



A Review on the Application of Hydrodynamic Cavitation Method in Combination with Other Advanced Oxidation Processes for Dye Removal

M. Poorbaba¹, M. Soleimani^{2*}

1- Ph. D. Student of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)

2- Associate Professor of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)

Email: soleimanim@aut.ac.ir

Abstract

Until now, various chemical treatments (oxidation and electrochemical destruction), biological treatments (microbial cultures and anaerobic bioremediation systems) and physical treatments (such as adsorption and ion exchange) have been proposed to remove dyes as one of the most important water pollutants. In this study, hydrodynamic cavitation (bubble formation in a liquid) was considered as a new method for dye removal. The important advantages of this method are no need to use chemicals, low energy consumption and the ability to combine with other advanced oxidation processes. A literature review on dye removal focusing on combination with other advanced oxidation processes indicated that orifice plates and venturi tubes are often used and less than 2 h (in optimum operating conditions) more than 80% of dye was removed. Also, factors such as device geometry, inlet pressure, operating temperature, pH and liquid properties (like vapor pressure, viscosity and surface tension) are effective parameters in this process. The results of previous works imply excellent efficiency of this method in combination with other processes and methods such as Fenton, photocatalytic, ozonation, aeration and presence of various metal and non-metallic ions in the reaction medium. Also, flexibility in designing and combining with advanced oxidation processes, depend on the purpose, are another major and important advantages for replacing this method with conventional methods in the near future.

Received: 27 August 2022

Accepted: 14 January 2023

Page Number: 71-89

Keywords:

Treatment,
Dye removal,
Water,
Wastewater,
Hydrodynamic Cavitation

Please Cite this Article Using:

Poorbaba, M., & Soleimani, M. (2024). A Review on the Application of Hydrodynamic Cavitation Method in Combination with Other Advanced Oxidation Processes for Dye Removal. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(130), 71-89, [In Persian].



مروری بر کاربرد روش کاویتاسیون هیدرودینامیک در ترکیب با سایر فرایندهای اکسایش پیشرفته برای حذف رنگ

محمد پوربابا^۱، منصوره سلیمانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

پیام نگار: soleimanim@aut.ac.ir

چکیده

تاکنون روش‌های مختلف شیمیایی (اکسایش و تخریب الکتروشیمیایی)، بیولوژیکی (حذف با زیست توده میکروبی و سامانه‌های بی‌هوازی) و فیزیکی (مانند جذب سطحی و مبادله یونی) برای حذف رنگ‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های آب پیشنهاد شده که در این مطالعه روش کاویتاسیون هیدرودینامیک (ایجاد حباب در یک مایع) به‌عنوان روشی نوین انتخاب شده است. از ویژگی‌های بارز این روش می‌توان به بی‌نیازی از استفاده مواد شیمیایی، مصرف انرژی کم و قابلیت ترکیب آسان با سایر روش‌های حذف رنگ اشاره کرد. بررسی پیشینه مطالعات پژوهشی در زمینه حذف رنگ با استفاده از ترکیب فرایند کاویتاسیون هیدرودینامیک با سایر فرایندهای اکسایش پیشرفته نشان داد که اغلب از اورفیس و ونتوری برای تولید حباب در سامانه استفاده و در مدت زمان کمتر از ۲h و در شرایط بهینه عملیاتی بیش از ۸۰٪ از رنگ حذف شده است. عواملی مانند شکل هندسی حباب‌ساز، فشار ورودی، دمای عملیاتی، pH و خواص مایع مانند فشار بخار، گرانروی و کشش سطحی بر فرایند تصفیه مؤثر هستند. نتایج کارهای پیشین بیانگر بازدهی بسیار مناسب این روش در ترکیب با سایر فرایندها و روش‌ها مانند فنتون، فتوکاتالیستی، از ندهی، هوادهی و حضور انواع یون‌های فلزی و غیرفلزی در محیط واکنش است. همچنین انعطاف‌پذیری در طراحی و ترکیب با سایر فرایندهای اکسایش پیشرفته بسته به هدف و نیاز محل کاربرد از دیگر برتری‌های اصلی و مهم برای جای‌گزینی این روش با روش‌های مرسوم امروزی در آینده نزدیک است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴
شماره صفحات: ۷۱ تا ۸۹

کلیدواژه‌ها:

تصفیه،
حذف رنگ،
آب،
پساب،
کاویتاسیون هیدرودینامیک

* تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

پوربابا، محمد، و سلیمانی، منصوره. (۱۴۰۲). مروری بر کاربرد روش کاویتاسیون هیدرودینامیک در ترکیب با سایر فرایندهای اکسایش پیشرفته برای حذف رنگ، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۲(۱۳۰)، ۷۱-۸۹.

۱. مقدمه

بیولوژیکی و فیزیکی برای حذف رنگ به ترتیب در جدول‌های (۱-۳) خلاصه شده است [۱،۴]. در این مقاله روش کایتاسیون هیدرودینامیک به عنوان یک روش نو برای حذف رنگ بررسی شده است. روش کایتاسیون در یک مایع می‌تواند برپایه روش تولید حباب به انواع نوری، ذره‌ای، هیدرودینامیک و صوتی^۱ تقسیم شود. در بین این روش‌ها، کایتاسیون هیدرودینامیک و صوتی توانایی قابل قبولی برای انجام واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی دارند [۵].

رنگ‌ها از عوامل شیمیایی آلوده‌کننده آب هستند و اغلب در گروه آلاینده‌های آلی قرار می‌گیرند [۱] و به دلیل تجزیه‌پذیری سخت، اثرات منفی برای محیط زیست دارند. پساب‌های صنایعی مانند نساجی، چاپ و کاغذ معمولاً حاوی این نوع آلاینده است [۲]. روش‌های مختلفی برای حذف رنگ وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در یکی از گروه‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی، صوتی، تشعشعی و الکتریکی قرار داد [۳-۴]. برتری‌ها و کاستی‌های روش‌های مختلف شیمیایی،

جدول ۱. برتری‌ها و کاستی‌های روش‌های شیمیایی حذف رنگ.

Table 1. Advantages and disadvantages of chemical methods for dye removal.

Methods	Advantages	Disadvantages
Oxidation	Simplicity of use	Activation of oxidant agent
Fenton	Suitable chemical reagent	Sludge production
Ozonation	Applicable in gaseous state Does not increase the volume of sewage or sludge	Short half-life (20 min)
Photochemical	No sludge production Greatly foul odors reduction	Formation of by-products
Chlorination (such as NaOCl)	Cleavage of azo-bond	Release of aromatic amines
Electrochemical Destruction	No chemicals consumption and sludge production	Decrease in dye removal (in relatively high flow rates)

جدول ۲. برتری‌ها و کاستی‌های روش‌های بیولوژیکی حذف رنگ.

Table 2. Advantages and disadvantages of biological methods for dye removal.

Methods	Advantages	Disadvantages
Dye removal by fungi	Degradation of dyes (by produced enzymes)	Unreliability of enzyme production
Microbial cultures (mixed bacterial)	Dye removal in 24 – 30 h	Not metabolization of azo dyes under aerobic conditions
Adsorption by microbial biomass (living or dead)	Affinity of certain dyes to bind with microbial species	Not applicable for all dyes
Anaerobic bioremediation systems	Degradation of azo and water-soluble dyes	Methane and hydrogen sulfide production in anaerobic breakdown

1. Acoustic

جدول ۳. برتری‌ها و کاستی‌های روش‌های فیزیکی حذف رنگ.

Table 3. Advantages and disadvantages of physical methods for dye removal.

Methods	Advantages	Disadvantages
Adsorption with activated carbon	Applicable for wide variety of dyes	Too expensive
Membrane filtration	Applicable for all dye types	Expensive and concentrated sludge production
Ion exchange	Regeneration of ion exchange	Not applicable for all dyes
Irradiation	Effective oxidation at lab scale	High dissolved O ₂ consumption
Coagulation	Cost effective	High Sludge Production

می‌توانند باعث انجام فرایند اکسایش شوند [۷]. طراحی ساده، امکان استفاده در ابعاد صنعتی، مصرف انرژی کمتر و پایین بودن هزینه‌های جانبی و نگهداری در روش کاویتاسیون هیدرودینامیک نسبت به راکتورهای سونوشیمیایی و سایر روش‌ها، کاربرد آن را به‌عنوان روشی نوین و کارآمد در کنار روش‌های دیگر برای افزایش کارایی فرایند تصفیه، ممکن می‌سازد [۶،۷].

در روش کاویتاسیون هیدرودینامیک باید به میزان مصرف انرژی توجه کرد. مشخصه‌ای به‌نام بازده کاویتاسیون^۳ تعریف شده که نشان‌دهنده میزان رنگ حذف‌شده بر میزان انرژی مصرفی (mg J⁻¹) است. طبق نتایج قبلی، بازده کاویتاسیون برای فرایند حذف رنگ در روش کاویتاسیون هیدرودینامیک به‌مراتب بیشتر از روش کاویتاسیون صوتی است (جدول (۴)) و همین موضوع روش کاویتاسیون هیدرودینامیک را در گروه فرایندهای مقرون‌به‌صرفه از نظر مصرف انرژی و مؤثر در حذف رنگ قرار می‌دهد [۱۳-۸].

فرایند کاویتاسیون هیدرودینامیک توانایی مناسبی برای تصفیه آلاینده‌ها دارد؛ ولی گاهی استفاده تنها از این سامانه سرعت مناسبی برای حذف آلاینده‌ها ندارد. در این شرایط، این فرایند با دیگر فرایندهای اکسایش پیشرفته (AOPs) ترکیب می‌شود تا عوامل اکسیدکننده بیشتری تولید شود. مهم‌ترین مواردی که تاکنون استفاده شده عبارت است از افزودن H₂O₂ و Fe²⁺ به‌عنوان کاتالیست. به‌دلیل دما و فشار موضعی موجود درون راکتور، بخشی از H₂O₂ می‌تواند به رادیکال‌های OH تبدیل شود. ترکیب یون Fe²⁺ (به‌عنوان کاتالیست) با H₂O₂ باعث تولید مقادیر بیشتر رادیکال‌های OH در pH پایین می‌شود [۵،۷،۱۴].

کاویتاسیون هیدرودینامیک در یک مایع می‌تواند با عبور سیال از یک گلوگاه^۱ مثل اوریفیس و ونتوری به‌آسانی انجام شود. زمانی که مایع در حال عبور از گلوگاه است، سرعت سیال (انرژی جنبشی) به‌واسطه کاهش فشار، افزایش می‌یابد. اگر افت فشار در گلوگاه به‌اندازه‌ای باشد که فشار موضعی مایع پایین‌تر از حد فشار برای ایجاد حباب شود (معمولاً این حد برابر فشار بخار مایع در دمای عملیاتی است)، میلیون‌ها حباب ایجاد خواهد شد. در ادامه با عبور مایع از گلوگاه و افزایش قطر مجرا، فشار بازیابی و حباب‌های تولیدی به‌اصطلاح دچار فروپاشی^۲ شده، از بین می‌روند [۵،۶]. با بازیابی فشار و فروپاشی حباب‌ها، شرایط موضعی سختی با دمای ۱۰۰۰ - ۱۰۰۰ K، فشار ۵۰۰۰ - ۱۰۰ bar و سرعت میکروجت در حدود ۱۰۰ m s⁻¹ ایجاد می‌شود. در نتیجه این شرایط، برخی از رادیکال‌های آزاد به‌شدت واکنش‌دهنده مثل HO₂، HOO·، H·، OH⁻ و H₂O₂ تولید می‌شوند که این رادیکال‌ها توانایی انجام واکنش تخریب و شکستن پیوندهای مولکول‌های رنگ را دارند [۵،۷]. به همین دلیل، از چنین دیدگاهی می‌توان این روش را در گروه روش‌های اکسایش پیشرفته قرار داد.

