ماند ۱۳۵ دقیقه انجام شد. نتایج نشان داد که با کاهش عدد کائوتاسیون تا مقدار ۰/۱۴، حذف آلاینده افزایش می‌یابد و به ۵۱/۷ درصد می‌رسد و در ادامه، کارایی حذف روند کاهشی پیدا می‌کند.

مشاهدات طی این روند مشخص می‌کند که با کاهش عدد



**Fig. 2.** Effect of cavitation number on the degradation rate of Methyl Orange (MO)

شکل ۲- اثر عدد کائوتاسیون در میزان حذف ماده رنگ‌زای متیل اورانژ



**Fig. 3.** Effect of inlet pressure on the degradation rate of Methyl Orange (MO)

شکل ۳- کارایی حذف ماده رنگ‌زای متیل اورانژ نسبت به فشار ورودی

کائوتاسیون حفره‌های بیشتری در راکتور تشکیل و در شرایط بهینه‌تری دچار زوال و فروپاشی می‌شوند (قابل مشاهده در خط متشکل از لوله پلکسی گلس) که در نتیجه منجر به شکل‌گیری رادیکال‌های فعال بیشتر هیدروکسیل در محیط و در نهایت کارایی بالاتر حذف آلاینده می‌شوند.

با ادامه روند نزولی عدد کائوتاسیون و عبور مقدار آن از نقطه بحرانی کارایی حذف آلاینده کاهش می‌یابد که علت آن حمل حفره‌های ایجاد شده (حباب‌ها) به سمت پایین دست و فرار آنها از راکتور بدون زوال و فروپاشی هستند. در نتیجه با کاهش فروپاشی حفره‌ها و حرکت آنها به سمت پایین دست، رادیکال‌های



نمونه‌برداری‌های انجام شده در بازه‌های زمانی ۴۵ دقیقه‌ای، کارایی حذف متیل اورانژ از سیستم افزایش و بعد از این نقطه فشاری، با افزایش فشار، کارایی کمی ثابت و سپس کاهش پیدا می‌کند. به این ترتیب محدوده فشاری ۵ تا ۶ بار (با توجه به شکل ۳) فشار بهینه برای دستیابی به بیشترین کارایی حذف ماده آلاینده متیل اورانژ در این چیدمان هستند.

نکته قابل توجه در مورد شکل ۲ (کارایی حذف متیل اورانژ از آب) این است که اولاً حتی در شرایط عدم آغاز کاویتاسیون و به تبع آن عدم حضور رادیکال‌های فعال نیز درصد کمی حذف ماده آلاینده انجام خواهد شد که پیش‌بینی می‌شود به دلیل افزایش تنش‌های برشی ناشی از عبور سیال از اریفیس به وقوع پیوسته باشد. ثانیاً آغاز روند حذف ماده آلاینده را می‌توان در محدوده عدد کاویتاسیون حدود ۱/۳ تا ۱/۴ دانست.

### ۳-۳- زمان ماند در سیستم (دفعات گردش در راکتور)

در این پژوهش تجزیه آلاینده آلی متیل اورانژ با روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی، آزمایش و بررسی شد که به دلیل بسته بودن سیستم، محلول ورودی با توجه به زمان ماند در سیستم برای چندین مرتبه رخداد کاویتاسیون را تجربه کرد.

ارتباط میان تجزیه و حذف ماده آلاینده و زمان واکنش (زمان ماند) با فشار ورودی ۲/۵ تا ۶/۵ بار، در دمای ۲۲ درجه سلسیوس و شرایط خنثی (pH معادل ۷/۱) طی ۱۳۵ دقیقه در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که با افزایش زمان ماند، تعداد دفعات گردش سیال در سیستم افزایش و به دنبال آن کارایی حذف آلاینده از آب زیاد می‌شود. این افزایش کارایی به علت برخورد بیشتر مولکول‌ها با حفره‌های فروپاشی شده و به دنبال آن تماس بیشتر با موج‌های شوک ایجاد شده و رادیکال‌های فعال هیدروکسیل به عنوان عامل اکسیدکننده است.

مقایسه کارایی حذف آلاینده نشان داد که نمودار در ۴۵ دقیقه ابتدایی دارای شیب تندتر که حاکی از سرعت حذف در این بازه است، می‌باشد و به مرور زمان از شیب آن کاسته و کارایی حذف با شیب ملایم‌تری افزایش می‌یابد.