از دیدگاهی دیگر سازوکار تخریب آلاینده‌ها در این روش به سه گونه مکانیکی (مثل تنش برشی)، شیمیایی (مثل رادیکال‌های آزاد) و حرارتی (مثل نقاط داغ) تفسیر می‌شود که ناشی از فروپاشی حباب‌ها است. میزان تنش برشی حاصل به‌اندازه‌ای زیاد است که می‌تواند پیوند کربن-کربن را تخریب و مولکول‌های آلی بزرگ را به اجزای سبک‌تر تبدیل کند. هم‌چنین شکسته‌شدن پیوندها می‌تواند در نقاط داغ موجود رخ دهند. در نهایت رادیکال‌های تولیدی ناشی از شکسته‌شدن مولکول‌های بخار آب به دام افتاده در داخل حباب‌ها،

1. Constriction
2. Collapse

3. Cavitation Yield

جدول ۴. بازده کاویتاسیون برای فرایندهای کاویتاسیون صوتی و هیدرودینامیک.

Table 4. The cavitation yield for acoustic and hydrodynamic cavitation.

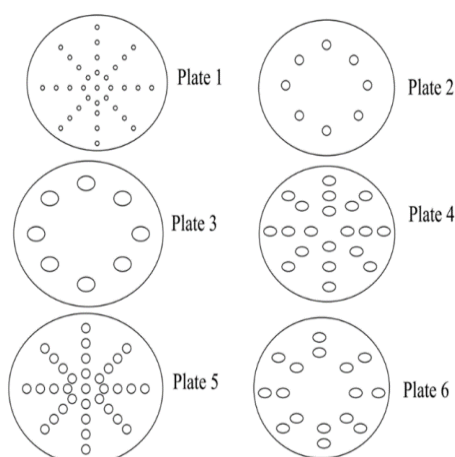
Reference	Dye	Cavitation yield	
		Acoustic	Hydrodynamic
[13]	Rhodamine B	2.93×10^7	49.5×10^7
[10]	Reactive brilliant red K-2BP	1.70×10^7	2.88×10^6
[12]	Acid red 88	2.73×10^5	3.59×10^4
[8]	Orange acid-II	2.50×10^5	8.08×10^5
	Brilliant green	2.68×10^6	8.75×10^6

بیشتر فرایند کاویتاسیون هیدرودینامیک انجام دادند. در این کار از رنگ Rhodamine B با غلظت $5-6 \mu\text{g mL}^{-1}$ به عنوان آلاینده مدل استفاده شد. شش نوع صفحه اوریفیس (شکل (۱)) برای تولید حباب در این سامانه بررسی شد که در هر نوع از این قطعات قطر سوراخها برابر و بین مقادیر ۵ - ۱ mm متغیر بود. همچنین از یک پمپ سانتریفیوژ با توان ۵/۵ kW برای تأمین فشار ۳۰ psig استفاده و تمامی آزمایشها در بازه دمایی $35-40^\circ\text{C}$ انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که برای صفحات با قطر خارجی یکسان، صفحه دارای سوراخهایی با قطر کمتر مناسبتر است (صفحه شماره ۱) و می توان برای افزایش کارایی تعداد سوراخها را افزایش داد. با استفاده از صفحه شماره ۱ و پس از گذشت ۲۵۰ گذر، میزان حذف رنگ حدود ۹۰٪ شد.

۲. پژوهشهای پیشین در زمینه ترکیب روش کاویتاسیون هیدرودینامیک با سایر فرایندهای اکسایش با توجه به مطالعات پیشین، کاویتاسیون هیدرودینامیک اغلب با عبور مایع از یک اوریفیس، ونتوری و چرخاندن آن حول یک محور مرکزی ایجاد شده است. در برخی مواقع این سامانه به تنهایی عمل کرد مناسبی در حذف آلایندهها ندارد، بنابراین در این مقاله، پیشینه کارها بر پایه نوع سامانه حباب ساز طبقه بندی و گزارش شده و تمرکز بر پژوهشهایی است که از روشهای مختلف سعی بر افزایش بازدهی کاویتاسیون هیدرودینامیک داشته اند. با هدف مرور کلی پیشرفت و بهبود این فرایند، خلاصه ای از پیشینه کارها در جدول (۵) آمده است.

۱-۲ تصفیه رنگ با سامانه حباب ساز بر پایه اوریفیس

سیواکومار و پاندیت [۱۵] در سال ۲۰۰۲، پژوهشی را با هدف معرفی



شکل ۱. اوریفیسهای حباب ساز کاربردی سیواکومار و پاندیت [۱۵].

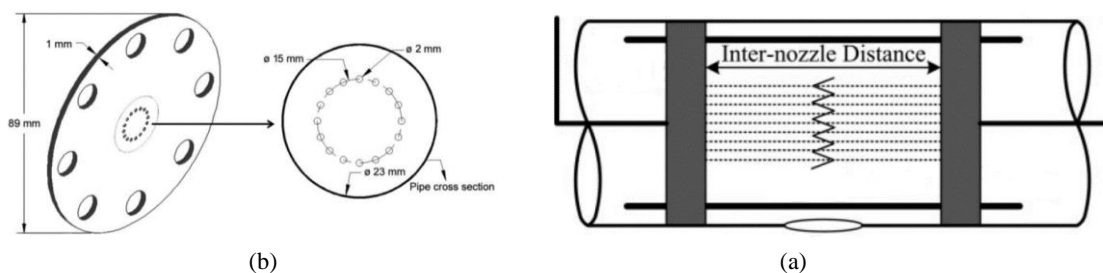
Figure 1. The Orifice used by Sivakumar and Pandit [15].

با فرایند کایتاسیون، از متانول با غلظت $1 - 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ استفاده شد که تسخیرکننده^۱ رادیکال OH است. یکی از مشکلات نانوذرات صفر ظرفیتی فلزی، توده شدن آنها حین فرایند است که باعث کاهش سرعت فرایند می شود. نتایج نشان داد که کایتاسیون هیدرودینامیک مانع از توده ای شدن این ذرات می شود و سرعت واکنش را تا مقادیر چشم گیری افزایش می دهد. در این پژوهش اثرات عوامل مهمی شامل فشار ورودی ($0.5 - 0.2 \text{ MPa}$)، pH اولیه محلول ($12 - 3$) و غلظت نانوذرات مس ($140 - 10 \text{ mg L}^{-1}$) بررسی شد. نتایج نشان داد که فشار بهینه (0.4 MPa) و غلظت بهینه برای نانوذرات مس (40 mg L^{-1}) است و در pH اسیدی ($\text{pH} = 3$) رنگ زدایی بهتر انجام می شود. در شرایط بهینه و پس از گذشت 20 min ، حدود 85% از رنگ حذف شد.

در سال ۲۰۱۷ بتی و همکاران [۱۸] با استفاده از روش کایتاسیون هیدرودینامیک و ترکیب آن با یک ستون جذب حاوی هیدروژل های پلیمری، حذف رنگ Crystal violet را با غلظت 500 mg L^{-1} بررسی کردند. از اوریفیس با قطر داخلی 1 mm و قطر خارجی 125 mm به عنوان قطعه حباب ساز استفاده شد. مقدار فشار ورودی در بازه $7 - 1.5 \text{ bar}$ ، با یک پمپ plunger با توان $1/5 \text{ HP}$ تأمین شد. در این کار، اثر مشخصه های عملیاتی مثل فشار ورودی ($7 - 1.5 \text{ bar}$)، غلظت بنتونیت در ساختار جاذب ها ($1 - 0.5 \text{ g}$) برای هر آماده سازی، میزان جاذب مصرفی در ستون جذب ($40 - 10 \text{ g}$)، pH محلول ($10 - 2/3$) و شدت جریان ورودی به بستر جاذب در حالت هیرید شده با سامانه کایتاسیون هیدرودینامیک ($31/5 - 22 \text{ L h}^{-1}$) بررسی شد. براساس نتایج، در کمترین غلظت بنتونیت در جاذب ها،

در سال ۲۰۱۳ بصیری پارسا و ابراهیمزاده [۱۶] پژوهشی را با عنوان بهینه سازی یک راکتور برخوردی با بیش از یک جفت جت مایع برای حذف رنگ Rhodamine B (با غلظت 5 mg L^{-1}) انجام دادند. در این پژوهش از دو قطعه دایره ای شکل سوراخ دار یکسان با فاصله ای مشخص از هم به عنوان حباب ساز (شکل (۲)) استفاده شد. یک پمپ سانتریفیوژ با توان $5/5 \text{ kW}$ برای تأمین فشار ورودی 5 bar و یک پمپ هوا با ظرفیت $2 \times 200 \text{ L h}^{-1}$ برای هوادهی استفاده شد. برای اثربخشی فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک از هوادهی و میکرو ذرات آهن صفر ظرفیتی با غلظت $70 - 0 \text{ mg L}^{-1}$ در محلول رنگ با غلظت 5 mg L^{-1} استفاده شد. در همه آزمایش ها دما 25°C بود. مشخص شد که حضور کاتالیست آهن بازده فرایند رنگ زدایی را بیش از پنج برابر افزایش داده و غلظت بهینه آن 50 mg L^{-1} بود. براساس نتایج، برخوردی بودن نوع راکتور و هوادهی مایع، بازده فرایند را به ترتیب 16% و 19% افزایش داد. هم چنین فاصله 10 cm بین نازل ها مقدار بهینه این متغیر عملیاتی بود که در شرایط بهینه و در مدت زمان 2 h ، میزان رنگ زدایی حدود 80% شد.

لی و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵، برای حذف رنگ Methyl orange (غلظت میانگین 10 mg L^{-1}) در دمای 20°C از یک شیر اوریفیس به عنوان حباب ساز استفاده کردند. فشار ورودی به این قطعه در بازه $0.5 - 0.2 \text{ MPa}$ تنظیم شد که این فشار با پمپ سانتریفیوژ با توان 0.37 kW تأمین شد. برای اثربخشی فرایند از نانوذرات صفر ظرفیتی مس با غلظت $200 - 20 \text{ mg L}^{-1}$ در 10 mg L^{-1} از رنگ استفاده شد. برای نشان دادن تولید رادیکال OH



شکل ۲. (a) راکتور برخوردی (b) صفحه اوریفیس حباب ساز کاربردی بصیری پارسا و ابراهیمزاده [۱۶].

Figure 2. (a) The impinging reactor (b) The orifice plate used by Basiri Parsa and Ebrahimzadeh [16].

در ابتدا فرایند فتوکاتالیستی با در نظر گرفتن اثر مشخصه‌های عملیاتی مختلف مثل محدوده pH (۱۱-۳)، غلظت دی‌اکسید نانو تیتانیوم ($200-50 \text{ mg L}^{-1}$)، توان پرتو دهی ($60-15 \text{ W}$) و غلظت اولیه رنگ ($100-30 \text{ mg L}^{-1}$) روی فرایند رنگ‌زدایی بهینه‌سازی شد. سپس با ترکیب فرایند فتوکاتالیستی و کایتاسیون هیدرودینامیک، غلظت دی‌اکسید نانو تیتانیوم بهینه‌سازی شد. براساس نتایج، میزان مصرف دی‌اکسید نانو تیتانیوم برای رسیدن به نتیجه مشابه در شرایط عملیاتی یکسان از 100 mg L^{-1} به $8/4 \text{ mg L}^{-1}$ کاهش یافت. در شرایط $\text{pH} = 3$ ، غلظت دی‌اکسید نانو تیتانیوم 100 mg L^{-1} ، توان پرتو دهی 60 W و غلظت اولیه رنگ 30 mg L^{-1} ، پس از گذشت ۲ h، درصد حذف ۸۳/۱۷ شد.

در ادامه کار قبلی، ارباب و همکاران [۲۱] پژوهشی را با هدف بهینه‌سازی و مقایسه فرایندهای منفرد (فتوکاتالیستی، فتولیز و جذب) و ترکیبی با استفاده از کایتاسیون هیدرودینامیک انجام دادند. در این کار مشخصه‌های عملیاتی pH، غلظت TiO_2 ، توان پرتو دهی و غلظت رنگ بهینه‌سازی شدند. دما 30°C و زمان انجام آزمایش‌ها ۲ h بود. محدوده مشخصه‌های عملیاتی مهم مانند غلظت فتوکاتالیست $200-50 \text{ mg L}^{-1}$ ، توان پرتو دهی $60-15 \text{ W}$ ، pH در محدوده ۱۱-۳ و غلظت اولیه رنگ $100-30 \text{ mg L}^{-1}$ بود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که کاهش pH باعث بهبود فرایند حذف رنگ می‌شود. لازم به ذکر است که در فرایند فتولیز تنظیم pH روی ۱۱، باعث بهبود بیشتر فرایند حذف رنگ نسبت به pH اسیدی شد. هم‌چنین افزایش غلظت TiO_2 (تا میزان بهینه) و توان پرتو دهی باعث بهبود فرایند حذف، اما افزایش غلظت اولیه رنگ باعث کاهش میزان حذف شد. ترکیب فرایند فتوکاتالیستی با کایتاسیون هیدرودینامیک با میزان حذف رنگ ۸۳/۱۷٪ در شرایط عملیاتی $\text{pH} = 3$ و غلظت TiO_2 برابر 100 mg L^{-1} ، توان پرتو دهی 60 W و غلظت اولیه رنگ 30 mg L^{-1} ، موثرترین فرایند بود.

در سال ۲۰۲۰ عسکرنیا و همکاران [۲۲] با ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک و واکنشگر فنتون حذف رنگ Congo red (غلظت 4 mg L^{-1}) را مطالعه کردند. از یک اوریفیس با قطر داخلی ۴ mm و قطر لوله ۳۰ mm و یک پمپ سانتریفیوژ با توان ۵/۵ HP استفاده شد. در تمامی آزمایش‌ها فشار و دما برابر ۶ bar و 40°C بود. در این کار، اثر pH اولیه محلول (۱۰-۳)، غلظت H_2O_2

pH محلول و دبی حجمی، درصد حذف رنگ بیشترین است. هم‌چنین در حالتی که از سامانه کایتاسیون هیدرودینامیک به‌تنهایی استفاده شد، درصد حذف رنگ و TOC به‌ترتیب برابر ۲۰ و ۱۷ است؛ اما در حالت استفاده هم‌زمان از کایتاسیون هیدرودینامیک و ستون جذب، در $\text{pH} = 2/3$ درصد حذف رنگ و TOC به‌ترتیب به ۹۶ و ۷۰ افزایش یافت.

در سال ۲۰۱۸ سورش کومار و همکاران [۱۹] تصفیه یک پساب حاوی سه رنگ Methyl orange، Methylene blue و Rhodamine B را مطالعه کردند. تصفیه این پساب به‌کمک فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک و بهبود با فرایندهای اکسایش پیشرفته شامل H_2O_2 ، واکنشگر فنتون، توفنتون، نور UV (250 W) و فرایند فتوکاتالیستی ($\text{UV} + \text{TiO}_2$) انجام شد. از یک اوریفیس با قطر داخلی ۲ mm و یک پمپ جابه‌جایی مثبت با توان ۲ HP استفاده شد. در اغلب آزمایش‌ها غلظت اولیه محلول (حاوی هم‌زمان سه رنگ) ۳۰ ppm، فشار ورودی ۸-۲ bar، دما 30°C و $\text{pH} = 2$ بود. اثر مشخصه‌های مختلف شامل فشار ورودی ($8-2 \text{ bar}$)، pH اولیه محلول (۹-۲)، غلظت H_2O_2 ($1:50$ dye: $\text{H}_2\text{O}_2 \text{ M}$)، غلظت $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2$ ($1:10$ M) و فتوکاتالیست TiO_2 (200 mg L^{-1}) بر فرایند رنگ‌زدایی بررسی شد. در شرایط بهینه (فشار ورودی ۶ bar و $\text{pH} = 3$) و پس از ۴۰ min، در حالت ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک با H_2O_2 (dye: H_2O_2 ۱:۴۰) و 100% رنگ‌زدایی، در حالت ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک با واکنشگر فنتون ($1:30 \text{ FeSO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$) و کایتاسیون هیدرودینامیک با توفنتون به‌ترتیب ۹۸/۲۸٪ و ۹۸/۲۸٪ رنگ‌زدایی مشاهده شد. هم‌چنین بیشترین اثر هم‌افزایی مربوط به حالت ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک و H_2O_2 با مقدار ۲۸/۹۷٪ بود.

ارباب و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۹، برای حذف رنگ Reactive black 5 (غلظت 30 mg L^{-1}) در دمای 30°C ، فرایندهای کایتاسیون هیدرودینامیک و فتوکاتالیستی (کاتالیست دی‌اکسید نانو تیتانیوم) را ترکیب کردند. در این پژوهش، از یک اوریفیس به قطر داخلی ۷ mm و فشار ورودی ۴ bar برای تولید حباب استفاده شد. فشار سامانه با یک پمپ با توان ۱/۶ kW تأمین و از چهار لامپ UV-C با توان ۱۵ W برای پرتو دهی استفاده شد.

$(0-1000 \text{ mg L}^{-1})$ و غلظت FeSO_4 ($0-50 \text{ mg L}^{-1}$) بر فرایند رنگ‌زدایی مطالعه شد. نتایج نشان داد که تغییرات pH بیشترین اثر را روی فرایند رنگ‌زدایی دارد و با کاهش pH درصد حذف رنگ افزایش می‌یابد. بیشترین میزان حذف رنگ (70%) در ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک و واکنشگر فنتون و در شرایط عملیاتی غلظت H_2O_2 برابر 1000 mg L^{-1} ، غلظت FeSO_4 برابر 25 mg L^{-1} و pH اولیه محلول برابر ۳ پس از گذشت ۱ h حاصل شد. هم‌چنین ضریب هم‌افزایی فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک و واکنشگر فنتون برابر $3/22$ گزارش شده‌است.

در سال ۲۰۲۱ بتی و همکاران [۲۳] تصفیهٔ پساب صنعتی نساجی با مشخصات $\text{pH} = 8/3$ ، $\text{TOC} = 1430 \text{ mg L}^{-1}$ ، $\text{COD} = 2574 \text{ mg L}^{-1}$ و $\text{TDS} = 3303 \text{ mg L}^{-1}$ را با ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک با فرایند فنتون و نانو فیلتراسیون غشای سرامیکی مطالعه کردند. از یک اوریفیس با قطر سوراخ 1 mm استفاده و غشای سرامیکی بعد از آن قرار داده شد. اثر متغیرهای عملیاتی نظیر فشار ورودی ($2/5-9 \text{ bar}$)، کاتالیست فنتون و غلظت H_2O_2 ($1-4 \text{ mg L}^{-1}$) بررسی شد. افزایش فشار ورودی به حساب‌ساز بیشتر از 7 bar باعث ایجاد ابر کایتاسیونی شد که اثر منفی روی شدت فروپاشی حساب‌ها دارد. در شرایط بهینهٔ عملیاتی (فشار ورودی = 7 bar ، فشار انتقالی غشا = 2 bar ، غلظت $\text{H}_2\text{O}_2 = 2 \text{ mg L}^{-1}$ و غلظت کاتالیست فنتون $0/28 \text{ g L}^{-1}$) و پس از گذشت ۳ h مقدار $58/85\%$ کاهش در TOC مشاهده شد. هم‌چنین ضریب هم‌افزایی در حالت بهینه $1/12$ بود.

زامپتا و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۲۱، تصفیهٔ محلول رنگی با درجهٔ صنعتی و پساب جوهر را با استفاده از فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک بررسی کردند. محلول رنگی با درجهٔ صنعتی از ۵ رنگ مشکی، قرمز، زرد، سبز و آبی با غلظت‌های در محدودهٔ $6/6 - 3/6 \text{ mg L}^{-1}$ در $0/3 \text{ OD}^1$ و $13/1 - 7/2 \text{ mg L}^{-1}$ در $0/6 \text{ OD}$ ، میزان COD کل در محدودهٔ $64-123 \text{ mg L}^{-1}$ و $\text{pH} = 7/5 \pm 0/5$ بود. هم‌چنین پساب جوهر چاپ پس از رقیق‌سازی دارای غلظت اولیهٔ 144 mg L^{-1} ، $\text{pH} = 7/5 \pm 0/5$ و $\text{COD} = 120 \text{ mg L}^{-1}$ بود. در این تحقیق، اثر تعداد سوراخ در صفحهٔ اوریفیس (دو صفحه با یک سوراخ به قطرهای 1 mm و 2 mm ، دو صفحه با 31 سوراخ به

قطرهای 1 mm و 2 mm و دو صفحه با 62 سوراخ به قطرهای 1 mm و 2 mm)، فشار ورودی به حساب‌ساز (4 bar و 5 bar)، غلظت اولیهٔ رنگ ($0/3 \text{ OD}$ و $0/6 \text{ OD}$) و غلظت H_2O_2 ($0/3 - 2/0 \text{ g L}^{-1}$) بررسی شد. در آزمایش‌های مربوط به بررسی اثر تعداد سوراخ در صفحهٔ اوریفیس و فشار ورودی به حساب‌ساز از رنگ مشکی با غلظت $0/3 \text{ OD}$ ، در آزمایش غلظت H_2O_2 از همهٔ رنگ‌ها با غلظت $0/3 \text{ OD}$ و در آزمایش غلظت اولیهٔ رنگ از رنگ مشکی با غلظت $0/6 \text{ OD}$ استفاده شد. زمان هر آزمایش 180 min و دما 35°C بود. طبق نتایج، بیشترین مقدار حذف رنگ در فشار ورودی 4 bar با استفاده از اوریفیس با 31 سوراخ به قطر 2 mm حاصل شد و غلظت بهینه H_2O_2 برابر 1 g L^{-1} به دست آمد. در شرایط عملیاتی بهینه برای محلول رنگی با درجهٔ صنعتی، بیشترین درصد حذف رنگ برای مشکی با 68 و کمترین برای قرمز با 39 و برای پساب جوهر چاپ 15 بود. بیشترین کاهش COD برای رنگ مشکی با 100% و کمترین کاهش برای رنگ زرد با 25% و برای پساب جوهر چاپ 55% بود.