هیدروکسیل کمتری ایجاد شده و شرایط خفگی کاویتاسیون<sup>۱</sup> رخ می‌دهد. در این حالت به محض پر شدن مجرای پایین دست اریفیس از حفره (حباب)، این حفره‌ها شروع به ادغام شدن با هم و تشکیل حباب‌های بزرگتر را می‌دهند و به عبارتی حالتی شبیه ابر کاویتاسیونی را ایجاد می‌کنند. این حباب‌های بزرگ بدون فروپاشی و زوال از سیال خارج و یا بدون رسیدن به اندازه بحرانی دچار فروپاشی می‌شوند. در این حالت حرکت سیال به سمت پایین دست با حداقل فروپاشی حفره‌ها انجام می‌شود که در هر حالت کارایی کاویتاسیون و به دنبال آن کارایی رنگ‌زدایی را کاهش می‌دهد. در این آزمایش تقریباً تا فشار ۵/۵ بار، هیچ ابر کاویتاسیونی مشاهده نمی‌شود. اما با افزایش فشار ورودی بیش از این مقدار، ابر کاویتاسیونی ایجاد و تعداد حفره‌ها در پایین دست اریفیس به قدری افزایش پیدا می‌کند که بخش قابل توجهی از مجرای پایین دست از حفره‌ها پر می‌شود که با ادغام شدن برخی از آنها، شاهد فرار حباب از راکتور کاویتاسیون خواهیم بود (شرایط سوپرکاویتاسیون در شکل ۴).

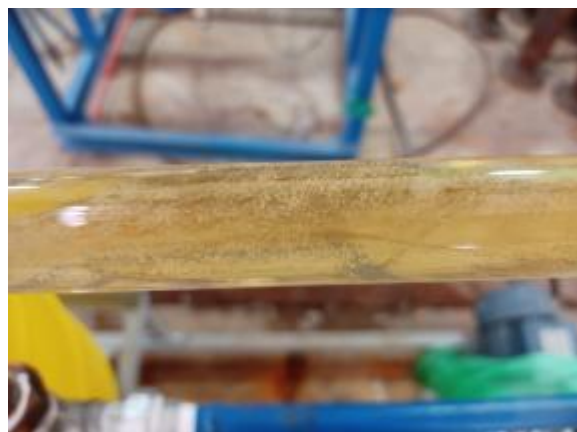


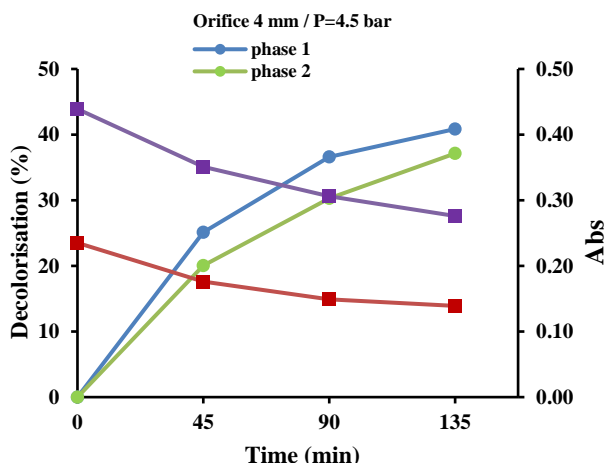
Fig. 4. Supercavitation phenomenon in greater than 5.5 bar

شکل ۴- سوپرکاویتاسیون در فشار بیشتر از ۵/۵ بار

در نهایت می‌توان گفت بر اساس نتایج حاصل شده که در شکل ۲ مشخص است، در اریفیس با قطر روزنه ۴ میلی‌متر از فشار ۲ بار فرایند کاویتاسیون و روند حذف ماده آلاینده آلی از آب آغاز می‌شود. با افزایش فشار ورودی تا ۵/۵ بار و بر اساس

<sup>1</sup> Choked





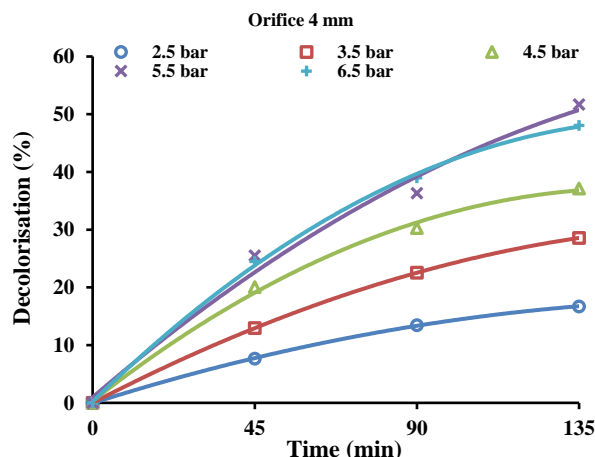
**Fig. 6.** Effect of initial concentration on the degradation rate of MO Phase 1)  $C_0=2\text{mg/L}$  and Phase 2)  $C_0=3.3\text{ mg/L}$

شکل ۶- اثر غلظت آلاینده ورودی بر کارایی حذف آلاینده متیل اورانژ Phase 2)  $C_0=3.3\text{ mg/L}$  و Phase 1)  $C_0=2\text{mg/L}$

بار و دمای ۲۲ درجه سلسیوس  $37/13$  درصد در مدت ۱۳۵ دقیقه بود که با کاهش دمای محلول تا ۸ درجه سلسیوس کارایی در همین شرایط به  $30/2$  درصد کاهش پیدا کرد. با افزایش دمای محلول ورودی تا ۳۰ درجه کارایی حذف ماده رنگزا به  $39/4$  درصد افزایش پیدا کرد، پس از آن و در دمای ۴۰ درجه، کارایی تا ۳۵ درجه کاهش پیدا کرد.

همچنین در فشار ورودی  $6/5$  بار، تغییرات دمایی باعث کاهش کارایی تا ۳۴ درصد و افزایش تا  $48/74$  درصد شد که مشابه شرایط قبل مجدداً با افزایش دما تا ۴۰ درجه، میزان کارایی روند نزولی به خود گرفت.

موضوع دیگر در مورد نتایج حاصل شده در این بخش این بود که در شرایط دمایی پایین (۸ درجه سلسیوس) در طی ۱۳۵ دقیقه انجام هر آزمایش (۳ بازه ۴۵ دقیقه‌ای)، برخلاف انجام آزمایش در دمای ۲۲، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس، در ۹۰ دقیقه ابتدایی روند حذف بسیار کند بود که این روند در بازه ۹۰ تا ۱۳۵ دقیقه سرعت بیشتری نسبت به قبل پیدا کرد. روند مشاهده شده در تغییرات کارایی حذف ماده آلاینده متیل اورانژ نسبت به تغییرات دما را این گونه می‌توان توضیح داد که دمای محلول روی فشار بخار اشباع مایع اثرگذار است (Gogate and Pandit, 2004).



**Fig. 5.** Effect of retention time (circulation) on the degradation rate of MO in different inlet pressure

شکل ۵- اثر زمان ماند (گردش در سیستم) در سیستم بر میزان حذف ماده رنگزای متیل اورانژ در فشارهای مختلف ورودی

### ۳-۴- اثر غلظت اولیه ماده آلاینده

به منظور بررسی اثر غلظت اولیه بر میزان و کارایی تجزیه و حذف آلاینده از آب، محلول ورودی به سیستم با  $0/15$  گرم پودر متیل اورانژ ساخته (غلظت ۲ میلی‌گرم در لیتر) و با اریفیس با قطر روزنه ۴ میلی‌متر و در فشار  $4/5$  بار به مدت ۱۳۵ دقیقه آزمایش شد. نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج به دست آمده از مرحله قبل در همین شرایط ( $3/3$  میلی‌گرم در لیتر) مقایسه شد (شکل ۶).

نتایج حاصل از آزمایش‌ها که در شکل ۶ نشان داده شده است مشخص می‌کند در یک شرایط یکسان دارای غلظت کمتر، کارایی بالاتر خواهد بود. این در حالی است که در غلظت اولیه آلاینده بالاتر، سرعت حذف رنگ بیشتر خواهد بود. با اینکه ممکن است بعد از گذشت زمان بیشتر، کارایی حذف ماده رنگزا در هر دو آزمایش نزدیک باشند، اما غلظت اولیه بیشتر، نرخ سریع‌تر حذف آلاینده را به همراه خواهد داشت.

### ۳-۵- دما

برای تعیین اثر دمای محلول ورودی بر کارایی حذف آلاینده، آزمایش در چهار دمای ۸، ۲۲، ۳۰ و ۴۰ درجه و در شرایط pH معادل  $7/1$  و فشارهای ورودی  $4/5$  و  $6/5$  بار انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده (شکل ۷) کارایی در فشار ورودی  $4/5$