در ادامهٔ کار قبلی و در سال ۲۰۲۲، زامپتا و همکاران [۲۵] رنگ‌زدایی جوهرهای صنعتی و پساب جوهر چاپ را با ترکیب دو فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک و تهنشینی بررسی کردند. کاهش پایداری سامانهٔ کلوییدی که با فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک ایجاد شده، می‌تواند برای تصفیهٔ بهتر پساب حاوی ذرات کلوییدی معلق مفید باشد. در این پژوهش با قرارگرفتن فرایند تهنشینی پس از فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک، جوهر با درجهٔ صنعتی (مشابه کار قبلی)، محلول حاوی ترکیب ۵ جوهر با درجهٔ صنعتی و پساب جوهر چاپ (مشابه کار قبلی) تصفیه شد. سامانهٔ کایتاسیون هیدرودینامیک همان ترکیب بهینه در کار قبلی بود. هدف از این پژوهش استفاده از نتایج کار قبلی برای تعیین شرایط بهینه برای pH ($3-10$) و زمان فرایند تهنشینی ($24-96 \text{ h}$) در حالت ترکیب با کایتاسیون هیدرودینامیک بود. در تصفیهٔ جوهرهای صنعتی، رنگ مشکی برای بررسی اثر H_2O_2 (با غلظت 1 g L^{-1}) و pH انتخاب شد. اضافه شدن فرایند تهنشینی، اثر H_2O_2 را به شدت تغییر می‌دهد. در 2 h کایتاسیون و 24 h تهنشینی حدود $92/4\%$ رنگ‌زدایی بدون حضور H_2O_2 انجام شد؛ درحالی‌که افزودن H_2O_2 باعث حذف 80% از رنگ شد. به نظر می‌رسد افزودن H_2O_2 باعث تغییر بار ذرات معلق

1. Optical Density

طول (130 mm) استفاده شد که فشار ورودی 0/34 MPa با یک پمپ با توان 0/75 kW ایجاد شد. برای انجام فرایند الکتروشیمیایی از کاتد با جنس گرافیت^۱ و آند با جنس Ti-IrO₂ استفاده شد. هم‌چنین اثر آنیون‌های Na₂SO₄، NaNO₃ و NaCl و Na₂CO₃ با غلظت هریک 7 mmol L⁻¹ در 80 mg L⁻¹ از رنگ بررسی شد. غلظت اولیه رنگ مصرفی در محدوده 120-40 mg L⁻¹ و دما حدود 30 °C بود. جت مایع ایجادی در فرایند کاپیتاسیون هیدرودینامیک مقاومت نفوذ در لایه مرزی را کاهش داد و باعث افزایش چگالی جریان شد که همین موضوع باعث اثربخشی فرایند حذف رنگ شد. در این فرایند، پیوند آزو در مولکول رنگ شکسته شد و حلقه نفتالین به بنزن چند جای‌گزین^۲ تغییر شکل یافت. هم‌چنین مشاهده شد که سرعت حذف رنگ با افزایش غلظت آن افزایش یافت و شرایط اسیدی (pH = 1) فرایند رنگ‌زدایی را بهبود داد. حضور یون‌های SO₄²⁻، NO₃⁻ و به‌خصوص Cl⁻ به‌طرز چشم‌گیری فرایند حذف را بهبود بخشید؛ در حالی‌که یون CO₃²⁻ باعث کاهش تصفیه رنگ شد. در شرایط بهینه (غلظت اولیه رنگ 80 mg L⁻¹، حضور آنیون NaCl، pH = 6/35، آند Ti-IrO₂ و کاتد گرافیت) حدود 80٪ رنگ‌زدایی در 90 min انجام شد.

در سال 2011، وانگ و همکاران [27] با ترکیب فرایندهای کاپیتاسیون هیدرودینامیک و فتوکاتالیستی، حذف آلاینده رنگی C.I. reactive red 2 (غلظت 80 mg L⁻¹) از آب را بررسی کردند. از سه ونتوری با سطح مقطع دایره با ابعاد مختلف استفاده شد (شکل (3)). برای ونتوری شماره 1: d = 2 mm و l = 0 mm و شماره 2: d = 3 mm و l = 0 mm و شماره 3: d = 3 mm و l = 18 mm و l = 143 mm است. از یک پمپ با توان 0/75 kW برای تنظیم شرایط فشار ورودی 0/34 MPa استفاده شد. برای بهبود فرایند، فتوکاتالیست TiO₂ با غلظت 500-25 mg L⁻¹ در 80 mg L⁻¹ از رنگ و با حضور پرتو UV توان 9 W استفاده شد. هم‌چنین اثر آنیون‌های NaNO₃، Na₂SO₄، NaCl و NaHCO₃ به‌صورت جداگانه بر این فرایند بررسی شد. غلظت هر نمک 50 mM به‌همراه 100 mg L⁻¹ از TiO₂ در 80 mg L⁻¹ از رنگ در نظر گرفته شد. در این پژوهش، اثر متغیرهای عملیاتی شامل غلظت TiO₂ (500-25 mg L⁻¹)، غلظت اولیه رنگ

و در نتیجه تعلیق مجدد ذرات یا کاهش در سرعت ته‌نشینی ذرات معلق می‌شود.

اثر pH بر فرایند حذف جوهرهای صنعتی بدون افزودن H₂O₂ بررسی شد. نتایج نشان داد که فرایند حذف در pH اسیدی در حالت استفاده تنها از کاپیتاسیون هیدرودینامیک مفید است؛ اما با اضافه‌شدن فرایند ته‌نشینی، در همه سطوح pH، تقریباً درصد حذف یکسانی در حدود 90٪ مشاهده شد. به‌دلیل تشکیل توده ته‌نشین شده پایدار، فرایند ته‌نشینی تحت تأثیر pH قرار نگرفت. در بررسی زمان فرایند کاپیتاسیون و ته‌نشینی در تصفیه جوهرهای صنعتی مشخص شد که بیشترین حذف ذرات جامد در مدت 24 h اتفاق می‌افتد. بنابراین برای رنگ مشکلی 2 h تصفیه با فرایند کاپیتاسیون و 24 h با فرایند ته‌نشینی کافی بود و در این شرایط 92/4٪ رنگ‌زدایی انجام شد. در حالت بهینه ترکیب کاپیتاسیون هیدرودینامیک و ته‌نشینی (در pH = 8 بدون افزودن H₂O₂)، درصد حذف رنگ مشکلی، قرمز، زرد، آبی و سبز به ترتیب 92، 91، 90، 98 و 90 بود. اثر افزودن H₂O₂ و pH در تصفیه پساب جوهر چاپ در فرایند ترکیبی کاپیتاسیون هیدرودینامیک (10 min) و ته‌نشینی (24 h) بررسی شد. براساس نتایج، فرایند تصفیه در pH اسیدی (حدود 3) و pH بازی (حدود 10) به‌خوبی انجام نمی‌شود. هم‌چنین اضافه‌کردن H₂O₂ با غلظت بهینه 1 g L⁻¹، باعث افزایش درصد رنگ‌زدایی از 29/3 به 92/1 شد. برخلاف نتایج قبلی در تصفیه جوهرهای صنعتی، افزودن H₂O₂ باعث افزایش رنگ‌زدایی شد. این رفتار ممکن است به‌دلیل تجمع قوی‌تر ذرات معلق در پساب جوهر چاپ باشد، که با افزودن H₂O₂ بار سطحی ذرات ته‌نشین‌شده تغییر نکرده‌است. در مدت فرایند کاپیتاسیون 10 min و ته‌نشینی 24 h، حذف رنگ برای پساب جوهر چاپ 92٪ و برای محلول حاوی ترکیب 5 رنگ، درصد حذف بیش از 90 برای همه رنگ‌ها بود (pH = 8 و غلظت H₂O₂ برابر 1 g L⁻¹).

۲-۲ تصفیه رنگ با سامانه حباب‌ساز بر پایه ونتوری

در سال 2010، وانگ و همکاران [26] حذف رنگ واکنشی Reactive brilliant red X-3B را با ترکیب روش تخریب الکتروشیمیایی با کاپیتاسیون هیدرودینامیک مطالعه کردند. در این کار از یک ونتوری با سطح مقطع دایره (قطر گلوگاه 2 mm، قطر لوله 25/4 mm و

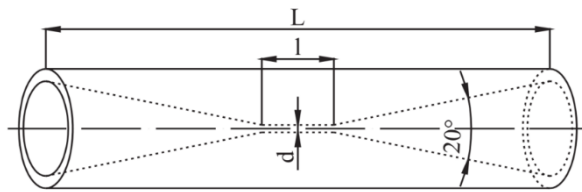
1. Graphite
2. Multi-Substituted Benzene

هیدروکسیل به وسیله H_2O_2 ، افزودن H_2O_2 بعد از مقدار بهینه، اثر منفی روی فرایند رنگ‌زدایی داشت. در شرایط بهینه (غلظت اولیه رنگ $100 \mu M$ ، غلظت اکسیدکننده $4000 \mu M$ ، فشار 5 bar و $pH = 2/0$)، پس از 2 h حدود 72% کاهش در TOC و 100% رنگ‌زدایی گزارش شد.

سahاران و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۳ اثر شکل هندسی قطعه حباب‌ساز را به صورت تجربی بر روی حذف رنگ Orange-G مطالعه کردند. در این کار، سه نوع حباب‌ساز شامل اوریفیس، ونتوری با سطح مقطع دایره و ونتوری با سطح مقطع مستطیل، استفاده شدند. اوریفیس کاربردی یک سوراخ به قطر 2 mm و ضخامت 1 mm داشت و طول هر ونتوری 87 mm گزارش شد. قطر گلوگاه برای ونتوری با سطح مقطع دایره 2 mm و برای ونتوری با سطح مقطع مستطیل به ارتفاع $1/9 \text{ mm}$ ، طول $1/9 \text{ mm}$ و عرض 6 mm بود. محدوده فشار ورودی به اوریفیس، ونتوری با سطح مقطع دایره و ونتوری با سطح مقطع مستطیل به ترتیب برابر $10-1 \text{ bar}$ ، $10-0/5 \text{ bar}$ و $4-0/5 \text{ bar}$ در نظر گرفته شد. در این کار از پمپ جابه‌جایی مثبت با توان $1/1 \text{ kW}$ استفاده و دمای همه آزمایش‌ها $32^\circ C$ تنظیم شد. اثر متغیرهای فشار ورودی، pH محیط ($13-2$) و غلظت اولیه رنگ ($150-30 \mu M$) بر روی فرایند رنگ‌زدایی در هر یک از حباب‌سازها بررسی شد. مشخص شد که در زمان یکسان، ونتوری با سطح مقطع مستطیل، بیش از 50% مؤثرتر از دو قطعه دیگر عمل می‌کند. در شرایط بهینه ($pH = 2$)، غلظت اولیه رنگ = $50 \mu M$ ، فشار ورودی = 3 bar و استفاده از ونتوری با سطح مقطع مستطیل، بعد از 350 گذر حدود 90% رنگ‌زدایی انجام شد.

در سال 2014 ، گوره و همکاران [۲۸] حذف رنگ Reactive orange 4 (غلظت 40 ppm) را با استفاده از فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک بررسی کردند. در این پژوهش از یک ونتوری با سطح مقطع دایره (قطر گلوگاه 2 mm و قطر لوله 17 mm) استفاده شد. فشار ورودی با استفاده از یک پمپ جابه‌جایی مثبت با توان $1/1 \text{ kW}$ در بازه $8-3 \text{ bar}$ قرار گرفت. هم‌چنین از اکسیدکننده H_2O_2 با نسبت مولی $1:50 - 1:5$ $H_2O_2 = \text{dye}$ و از ن $1-8 \text{ g h}^{-1}$ در غلظت 40 ppm از رنگ استفاده شد. در این پژوهش، متغیرهای فشار ورودی ($8-3 \text{ bar}$)، pH محیط ($10-2$)، غلظت H_2O_2 ($50-1:50$) و دبی ازن ($1-8 \text{ g h}^{-1}$) بهینه‌سازی شد.