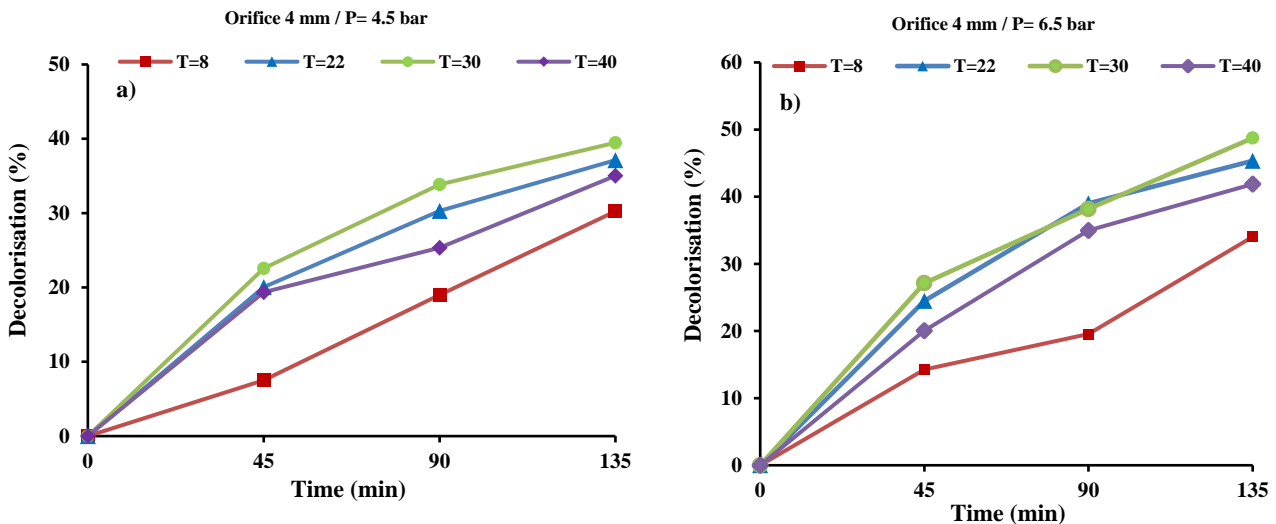


Fig. 7. Effect of solution temperature on the degradation rate of MO, a) P=4.5 bar and b) P=6.5 bar

شکل ۷- اثر دمای محلول ورودی بر کارایی حذف آلاینده متیل اورانژ a) P=4.5 bar و b) P=6.5 bar

این، بر اساس نظریه جنبشی، افزایش دمای محلول باعث تشدید حرکات مولکولی می‌شود که این حرکات مولکولی تسریع اکسیداسیون شیمیایی بین عوامل اکسیدکننده و مولکول‌های آلاینده را به دنبال خواهد داشت. همچنین افزایش دما، افزایش سرعت واکنش رادیکال‌های هیدروکسیل و میزان برخورد (بین مولکول‌های آلاینده و رادیکال‌ها) را بالا می‌برد. در نهایت می‌توان بیان کرد، دما بر سرعت حذف ماده آلاینده از آب طی روند کایتاسیون هیدرودینامیکی اثرگذار است، به نحوی که با افزایش دمای محلول ورودی، کارایی حذف ماده آلاینده ابتدا افزایش و در ادامه روند کاهشی به خود می‌گیرد.

### ۳-۶- pH

pH محلول به دلیل احتمال اثرگذاری بر خواص شیمیایی محلول و محل احتمالی ماده حل‌شونده، پارامتر مهمی در تعیین اثربخشی کایتاسیون هیدرودینامیکی است (Amin et al., 1997, Ku et al., 2010, Kotronarou et al., 1991).

در این پژوهش، تأثیرگذاری pH بر میزان حذف ماده آلاینده متیل اورانژ با استفاده از روش کایتاسیون هیدرودینامیکی در دو مقدار ۴/۵ و ۹/۵ برای اریفیس با قطر روزنه ۴ میلی‌متر آزمایش شد. به دلیل خاصیت تغییر رنگ این ماده در  $pH \leq 4$ ، آزمایش شرایط اسیدی در  $pH=4.5$  انجام شد (شکل ۹). اندازه‌گیری اولیه

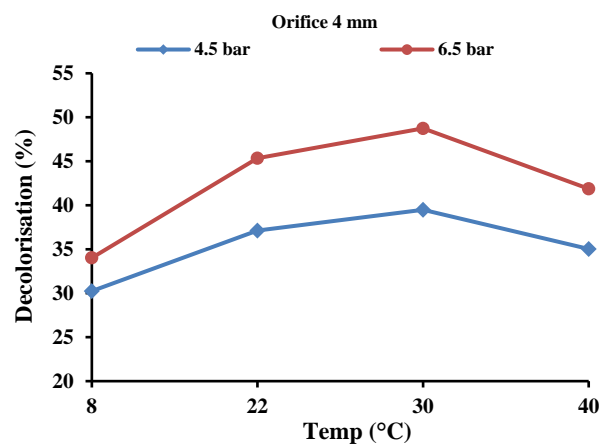


Fig. 8. Comparison of degradation rate of MO in temperature range 8°C to 40°C

شکل ۸- مقایسه کارایی حذف ماده آلاینده در بازه دمایی

۸ تا ۴۰ درجه سلسیوس

بر اساس جداول استاندارد، افزایش دمای محلول منجر به افزایش فشار بخار اشباع می‌شود. بر اساس نتایج حاصل شده (شکل ۸) از آنجایی که در فرایند کایتاسیون انتظار این است فشار بعد از صفحه اریفیس با فرض وقوع کایتاسیون به زیر فشار بخار کاهش پیدا کند، از این رو با افزایش دمای محلول ورودی به راکتور، فشار بخار اشباع افزایش، در روند کایتاسیون فشار راحت‌تر به این میزان کاهش پیدا می‌کند. بنابراین با افزایش دمای محلول ورودی، کارایی تجزیه و حذف آلاینده متیل اورانژ افزوده می‌شود. علاوه بر



کارایی تجزیه آلاینده آلی اثرگذار باشد. این موضوع عمدتاً به دلیل امکان تولید رادیکال‌های اضافی به واسطه ترکیب مجدد یون‌ها و شکل‌گیری گونه‌های جدید رادیکال‌ها یا به واسطه از بین بردن یا خنثی کردن رادیکال‌های آزاد اکسیدکننده در واکنش با یون‌های غیر آلی باشد که در هر دو حالت می‌تواند منجر به افزایش یا کاهش کارایی حذف آلاینده هدف شود.

نتایج نشان داد اثر pH بر کارایی تجزیه و حذف آلاینده متیل اورانژ در شرایط اسیدی کمی بهتر از شرایط خنثی است. ولی در شرایط قلیایی کارایی حذف نسبتاً کاهش پیدا می‌کند. دلیل این موضوع ساختار مولکولی ماده متیل اورانژ در شرایط اسیدی و قلیایی است. جهت‌گیری مولکول آلاینده تا حد زیادی به وضعیت مولکول چه به صورت مولکولی و چه به صورت یونی وابسته است. در مورد این ماده آلاینده افزایش نرخ رنگ‌زدایی و تخریب مولکول‌های آن در محیط با pH کمتر را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که مولکول ماده رنگ‌زا در pH کم به شکل مولکولی باقی می‌ماند و بنابراین به دلیل ماهیت آب‌گریزی می‌توانند راحت‌تر وارد محدوده فصل مشترک گاز = آب حفره‌ها (حباب‌ها) شده و در معرض حمله رادیکال‌های هیدروکسیل و همچنین تجزیه حرارتی قرار گیرد. در شرایط قلیایی نیز حالت یونی ماده رنگ‌زا حاکم است و از این رو نمی‌تواند به فاز گازی و یا سطح مشترک گاز = آب در مجاورت حفره‌های ایجاد شده در آید. در این شرایط تجزیه و تخریب ماده آلاینده فقط توسط حمله رادیکال‌های هیدروکسیل و در بستر مایع رخ می‌دهد و این دلیل اصلی پایین‌تر بودن میزان رنگ‌زدایی در شرایط قلیایی نسبت به شرایط اسیدی است. در شرایط عادی و خنثی نیز مولکول ماده رنگ‌زا یونیزه<sup>۱</sup> و به دنبال آن آب‌دوست می‌شود که در محیط مایع باقی می‌ماند (شکل ۱۰).

در نهایت این گونه می‌توان بیان کرد که تجزیه این آلاینده با روش کائیتاسیون هیدرودینامیکی در شرایط اسیدی به دلیل محیط مناسب برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل نتایج مطلوب‌تری دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از روش کائیتاسیون هیدرودینامیکی برای حذف رنگ از آب روشی کارآمد

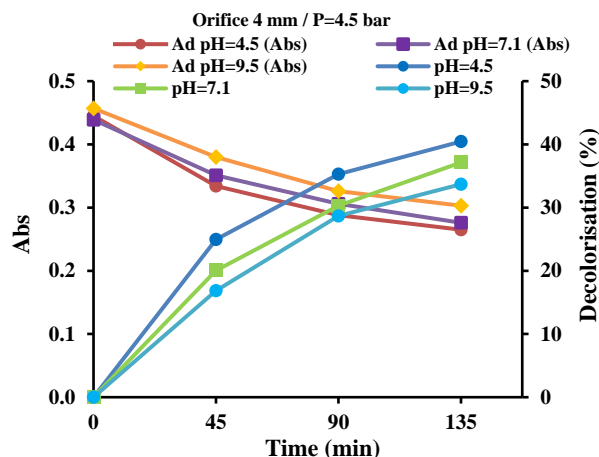


Fig. 9. Effect of solution pH on degradation rate of MO (pressure 4.5 bar)

شکل ۹- اثر pH بر کارایی حذف ماده رنگ‌زای متیل اورانژ در فشار ورودی ۴/۵ بار

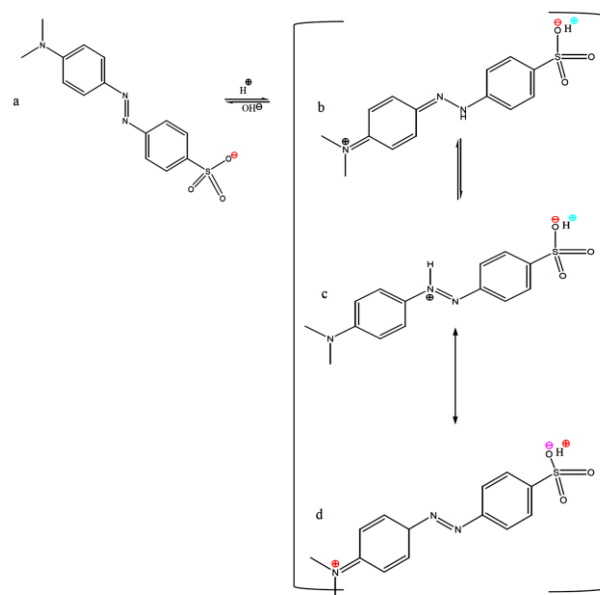


Fig. 10. Alkaline form of Methyl orange (a) and its mono-protonated zwitterionic structures under acidic conditions (b, c and d)