($200-20 \text{ mg L}^{-1}$)، pH محلول ($11/2-1/1$)، شکل هندسی قطعه حباب‌ساز و حضور آنیون‌ها بررسی شدند. براساس نتایج، فرایند فتوکاتالیستی در ترکیب با کایتاسیون هیدرودینامیک، موفق به افزایش 136% رنگ‌زدایی در مقایسه با فرایند فتوکاتالیست تنها شد و حذف رنگ در ونتوری با قطر و طول کمتر در گلوگاه، بهتر از دو حالت دیگر بود. بازه فرایند رنگ‌زدایی با کاهش هر سه عامل pH محلول، غلظت اولیه رنگ و غلظت TiO_2 ، افزایش یافت. حضور آنیون‌های NO_3^- و SO_4^{2-} فرایند حذف را بهبود و آنیون‌های Cl^- و به خصوص HCO_3^- به صورت قابل توجهی حذف رنگ را کاهش دادند. در شرایط غلظت اولیه رنگ 80 mg L^{-1} ، غلظت TiO_2 برابر 100 mg L^{-1} و استفاده از قطعه حباب‌ساز شماره ۱، در مدت زمان 90 min میزان حذف رنگ حدود 70% شد.



شکل ۳. ونتوری حباب‌ساز کاربردی وانگ و همکاران [۲۷].

Figure 3. The venturi used by Wang et al. [27].

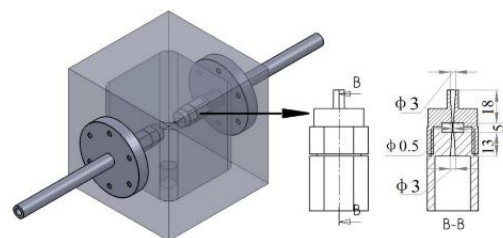
در سال 2012 ساهاران و همکاران [۱۲] حذف رنگ Acid red 88 (غلظت $100 \mu M$) را به وسیله یک ونتوری با سطح مقطع دایره (قطر گلوگاه 2 mm و قطر لوله 17 mm) بررسی کردند. در این کار فشار ورودی $3-7 \text{ bar}$ بود و برای تأمین فشار از پمپ جابه‌جایی مثبت با توان $1/1 \text{ kW}$ استفاده شد. هم‌چنین از عامل اکسیدکننده H_2O_2 با غلظت $100-6000 \mu M$ و نانوکاتالیست $Fe-TiO_2$ با غلظت $1/8 \text{ g L}^{-1}$ در هر $100 \mu M$ از رنگ استفاده شد. در همه آزمایش‌ها، دما در محدوده $35-40^\circ C$ بود. فشار ورودی ($3-7 \text{ bar}$)، غلظت اولیه رنگ ($150-50 \mu M$)، pH محلول ($11-2$)، غلظت H_2O_2 ($100-6000 \mu M$) و غلظت کاتالیست $Fe-TiO_2$ ($1/8 \text{ g L}^{-1}$) به عنوان متغیرهای مؤثر بر فرایند بررسی شدند. براساس نتایج، شدت رنگ‌زدایی به میزان قابل توجهی به pH محلول وابسته و در pH پایین، بهتر بود. هم‌چنین تخریب مولکول رنگ در حضور H_2O_2 و کاتالیست بهتر انجام شد؛ اما به دلیل از بین رفتن رادیکال‌های

کایتاسیون هیدرودینامیک با برخی فرایندهای اکسایش پیشرفته در دمای 30°C انجام دادند. از دو نوع ونتوری با سطح مقطع دایره (قطر گلوگاه ۲ mm و طول ونتوری ۹۶/۱۴ mm) و مستطیل (ابعاد گلوگاه $3 \times 14 \times 1 \text{ mm}^3$ و طول ونتوری ۱۰۰/۶ mm) استفاده شد. فشار ورودی در بازه ۳-۱۱ bar با یک پمپ پیستونی فشار بالا با توان ۲/۲ kW تنظیم شد. برای اثربخشی فرایند از اکسیدکننده‌های H_2O_2 با غلظت مولی $1:50 = \text{dye}:\text{H}_2\text{O}_2$ در ۱۰ ppm از رنگ استفاده شد. مشخصه‌های فرایندی شامل غلظت اولیه رنگ (۱۰-۵۰ ppm)، pH محلول (۲-۱۲)، فشار ورودی (۳-۱۱ bar)، نوع قطعه‌ی حباب‌ساز، غلظت H_2O_2 و دبی ازن ($1-7 \text{ g h}^{-1}$) بررسی و مشاهده شد که در شرایط عملیاتی یکسان، ونتوری با سطح مقطع مستطیل مؤثرتر عمل می‌کند و با افزایش فشار تا ۵ bar، عمل‌کرد سامانه بهبود یافته و بیشینه حذف رنگ در $\text{pH} = 10$ است. در شرایط بهینه (غلظت اولیه رنگ ۱۰ ppm) و در حالت ترکیب H_2O_2 (با نسبت مولی ۱:۳۰) با فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک حدود ۵۴٪ رنگ‌زدایی گزارش شده؛ اما در حالت ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک و ازن، نزدیک به ۱۰۰٪ رنگ‌زدایی در ۵-۱۰ min انجام شد. هم‌چنین مقدار TOC حدود ۸۴٪ در حالت ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک با ازن (با دبی 3 g h^{-1}) کاهش یافت.

کالیسکان و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۱۷، حذف دو رنگ آزو Reactive red 180 و Direct orange 46 (غلظت $150-50 \text{ mg L}^{-1}$) را به‌وسیله ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک با فرایند فتوکاتالیستی و نور UV (با شدت $1/43 \text{ mW cm}^{-2}$ درون راکتور) مطالعه کردند. در این کار از یک ونتوری با سطح مقطع دایره (قطر روزنه ۱/۵ mm، قطر گلوگاه ۷ mm و قطر لوله ۳۱ mm) و یک پمپ با محور عمودی با توان ۲ kW برای تأمین فشار ورودی در محدوده ۱-۵ bar استفاده شد. تمام آزمایش‌ها در دمای محیط انجام شدند. در این مطالعه، مشخصه‌های عملیاتی شامل فشار ورودی (۱-۵ bar)، نوع رنگ، غلظت اولیه رنگ ($150-50 \text{ mg L}^{-1}$)، نوع فرایند همراه (فرایند فتوکاتالیستی و نور UV)، نوع فتوکاتالیست (TiO_2 و ZnO) و غلظت فتوکاتالیست ($0/5-1/5 \text{ g L}^{-1}$) بررسی شد. مشخص شد که در شرایط عملیاتی یکسان، فتوکاتالیست ZnO عمل‌کرد بهتری در حذف رنگ

شرایط بهینه مقادیر فشار ۵ bar، pH اسیدی، نسبت مولی H_2O_2 ۱:۳۰ و دبی ازن 3 g h^{-1} گزارش شده‌است. در شرایط بهینه و پس از ۲ h، معدنی‌شدن در حالت کایتاسیون هیدرودینامیک برابر ۹۷/۱۴٪، در حالت ترکیب آن با H_2O_2 برابر ۳۱/۹۰٪ و در حالت ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک و ازن برابر ۷۶/۲۵٪ شد.

در سال ۲۰۱۷ تائو و همکاران [۱۱] از یک راکتور برخوردی شامل دو نازل از نوع ونتوری با سطح مقطع دایره (شکل (۴)) برای حذف رنگ Rhodamine B (غلظت میانگین 35 mg L^{-1}) استفاده کردند. برای تأمین فشار ورودی در بازه ۶-۱۲ MPa از یک پمپ plunger با توان ۵/۵ kW استفاده شد. برای اثربخشی و افزایش بازده از H_2O_2 با غلظت $30-5 \text{ mg L}^{-1}$ و FeSO_4 (واکنشگر فتون) با غلظت $3/33-8/67 \text{ mg L}^{-1}$ در 39 mg L^{-1} از رنگ استفاده شد. دمای آزمایش‌ها 26°C تنظیم شد. در این پژوهش اثر غلظت اولیه H_2O_2 ($5-30 \text{ mg L}^{-1}$)، غلظت FeSO_4 ($3/33-8/67 \text{ mg L}^{-1}$)، غلظت اولیه رنگ ($15/24-63/53 \text{ mg L}^{-1}$)، فشار ورودی (۶-۱۲ MPa) و pH محلول (۲-۸) بررسی و شرایط بهینه تعیین شد. نتایج نشان داد که با کاهش غلظت اولیه رنگ و pH محلول و افزایش غلظت اولیه H_2O_2 و فشار ورودی، رنگ‌زدایی در زمانی محدود افزایش یافت. هم‌چنین غلظت بهینه برای FeSO_4 ($6/67 \text{ mg L}^{-1}$)، وابسته به غلظت رنگ و H_2O_2 است. در شرایط بهینه (غلظت اولیه رنگ 39 mg L^{-1} ، غلظت H_2O_2 10 mg L^{-1} ، غلظت FeSO_4 $6/67 \text{ mg L}^{-1}$ ، فشار ۱۰ MPa و $\text{pH} = 3$)، حدود ۹۵٪ از مقدار اولیه رنگ پس از ۲ h حذف شد.



شکل ۴. راکتور برخوردی کاربردی تائو و همکاران [۱۱].

Figure 4. The impinging reactor used by Tao et al. [11].

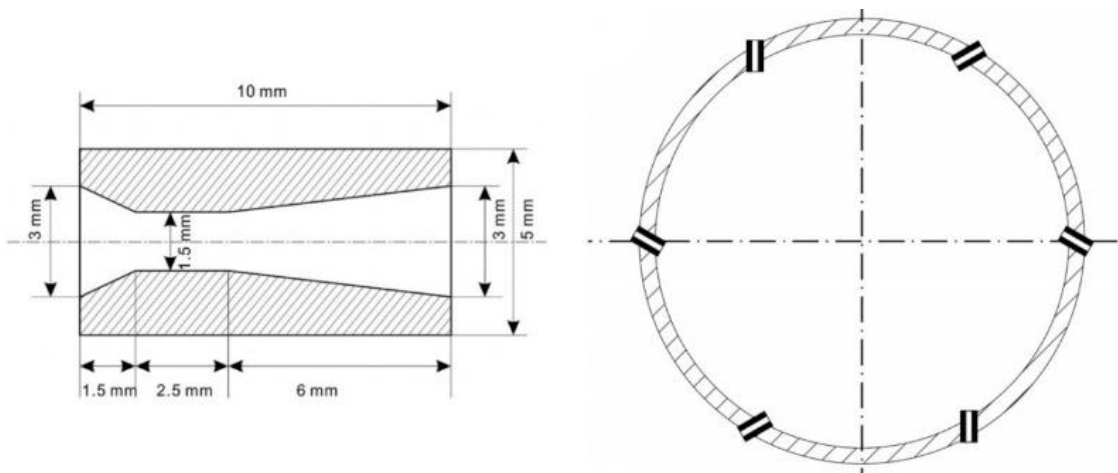
در سال ۲۰۱۷ راجوریا و همکاران [۲۹] پژوهشی را برای حذف رنگ کاتیونی Rhodamine 6G (غلظت ۱۰-۵۰ ppm) با ترکیب

هم‌زمان از کایتاسیون صوتی با توان ۲۲۰ W باعث بهبود فرایند حذف به مقدار ۱۱۹٪ شد. در شرایط غلظت اولیه رنگ $20 \mu\text{M}$ ، فشار ورودی 0.4 MPa (دبی $3/0.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)، دمای محلول 25°C و توان اولتراسونیک ۲۲۰ W، حدود ۳۰٪ رنگ‌زدایی پس از ۲ h گزارش شده‌است.