شکل ۱۰- ساختار مولکول متیل اورانژ در شرایط قلیایی (a)

ساختارهای زویتریونی تک پروتونه در شرایط اسیدی (b, c, d)

رنگ محلول ورودی در این مرحله پس از اضافه کردن ماده متیل اورانژ به مخزن اصلی و اختلاط کافی آن انجام شد. این نکته قابل ذکر است که در این پژوهش، به نوع اسید یا قلیای استفاده شده برای تنظیم pH محلول توجهی نشد، زیرا نوع آن می‌تواند روی

<sup>1</sup> Ionized



مولکول‌ها با حفره‌های فروپاشی شده و به دنبال آن تماس بیشتر با موج‌های شوک ایجاد شده و رادیکال‌های فعال هیدروکسیل به‌عنوان عامل اکسیدکننده بود. همچنین مشخص شد که بخش عمده ماده رنگ‌زای قابل حذف در ۶۰ دقیقه ابتدایی تجزیه می‌شوند.

علاوه بر فشار ورودی، عدد کاویتاسیون و زمان ماند، پارامترهای غلظت آلاینده ورودی، دما و pH نیز بر نحوه و روند حذف آلاینده از آب مؤثر است. نتایج این پژوهش نشان داد در شرایط یکسان کارایی حذف آلاینده با غلظت کمتر، بالاتر خواهد بود. ولی در غلظت اولیه بیشتر، سرعت حذف رنگ زیادتر خواهد بود و با اینکه ممکن است بعد از گذشت زمان بیشتر، کارایی حذف ماده رنگ‌زا در هر دو آزمایش نزدیک باشند، اما غلظت اولیه بیشتر، نرخ سریع‌تر حذف آلاینده را به همراه خواهد داشت.

مشابه پژوهش انجام شده پیرامون بررسی نحوه اثرگذاری دما بر حذف آلاینده متیل اورانژ با این روش، در شرایط فشار ورودی ۴/۵ و ۶/۵ بار مشخص شد طی هر دو شرایط به دلیل اثرپذیری فشار بخار اشباع مایع از دما، کارایی با کاهش دما، کمتر و با افزایش آن بیشتر می‌شود. اما با افزایش دما فراتر از ۳۵ درجه سلسیوس، روند افزایشی متوقف و کارایی مجدداً روند کاهش پیدا می‌کند (Tao et al., 2016).

همچنین حذف آلاینده متیل اورانژ از آب با روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی نسبت به pH محلول حساس و سیستم در pH کمتر به دلیل محیط مناسب برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و نیز ساختار یونی متیل اورانژ در محیط اسیدی و ورود به فصل مشترک گاز-مایع حفره‌ها عملکرد بهتری در حذف آلاینده از آب دارد که این روند در پژوهش‌های دیگر نیز مشاهده شده بود (Ku et al., 1997, Saharan et al., 2011).

مکانیسم‌های اصلی تجزیه و شکست مولکول ماده آلاینده در این روش تجزیه حرارتی / پیرولیز مولکول‌های آلاینده محبوس شده در داخل حفره (حباب) و یا در نزدیکی حفره در حین زوال و فروپاشی حفره و دوم واکنش رادیکال‌های هیدروکسیل ( $\text{OH}^\bullet$ ) با مولکول‌های آلاینده در سطح مشترک حفره / آب و یا در بستر مایع (آب) رخ می‌دهد، است که پژوهش (Bandala and Rodriguez- Narvaez, 2019) نیز صحت این موضوع را نشان می‌دهد.

این بررسی نشان داد که حداکثر کارایی کاویتاسیون در یک سیستم از طریق در نظر گرفتن کلیه پارامترهای اثرگذار در این

است که بدون باقی گذاشتن محصولات جانبی، توانایی تجزیه و حذف این آلاینده از آب را دارد. در این پژوهش، اثر پارامترهای مختلف عملکردی از جمله فشار ورودی (عدد کاویتاسیون)، زمان ماند (دفعات گردش در سیستم)، دما، غلظت اولیه آلاینده و pH بر کارایی حذف آلاینده رنگ‌زای متیل اورانژ تحت شرایط مختلف کاویتاسیون مقایسه و بررسی شد.

با توجه به محدوده فشار ورودی مورد آزمایش و عدد کاویتاسیون این نتیجه به‌دست آمد که با افزایش فشار ورودی از ۰/۵ تا ۶/۵ بار، تا فشار ۱/۵ بار حذف چندانی در سیستم مشاهده نشد، اما با افزایش فشار و عبور آن از ۲/۵ بار کارایی حذف افزایش پیدا کرد. حداکثر کارایی حذف در فشار ۵/۵ بار (عدد کاویتاسیون ۱۴/۰) و برابر ۵۱/۷ درصد بود و پس از آن کارایی روند کاهش پیدا کرد که علت آن پدیده سوپرکاویتاسیون و حمل حفره‌های ایجاد شده (حباب‌ها) به سمت پایین‌دست و فرار آنها از راکتور بدون زوال و فروپاشی بود. نتایج بررسی‌های انجام شده دیگر نیز افزایش قابل توجه کارایی در سیستم کاویتاسیون در عددهای کاویتاسیون کمتر از ۱۵/۰ و روند افزایشی و در ادامه کاهش کارایی بر اثر افزایش فشار ورودی سیستم را نشان داده‌اند (Saharan et al., 2011, Senthilkumar et al., 2000, Sivakumar and Pandit, 2002).

در این آزمایش تقریباً تا فشار ۵/۵ بار، هیچ ابر کاویتاسیونی مشاهده نشد، ولی با افزایش فشار ورودی بیش از این مقدار، ابر کاویتاسیونی ایجاد و تعداد حفره‌ها در پایین‌دست اریفیس افزایش پیدا کرد. همچنین با توجه به روند حذف، در عدد کاویتاسیون ۱/۳ کاویتاسیون ایجاد و روند حذف آلاینده آغاز خواهد شد. اصلی‌ترین پارامتر مؤثر بر کارایی کاویتاسیون در این روند، جدای از ژئومتری اریفیس‌ها، عدد کاویتاسیون است که نقش تعیین‌کننده‌ای در آغاز این روند دارد.

در مورد سایر پارامترهای بهره‌برداری و عملکردی از این سیستم، ارتباط میان تجزیه و حذف ماده آلاینده و زمان واکنش (زمان ماند) در فشارهای ورودی ۲/۵ تا ۶/۵ بار و در دمای ۲۲ درجه سلسیوس و شرایط خنثی (pH معادل ۷/۱) طی ۱۳۵ دقیقه آزمایش و مشخص شد با افزایش زمان ماند، تعداد دفعات گردش سیال در سیستم افزایش و به دنبال آن کارایی حذف آلاینده از آب افزایش پیدا می‌کند که این افزایش کارایی به علت برخورد بیشتر



روند و به صورت همه جانبه قابل دستیابی است و فقط با در نظر گرفتن یک پارامتر نمی توان توضیح مناسبی برای نتایج حاصل شده ارائه داد.

## ۵- قدردانی

این پژوهش در دانشکده عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی (پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور) انجام شد. نویسندگان، از اساتید و به خصوص آزمایشگاه جامع آب و فاضلاب دانشکده و همچنین آزمایشگاه جامع آب و فاضلاب شرکت آب و فاضلاب استان تهران که در انجام این پژوهش یاری رساندند، قدردانی می کنند. امید است تلاش ها موجب بهبود سطح رفاه جامعه شود.

## References

- Amin, L. P., Gogate, P. R., Burguess, A. E. and Bremner, D. H., 2010. Optimization of a hydrodynamic cavitation reactor using salicylic acid dosimetry. *Chemical Engineering Journal*, 156, 165-169. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.043>.
- Balasundaram, B. and Harrison, S., 2011. Optimizing orifice geometry for selective release of periplasmic products during cell disruption by hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal*, 54, 207-209. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.03.002>.
- Bandala, E. R. and Rodriguez-Narvaez, O. M., 2019. On the nature of hydrodynamic cavitation process and its application for the removal of water pollutants. *Air, Soil and Water Research Journal*, 12, <https://doi.org/10.1177/1178622119880488>.
- Braeutigam, P., Franke, M., Schneider, R. J., Lehmann, A., Stolle, A. and Ondruschka, B., 2012. Degradation of carbamazepine in environmentally relevant concentrations in water by Hydrodynamic-Acoustic-Cavitation (HAC). *Water Research*, 46(7), 2469-2477. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.013>.
- Carpenter, J., George, S. and Saharan, V. K., 2017. Low pressure hydrodynamic cavitating device for producing highly stable oil in water emulsion: effect of geometry and cavitation number. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 116, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.02.013>.
- Chuah, L. F., Yusup, S., Abd Aziz, A. R., Bokhari, A. and Abdullah, A. Z., 2016. Cleaner production of methyl ester using waste cooking oil derived from palm olein using a hydrodynamic cavitation reactor. *Journal of Cleaner Production*, 112(5), 4505-4514. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.112>.
- Didenko, Y. T., McNamara, W. B. and Suclick, K. S., 1999. Hot spot conditions during cavitation in water. *Journal of the American Chemical Society*, 121(24), 5817-5818. <https://doi.org/10.1021/ja9844635>.
- Gągól, M., Cako, E., Fedorov, K., Darvishi Cheshmeh Soltani, R., Przyjazny, A. and Boczkaj, G., 2020. Hydrodynamic cavitation based advanced oxidation processes: studies on specific effects of inorganic acids on the degradation effectiveness of organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, 307, 113002. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113002>.
- Gogate, P. R. and Pandit, A. B., 2000. Engineering design methods for cavitation reactors II: hydrodynamic cavitation. *AIChE Journal*, 46(8), 1641-1649. <https://doi.org/10.1002/aic.690460815>.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(03\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00032-7).
- Gogate, P. R. and Pandit, A. B., 2005. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(1-2), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.03.007>.