ایناسزی و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۱۸، اثر یون‌های فلزی آهن و نیکل را بر حذف رنگ آزو Methyl orange به‌کمک فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک مطالعه کردند. در این کار از یک ونتوری با سطح مقطع دایره (قطر گلوگاه ۲ mm، طول گلوگاه ۴ mm و قطر لوله ۱۲ mm) و پمپ سانتریفیوژ با توان ۳۷۵ W استفاده شد. در همه آزمایش‌ها غلظت آهن و نیکل ثابت و به ترتیب 20 mg L^{-1} و 10 mg L^{-1} تنظیم شد. اثر فشار ورودی ($0.2-0.6 \text{ MPa}$)، pH محلول (۲-۶)، دما ($10-40^\circ\text{C}$)، غلظت اولیه رنگ ($5-20 \text{ ppm}$) و زمان واکنش (۲۰-۶۰ min) بر روی فرایند رنگ‌زدایی بررسی شد. با توجه به نتایج و در مقایسه با حالت حضور نداشتن یون‌های فلزی در محلول، مشخص شد که یون‌های فلزی به‌عنوان کاتالیست عمل می‌کنند و می‌توانند در شرایط عملیاتی یکسان، انرژی مصرفی را تا پنج برابر کاهش دهند. در شرایط بهینه (فشار ورودی 0.6 MPa ، $\text{pH} = 2$ ، دما 20°C و غلظت اولیه رنگ 5 ppm)، بعد از ۱ h مقدار ۷۵٪ رنگ‌زدایی انجام شد.

Reactive red 180 نسبت به رنگ دیگر دارد. بیشترین بازده سامانه برای حذف رنگ Reactive red 180، در ترکیب هم‌زمان کایتاسیون هیدرودینامیک با فتوکاتالیست ZnO و نور UV رخ داد. در شرایط بهینه (غلظت اولیه رنگ 100 mg L^{-1} ، فشار ورودی ۵ bar، غلظت فتوکاتالیست 1 g L^{-1} ZnO) و پس از گذشت ۱۸۰ min، ۹۹٪ از رنگ حذف شد. در همین شرایط، حذف COD و TOC به ترتیب ۷۷٪ و ۶۶٪ گزارش شده‌است.

در سال ۲۰۱۸ یی و همکاران [۳۱] حذف رنگ Rhodamine B (غلظت متوسط $30 \mu\text{M}$) به وسیله شش ونتوری حباب‌ساز با سطح مقطع دایره (شکل (۵)) را بررسی کردند. در این کار برای تأمین فشار از یک پمپ سانتریفیوژ و برای اثر بخشی فرایند از کایتاسیون صوتی (فرکانس ثابت ۲۷/۹۰ kHz) استفاده شد. فشار ورودی ($0.2-0.6 \text{ MPa}$)، غلظت اولیه رنگ ($24-40 \mu\text{M}$)، دمای محلول ($15-35^\circ\text{C}$) و توان اولتراسونیک ($220-44 \text{ W}$) به‌عنوان متغیرهای مؤثر بررسی شدند. براساس نتایج، افزایش فشار بیش از 0.4 MPa باعث تولید بیش از حد حباب و در نتیجه ایجاد خفگی^۱ در سامانه و کاهش بازدهی می‌شود. در حالی که افزایش دما باعث افزایش فشار بخار و تعداد حباب در سامانه و در نتیجه افزایش رنگ‌زدایی می‌شود؛ اما افزایش دما بیش از 25°C باعث افزایش غلظت بخار در حباب می‌شود که مقادیر بیش از حد آن شدت فروپاشی را کاهش می‌دهد و رنگ‌زدایی کمتر می‌شود. استفاده



شکل ۵. ونتوری‌های حباب‌ساز کاربردی یی و همکاران [۳۱].

Figure 5. The venturi used by Yi et al.[31].

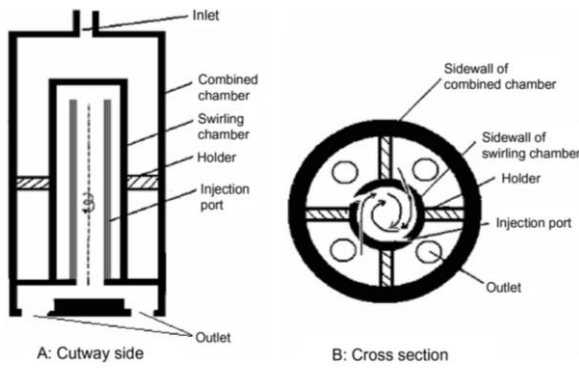
HCO_3^- ، سایر یون‌ها باعث بهبود فرایند حذف رنگ شدند. بیشترین مقدار ضریب هم‌افزایی برای یون NO_3^- با مقدار ۲/۵ بود. پس از گذشت ۱۲۰ min در شرایط عملیاتی $\text{pH} = 3$ و غلظت اولیه رنگ 80 mg L^{-1} و در حضور 15 mmol L^{-1} یون NO_3^- ، مقدار ۹۸٪ رنگ‌زدایی انجام شد.

در سال ۲۰۲۱ لکشمی و همکاران [۳۵] پژوهشی را برای حذف رنگ Acid violet 7 (۲۰ ppm) با استفاده از روش هیبریدی برپایه کایتاسیون هیدرودینامیک انجام دادند. در این پژوهش، ونتوری با سطح مقطع مستطیل (طول گلوگاه ۱/۹ mm و طول کل ۸۶/۹ mm) و پمپ رفت‌و برگشتی با توان ۱/۵ kW برای تأمین فشار ورودی ۴ bar استفاده شد. زمان هر آزمایش ۱۲۰ min و دما 30°C بود. در این پژوهش، متغیرهای عملیاتی غلظت اولیه رنگ (۱۰-۲۰۰ ppm) و pH (۳-۱۰) برای فرایند کایتاسیون هیدرودینامیک بهینه‌سازی شدند. در شرایط بهینه، غلظت اولیه رنگ ۲۰ ppm، $\text{pH} = 3$ و فشار ورودی ۴ bar، بیشینه مقدار حذف رنگ و معدنی‌شدن به ترتیب ۳۹/۱٪ و ۲۵/۲٪ شد. با افزایش غلظت رنگ بیش از ۲۰ ppm، تولید رادیکال هیدروکسیل محدود می‌شود و در نتیجه درصد حذف رنگ کاهش می‌یابد. ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک با هریک از اکسیدکننده‌های H_2O_2 (۲۰۰-۲۵۰ ppm) یا $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (۲۵-۵۰۰ ppm) و فنتون (Fe^{2+} ۲۵۰-۱۰ ppm و H_2O_2 ۵۰ ppm) باعث بهبود فرایند تصفیه شد، که در شرایط بهینه برای هر ترکیب (H_2O_2 ۵۰ ppm، KPS ۵۰ ppm) در دمای 60°C و 10 ppm Fe^{2+} درصد حذف رنگ به ترتیب ۷۰/۴۹٪، ۷۷/۷۲٪ و ۹۴/۰۲٪ و مقدار معدنی‌شدن به ترتیب ۳۸٪، ۴۸/۸٪ و ۷۰/۴٪ شد. افزایش غلظت H_2O_2 بیشتر از ۵۰ ppm باعث کاهش غلظت هیدروکسیل (واکنش H_2O_2 اضافی با هیدروکسیل) و در نتیجه کاهش درصد حذف شد. افزایش دما تا 60°C باعث فعال‌سازی حرارتی KPS و افزایش درصد حذف رنگ شد. همچنین مشخص شد که سینتیک فرایند حذف رنگ از نوع مرتبه اول است. باتوجه به نتایج، بهترین روش برای حذف رنگ Acid violet 7 ترکیب کایتاسیون هیدرودینامیک و فنتون در مقایسه با سایر اکسیدکننده‌ها بود.

عباس‌شیرودی و همکاران [۳۶] در سال ۲۰۲۱ یک ونتوری را طراحی و برای حذف رنگ Congo red (۲۰ ppm) بهینه‌سازی

کاکو و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۲۰ اثر فرایندهای اکسایش پیشرفته برپایه کایتاسیون هیدرودینامیک را برای حذف رنگ Brilliant cresyl blue (غلظت 5 mg L^{-1}) بررسی کردند. در این پژوهش از ترکیب اکسیدکننده‌های پراکسید هیدروژن، ازن، پرسولفات سدیم و روش پرتودهی با کایتاسیون هیدرودینامیک استفاده شد. از ونتوری با قطر گلوگاه ۲ mm و قطر لوله ۱۷ mm و پمپ پره‌ای استفاده شد. محلول‌های پراکسید هیدروژن و پرسولفات سدیم با دبی 0.22 mL min^{-1} و ازن با دبی 0.5 L min^{-1} و با غلظت $1 \text{ g ozone L}^{-1} \text{ air} \times 10^{-2}$ و $1/53$ وارد سامانه شد و توان ویژه لامپ UV برابر 56 W cm^{-1} بود. اثر عدد کایتاسیون (۱/۲-۱/۱۴)، pH (۱-۲)، دما (50°C و 20°C)، پراکسید هیدروژن ($43/96 \text{ g}$ در 180 min)، ازن (5 min - 180 min)، نور UV (180 min)، پرسولفات سدیم (1 M - 0.1 M) و غلظت اولیه رنگ ($5-50 \text{ mg L}^{-1}$) بررسی شدند. در شرایط عملیاتی بهینه (عدد کایتاسیون ۰/۲۷، فشار ورودی ۱/۷۰ bar، دبی مایع 338 L h^{-1} ، دما 20°C و $\text{pH} = 7$)، مشخص شد که ترکیب ازن با کایتاسیون هیدرودینامیک بهترین اثر (ضریب هم‌افزایی ۱/۸۴) در حذف رنگ را دارد. در نهایت حذف سریع رنگ (به میزان ۱۰۰٪) در زمان ۱ min انجام شد.

خواجه و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۲۰، اثر حضور آنیون‌ها و کاتیون‌ها را بر حذف رنگ Direct red 89 (غلظت متوسط 80 mg L^{-1}) با روش کایتاسیون هیدرودینامیک بررسی کردند. در این کار از ونتوری (قطر گلوگاه و طول کل ۰/۵ mm و ۱۳۰ mm) و پمپ سانتریفیوژ با توان ۰/۳۷ kW استفاده شد. در همه آزمایش‌ها، دما در محدوده $25-29^\circ \text{C}$ و فشار عملیاتی ۴ bar بود. اثر متغیرهای عملیاتی pH (۳-۹)، غلظت اولیه رنگ ($30-90 \text{ mg L}^{-1}$)، زمان واکنش (۵-۱۳۰ min) و یون‌های Na^+ ، Mg^{2+} ، Mn^{2+} ، I^- ، HCO_3^- ، NO_3^- ، SO_4^{2-} و PO_4^{3-} در دو غلظت ۱۵ و 30 mmol L^{-1} بر فرایند حذف رنگ بررسی شدند. نتایج نشان داد که نرخ حذف رنگ به شدت به pH محلول، زمان واکنش و غلظت اولیه رنگ وابسته است. بیشترین میزان حذف رنگ (بدون حضور یون) در $\text{pH} = 3$ برابر ۷۵/۴٪ بود. در شرایط عملیاتی غلظت اولیه رنگ 80 mg L^{-1} ، $\text{pH} = 3$ و پس از گذشت ۱۳۰ min، مقدار ۷۵/۴٪ رنگ‌زدایی انجام شد. افزایش مقدار یون از ۱۵ به 30 mmol L^{-1} اثر چندانی بر فرایند حذف رنگ نداشت. به غیر از یون



شکل ۶. حباب‌ساز چرخشی کاربردی وانگ و همکاران [۱۳].

Figure 6. The Swirling jet induced cavitation reactor used by Wang et al. [13].

وانگ و همکاران [۳۷] در سال ۲۰۱۴، برای حذف رنگ Reactive brilliant red K-2BP (غلظت 10 mg L^{-1}) از آب، فرایندهای کایتاسیون هیدرودینامیک و واکنشگر فنتون را ترکیب کردند. این پژوهشگران از همان سامانه حباب‌ساز کاربردی در کار قبلی (شکل ۶) در محدوده فشار یکسان استفاده کردند. برای اثربخشی فرایند از H_2O_2 با غلظت $25-200 \text{ mg L}^{-1}$ و کاتالیست FeSO_4 با غلظت $15-75 \text{ mg L}^{-1} \text{ Fe}^{2+}$ برای هر دو رنگ با غلظت 10 mg L^{-1} استفاده شد. اثر مشخصه‌های عملیاتی مختلف مثل غلظت اولیه رنگ ($10-40 \text{ mg L}^{-1}$)، غلظت H_2O_2 ($25-200 \text{ mg L}^{-1}$)، غلظت Fe^{2+} ($15-75 \text{ mg L}^{-1}$)، فشار ورودی ($0.2-0.6 \text{ MPa}$)، pH محیط ($4-7$) و دمای محلول ($303-333 \text{ K}$) بررسی شدند. براساس نتایج، رنگ‌زدایی با افزایش غلظت H_2O_2 و Fe^{2+} افزایش می‌یابد؛ اما غلظت‌های بیشتر از 400 mg L^{-1} و 75 mg L^{-1} به ترتیب برای H_2O_2 و Fe^{2+} اثر معکوس داشت. همچنین با کاهش pH و افزایش دما و فشار، رنگ‌زدایی بهتر شد. در شرایط بهینه (غلظت اولیه رنگ 10 mg L^{-1} ، غلظت اکسیدکننده 100 mg L^{-1} ، غلظت کاتالیست $50 \text{ mg L}^{-1} \text{ Fe}^{2+}$ ، فشار 0.6 MPa ، دما 323 K و $\text{pH} = 4/0$) پس از گذشت ۱ h، ۹۰ درصد حذف حدود ۹۰ شد.

۳. نتیجه‌گیری

کایتاسیون هیدرودینامیک یکی از روش‌های نوظهوری است که در زمینه تصفیه آب و پساب، به‌ویژه حذف رنگ در سال‌های اخیر طرفدار پیدا کرده‌است. از برتری‌های این روش می‌توان به سادگی و

کردند. طبق نتایج CFD، قطعه بهینه نیم‌زاویه همگرایی، طول گلوگاه و نیم‌زاویه واگرایی به ترتیب برابر با $22/7^\circ$ ، 4 mm و $6/5^\circ$ داشت. همچنین در این تحقیق از صفحه اورفیس‌های مختلف برای مقایسه نتایج استفاده شد. صفحه اورفیس‌های کاربردی دارای ۱، ۱۳، ۲۵ و ۳۳ سوراخ با قطرهای به ترتیب 4 mm ، $1/1 \text{ mm}$ ، $0/8 \text{ mm}$ و $0/69 \text{ mm}$ و توزیع منظم بودند. از یک پمپ با توان $5/5 \text{ kW}$ استفاده و غلظت رنگ در تمامی آزمایش‌ها 20 ppm ، زمان 1 h و دما 33°C در نظر گرفته شد. فشار ورودی در محدوده $4-7 \text{ bar}$ برای تعیین فشار بهینه مطالعه شد. مقدار بیشینه حذف رنگ با استفاده از ونتوری (فشار ورودی 5 bar) $38/8\%$ بود که در عدد کایتاسون $0/12$ حاصل شد. به‌علاوه رنگ‌زدایی $26/2\%$ در صفحه اورفیس با تعداد سوراخ ۳۳ (فشار ورودی 5 bar) و $1/1/55\%$ در صفحه اورفیس با ۱ سوراخ (فشار ورودی 6 bar) نشان‌دهنده برتری ونتوری طراحی شده در حذف رنگ بود.

۲-۳ تصفیه رنگ با سامانه حباب‌ساز بر پایه چرخش مایع

وانگ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۸ برای حذف رنگ Rhodamine B با غلظت 5 mg L^{-1} از یک قطعه حباب‌ساز چرخشی (شکل ۶) استفاده کردند. فشار ورودی در بازه $0/2-0/6 \text{ MPa}$ با استفاده از یک پمپ سانتریفیوژ با توان 3500 W تنظیم شد. برای افزایش اثربخشی فرایند، اکسیدکننده H_2O_2 با غلظت 100 mg L^{-1} در هر 5 mg L^{-1} از رنگ استفاده شد که باعث کاهش چهار برابری غلظت رنگ در زمان‌های طولانی نسبت به حالت عدم استفاده از آن شد. بررسی اثر متغیرهای عملیاتی نظیر فشار ورودی ($0.2-0.6 \text{ MPa}$)، دما ($20-60^\circ \text{C}$)، غلظت اولیه رنگ ($5-40 \text{ mg L}^{-1}$) و pH محلول ($2-12$)، نشان داد که درصد حذف رنگ با افزایش فشار ورودی، بیشتر و با افزایش غلظت اولیه رنگ، کم می‌شود. با افزایش دما از 30°C به 40°C مقدار حذف رنگ افزایش یافت؛ ولی با افزایش بیشتر دما به 60°C ، اثر منفی در میزان حذف مشاهده شد. همچنین شدت حذف رنگ در pH اسیدی ($2-4$) بسیار بیشتر از pH خنثی ($5-10$) بود. به‌علاوه در شرایط قلیایی ($\text{pH} = 12$) نیز شدت بالایی از حذف رنگ گزارش شد. در شرایط بهینه (غلظت اولیه رنگ 5 mg L^{-1} ، غلظت اکسیدکننده 100 mg L^{-1} ، فشار 0.6 MPa ، دما 40°C و $\text{pH} = 5/4$)، حدود ۹۰ درصد رنگ پس از ۳ h حذف شد.

ماهیت آلاینده (شکل یونی یا مولکولی) توجه کرد. برای مثال در pH مناسب و با آب‌گریز شدن آلاینده، غلظت آن در سطح مشترک آب و حباب افزایش می‌یابد و راحت‌تر به‌وسیلهٔ رادیکال‌های هیدروکسیل در معرض حمله قرار می‌گیرد.

در مجموع نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که ترکیب روش کاویتاسیون هیدرودینامیک با سایر فرایندهای تصفیه، به‌دلیل آشفته‌گی جریان و در نتیجه کم‌بودن مقادیر مقاومت‌های مربوطه پدیده‌های انتقال، می‌تواند اثر هم‌افزایی قابل قبولی را به‌دنبال داشته باشد. استفاده از اوریفیس و ونتوری برای تولید حباب در سامانه و افزودن H_2O_2 تا مقداری بهینه، از در دسترس‌ترین و پرکاربردترین موارد مصرفی است که باعث افزایش غلظت رادیکال هیدروکسیل در محیط می‌شود. به‌علاوه سهولت در افزودن یون‌ها (انواع فلزی و غیرفلزی) و مواردی از قبیل نانوذرات صفر ظرفیتی فلزی و نقش آشفته‌گی جریان در جلوگیری از توده‌شدن آن‌ها می‌تواند میزان و سرعت تصفیهٔ رنگ را به‌شدت افزایش دهد. قابلیت این روش در استفاده هم‌زمان از روش‌های تصفیه، مانند افزودن هم‌زمان H_2O_2 و نانوذرات صفر ظرفیتی فلزی می‌تواند بازدهی را به‌طرزی چشم‌گیر افزایش دهد. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط در مدت زمان کمتر از ۲ h و در شرایط بهینهٔ عملیاتی بیش از ۸۰٪ از رنگ حذف شده‌است. در نتیجه این روش از قابلیت مناسب برای استفاده در فرایندهای تصفیهٔ آب و پساب برخوردار است و به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد، می‌تواند با توسعهٔ بیشتر در مقیاس صنعتی در آیندهٔ نزدیک جای‌گزین روش‌های معمول امروزی شود.

انعطاف‌پذیری در طراحی، مصرف انرژی کم، پایین‌بودن هزینه‌های جانبی، سهولت در نگهداری و قابلیت بالا در ترکیب با سایر روش‌های تصفیه اشاره کرد. بنابراین در سال‌های اخیر کاربرد این روش و ترکیب آن با سایر فرایندهای اکسایش پیشرفته (مانند افزودن H_2O_2 در حضور یون‌های مختلف، فرایند فنتون، هوادهی، ازن‌دهی، فتوکاتالیزتی و کاویتاسیون صوتی) مطالعه شده‌است. در مطالعات انجام‌شده تا به امروز (جدول ۵)، موارد مختلفی مانند نوع فرایند همراه، شرایط عملیاتی (فشار ورودی، دما، pH و غلظت آلاینده) و شکل هندسی قطعهٔ حباب‌ساز بررسی و بهینه‌سازی شده‌است.

شکل هندسی قطعهٔ حباب‌ساز تعیین‌کنندهٔ مقدار حباب تولیدشده در سامانه، زمان ماند حباب‌ها در ناحیهٔ کم‌فشار و شدت بازیابی فشار است که تأثیر مستقیم روی بازدهی فرایند دارند. افزایش فشار ورودی باعث کاهش بیشتر فشار در ناحیهٔ کم‌فشار و تولید حباب بیشتر می‌شود. حباب بیشتر منجر به تولید بیشتر رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود و می‌تواند باعث افزایش بازدهی فرایند شود. افزایش فشار بیشتر از مقدار بهینه باعث ایجاد ابر کاویتاسیونی، کاهش شدت فروپاشی حباب‌ها و در نتیجه کاهش بازدهی فرایند می‌شود. دمای عملیاتی بالاتر به‌دلیل میل بیشتر محیط آبی به بخار شدن و تولید حباب بیشتر، می‌تواند بازدهی فرایند را افزایش دهد. خواصی مانند فشار بخار مایع، گران‌روی و کشش سطحی به دما وابسته است و افزایش دما بیشتر از مقدار بهینه، به‌دلیل ایجاد تغییر در خواص ذکر شده، شدت فروپاشی حباب را کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش بازدهی می‌شود. در تعیین pH بهینه باید به

جدول ۵. خلاصهٔ نتایج پژوهش‌های پیشین در زمینهٔ تصفیهٔ رنگ بر پایهٔ روش کاویتاسیون هیدرودینامیک.

Table 5. Summary of the results of previous researches in the field of color treatment based on hydrodynamic cavitation method.