- Haji, Sh., Benstaali, B. and Al-Bastaki, N., 2011. Degradation of methyl orange by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process. *Chemical Engineering Journal*, 168, 134-139. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.12.050>.
- Jain, T., Carpenter, J. and Saharan, V. K., 2014. CFD analysis and optimization of circular and slit venturi for cavitation activity. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, 1, 28-33. [\[Link\]](#)
- Jyoti, K. and Pandit, A. B., 2004. Effect of cavitation on chemical disinfection efficiency. *Water Research*, 38(9), 2249-2258. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.02.012>.
- Kotronarou, A., Mills, G. and Hoffmann, M. R., 1991. Ultrasonic irradiation of p-nitrophenol in aqueous solution, *Chemistry Physics Journal*, 95(9), 3630-3638. <https://doi.org/10.1021/j100162a037>.
- Ku, Y., Chen, K. Y. and Lee, K. C., 1997. Ultrasonic destruction of 2-chlorophenol in aqueous solution. *Water Research*, 31(4), 929-935. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00372-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00372-7).
- Mancuso, G., Langone, M. and Andreottola, G., 2020. A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18, 311-333. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00444-5>.
- Marto, J., Marcos, P. S., Trindade, T. and Labrincha, J. A., 2009. Photocatalytic decolouration of Orange II by ZnO active layers screen-printed on ceramic tiles. *Journal of Hazardous Material*, 163, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.056>.
- Randhavane Shrikant, B., 2019. Comparing geometric parameters of a hydrodynamic cavitation process treating pesticide effluent. *Environmental Engineering Research*, 24(2), 318-323. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.227>.
- Rauf, M. A. and Salman Ashraf, S., 2009. Fundamental principles and application of heterogeneous photocatalytic degradation of dyes in solution. *Chemical Engineering Journal*, 151 (1-3), 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.02.026>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.018>.
- Šarc, A., Stepišnik-Perdih, T., Petkovšek, M. and Dular, M., 2017. The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.020>.
- Sejie, F. and Tabbiruka, M. N., 2016. Removal of Methyl Orange (MO) from water by adsorption onto Modified Local Clay (Kaolinite). *Physical Chemistry*, 6(2), 39-48. <https://doi.org/10.5923/j.pc.20160602.02>.
- Senthilkumar, P., Sivakumar, M. and Pandit, A. B., 2000. Experimental quantification of chemical effects of hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering Science*, 55(9), 1633-1639. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00435-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00435-2).
- Sivakumar, M. and Pandit, A. B., 2002. Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique. *Ultrasonics Sonochemistry*, 9(3), 123-131. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(01\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00122-5).
- Tao, Y., Cai J., Huai X., Liu B. and Guo Z., 2016. Application of hydrodynamic cavitation to wastewater treatment. *Chemical Engineering Technology*, 39, 1363-1376. <https://doi.org/10.1002/ceat.201500362>.



- Wang, Ch., Jin, R., He, Z., Qiao, Y., Wang, Y., Wang, K., et al., 2020. A new water treatment technology for degradation of B[a]A by hydrodynamic cavitation and chlorine dioxide oxidation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61, 104834. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104834>.
- Wang, X., Yao, Z., Wang, J., Guo, W. and Li, G., 2008. Degradation of reactive brilliant red in aqueous solution by ultrasonic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(1), 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.01.008>.
- Yang, S., Jin, R., He, Z., Shi, Sh., Qiao, Y., Kong, W., et al., 2017. An experimental study on the degradation of methyl orange by combining hydrodynamic cavitation and chlorine dioxide treatments. *Chemical Engineering Transactions*, 59, 289-294. <https://doi.org/10.3303/CET1759049>.
- Zhang, Y., Li, R., Li, X., Yang, Y., Chen, P., Dong, F., et al., 2018. Possible effects and mechanisms of ultrasonic cavitation on oxide inclusions during direct-chill casting of an al alloy. *Metals*, 8, 814. <https://doi.org/10.3390/met8100814>.



© The Author(s)

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