No.	Year	Dye	Cavitating device	Inlet pressure (bar)	Intensifying process	Ref.
1	2002	Rhodamine B	Multi-holes orifice (six types)	2.1	-	[15]
2	2008	Rhodamine B	Swirling jet-induced	2.0 – 6.0	H_2O_2 (100 mg L ⁻¹ , 5 mg L ⁻¹ dye)	[13]
3	2010	Reactive brilliant red X-3B	Circular venturi	3.4	Electrochemical degradation (anode = Ti-IrO ₂ , cathode = graphite) Na ₂ SO ₄ , NaNO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃ (7000 μM salt, 80 mg L ⁻¹ dye)	[26]

No.	Year	Dye	Cavitating device	Inlet pressure (bar)	Intensifying process	Ref.
4	2011	C.I. reactive red 2	Circular venturi (three different designs)	3.4	TiO ₂ photocatalysis (ultraviolet power = 9 W, 25 – 500 mg L ⁻¹ TiO ₂ , 80 mg L ⁻¹ dye) NaNO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, NaHCO ₃ (50000 μM of each, 100 mg L ⁻¹ TiO ₂ , 80 mg L ⁻¹ dye)	[27]
5	2012	Acid red 88	Circular venturi	3.0 – 7.0	H ₂ O ₂ (3 – 204 mg L ⁻¹ or 1 – 60 molar times to dye) Fe-TiO ₂ nanocatalyst (1800 mg L ⁻¹ , 40 mg L ⁻¹ dye)	[12]
6	2013	Rhodamine B	Orifice (multiple jets impingement)	5.0	Zero-valent iron (0 – 70 mg L ⁻¹ , 5 mg L ⁻¹ dye) Aeration (5 mg L ⁻¹ dye)	[16]
7	2013	Orange-G	Circular venturi Slit venturi Orifice	0.5 – 10.0 0.5 – 4.0 1.0 – 10.0	-	[9]
8	2014	Reactive brilliant red K-2BP	Swirling jet-induced	2.0 – 6.0	H ₂ O ₂ (25 – 200 mg L ⁻¹ , 10 mg L ⁻¹ dye) FeSO ₄ (15 – 75 mg L ⁻¹ Fe ²⁺ , 10 mg L ⁻¹ dye)	[37]
9	2014	Reactive Orange 4	Circular venturi	3.0 – 8.0	H ₂ O ₂ (dye:H ₂ O ₂ = 1:5 – 1:50, 40 mg L ⁻¹ dye) Ozone (1 – 8 g h ⁻¹ , 40 mg L ⁻¹ dye)	[28]
10	2015	Methyl orange	Orifice valve	2.0 – 5.0	Zero-valent copper (20 – 200 mg L ⁻¹ , 10 mg L ⁻¹ dye) Methanol (0.1 – 1 mL L ⁻¹ , OH radical scavenger)	[17]
11	2017	Crystal violet	Orifice	1.5 – 7.0	Adsorption unit (polymer hydrogels as adsorbent)	[18]
12	2017	Rhodamine B	Circular venturi (double jets impingement)	60.0 – 120.0	H ₂ O ₂ (5 – 30 mg L ⁻¹ , 30 mg L ⁻¹ dye) FeSO ₄ (3.33 – 8.67 mg L ⁻¹ , 39 mg L ⁻¹ dye)	[11]
13	2017	Rhodamine 6G	Circular venturi Slit venturi	3.0 – 11.0	H ₂ O ₂ (dye:H ₂ O ₂ = 1:50, 10 mg L ⁻¹ dye) Ozone (1 – 7 g h ⁻¹ , 50 mg L ⁻¹ dye)	[29]
14	2017	Reactive red 180 Direct orange 46	Circular venturi	1 – 5	Photocatalytic reactor (UV-Vis irradiation, 1.43 mW cm ⁻² , 0.5 – 1.5 mg L ⁻¹ each ZnO / TiO ₂ , 100 mg L ⁻¹ dye)	[30]
15	2018	Rhodamine B	Circular venturi	2 – 6	Acoustic cavitation (44 – 220 W, 27.90 kHz, 15 mg L ⁻¹ dye)	[31]

No.	Year	Dye	Cavitating device	Inlet pressure (bar)	Intensifying process	Ref.
16	2018	Methylene blue Methyl orange Rhodamine B	Orifice	2 – 8	H ₂ O ₂ (dye:H ₂ O ₂ = 1:05 – 1:50, 30 mg L ⁻¹ dye) FeSO ₄ (FeSO ₄ .7H ₂ O:H ₂ O ₂ = 1:10 – 1:40, 30 mg L ⁻¹ dye) Photocatalytic reactor (250 W UV, 200 mg L ⁻¹ TiO ₂ , 30 mg L ⁻¹ dye)	[19]
17	2018	Methyl orange	Circular venturi	2 – 6	Metal ions (20 mg L ⁻¹ Fe ²⁺ , 10 mg L ⁻¹ Ni ²⁺ , 5 mg L ⁻¹ dye)	[32]
18	2019	Reactive black 5	Orifice	4	Photocatalytic reactor (15 – 60 W UV-C, 50 – 200 mg L ⁻¹ TiO ₂ , 30 mg L ⁻¹ dye)	[20]
19	2020	Brilliant cresyl blue	Slit venturi	1.1 – 1.85	H ₂ O ₂ (0.22 mL min ⁻¹ , 5 mg L ⁻¹ dye) Ozone (0.459 g h ⁻¹ , 5 mg L ⁻¹ dye) Na ₂ S ₂ O ₈ (0.1 – 1 M solution, 0.22 mL min ⁻¹ , 5 mg L ⁻¹ dye) UV (56 W cm ⁻¹ , 5 mg L ⁻¹ dye)	[33]
20	2020	Congo red	Orifice	6	H ₂ O ₂ (0 – 1000 mg L ⁻¹ , 20 mg L ⁻¹ dye) FeSO ₄ (0 – 50 mg L ⁻¹ , 20 mg L ⁻¹ dye)	[22]
21	2020	Direct red 89	Circular venturi	4	Ions (Na ⁺ , Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , I ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻ , 15 – 30 mmol L ⁻¹ ion, 80 mg L ⁻¹ dye)	[34]
22	2020	Reactive black 5	Orifice	4	Photocatalyst (50 – 200 mg L ⁻¹ TiO ₂ , 30 mg L ⁻¹ dye) Photolysis (15 – 60 W UV-C, 30 mg L ⁻¹ dye) Photocatalysis (50 – 200 mg L ⁻¹ TiO ₂ , 15 – 60 W UV-C, 30 – 100 mg L ⁻¹ dye)	[21]
23	2021	Acid violet 7	Slit venturi	4	H ₂ O ₂ (25 – 200 ppm, 20 ppm dye) KPS (50 – 500 ppm, 30 – 60 °C, 20 ppm dye) Fenton (10 – 250 ppm Fe ²⁺ , 50 ppm H ₂ O ₂ , 20 ppm dye)	[35]
24	2021	Congo red	Circular venturi Multi-holes orifice plate (four types)	4–7	-	[36]
25	2021	Real textile wastewater	Orifice	2.5– 9	H ₂ O ₂ (1 – 4 mL L ⁻¹) Fenton (0.28 g L ⁻¹ FeSO ₄ .7H ₂ O, 2 mL L ⁻¹ H ₂ O ₂)	[23]
26	2021	Industrial-grade dye solution Printing ink wastewater	Multi-holes orifice plate (six types)	4–5	H ₂ O ₂ (0.0 – 2.0 g L ⁻¹)	[24]
27	2022	Industrial inks Printing ink wastewater	Multi-holes orifice plate	4	H ₂ O ₂ (1 g L ⁻¹) Sedimentation (24 – 96 h)	[25]

- [1] Abbas-Shiroodi, Z., Sadeghi, M. -T., & Baradaran, S. (2021). Design and optimization of a cavitating device for Congo red decolorization: Experimental investigation and CFD simulation. *Ultrasonics Sonochemistry*, *71*, 105386. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105386>
- [2] Arbab, P., Ayati, B., & Ansari, M. (2020). Optimization and Comparison of Single and Combined Processes Using Hydrodynamic Cavitation for Dye Removal. *Journal of Water and Wastewater*, *31*(2), 24-42. <https://doi.org/10.22093/wwj.2019.147624.2741>
- [3] Arbab, P., Ayati, B., & Ansari, M. R. (2019). Reducing the use of nanotitanium dioxide by switching from single photocatalysis to combined photocatalysis-cavitation in dye elimination. *Process Safety and Environmental Protection*, *121*, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.10.012>
- [4] Askarniya, Z., Sadeghi, M.-T., & Baradaran, S. (2020). Decolorization of Congo red via hydrodynamic cavitation in combination with Fenton's reagent. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, *150*, 107874. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2020.107874>
- [5] Badmus, K. O., Tijani, J. O., Massima, E., & Petrik, L. (2018). Treatment of persistent organic pollutants in wastewater using hydrodynamic cavitation in synergy with advanced oxidation process. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(8), 7299-7314. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1171-z>
- [6] Basiri Parsa, J., & Ebrahimzadeh Zonouzian, S. A. (2013). Optimization of a Multiple Impinging Jets Cavitation Reactor Using Zero-Valent Iron Powder as Catalyst. *Chemical Engineering & Technology*, *36*(9), 1585-1592. <https://doi.org/10.1002/ceat.201300100>
- [7] Bethi, B., Sonawane, S. H., Bhanvase, B. A., & Sonawane, S. S. (2021). Textile industry wastewater treatment by cavitation combined with fenton and ceramic nanofiltration membrane. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, *168*, 108540. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2021.108540>
- [8] Bethi, B., Sonawane, S. H., Potoroko, I., Bhanvase, B. A., & Sonawane, S. S. (2017). Novel hybrid system based on hydrodynamic cavitation for treatment of dye waste water: A first report on bench scale study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *5*(2), 1874-1884. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.03.026>
- [9] Cako, E., Gunasekaran, K. D., Soltani, R. D. C., & Boczkaj, G. (2020). Ultrafast degradation of brilliant cresyl blue under hydrodynamic cavitation based advanced oxidation processes (AOPs). *Water Resources and Industry*, *24*, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2020.100134>
- [10] Çalışkan, Y., Yatmaz, H. C., & Bektaş, N. (2017). Photocatalytic oxidation of high concentrated dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Safety and Environmental Protection*, *111*, 428-438. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.003>
- [11] Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, *97*(9), 1061-1085. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>
- [12] Gogate, P. R., & Bhosale, G. S. (2013). Comparison of effectiveness of acoustic and hydrodynamic cavitation in combined treatment schemes for degradation of dye wastewaters. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *71*, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2013.03.001>
- [13] Gogate, P. R., & 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>
- [14] Gore, M. M., Saharan, V. K., Pinjari, D. V., Chavan, P. V., & Pandit, A. B. (2014). Degradation of reactive orange 4 dye using hydrodynamic cavitation based hybrid techniques. *Ultrasonics Sonochemistry*, *21*(3), 1075-1082. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.11.015>
- [15] Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal - A review. *Journal of Environmental Management*, *90*(8), 2313-2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- [16] Innocenzi, V., Prisciandaro, M., Tortora, F., & Vegliò, F. (2018). Optimization of hydrodynamic cavitation process of azo dye reduction in the presence of metal ions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *6*(6), 6787-6796. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.046>
- [17] Khajeh, M., Amin, M. M., Taheri, E., Fatehizadeh, A., & McKay, G. (2020). Influence of co-existing cations and anions on removal of direct red 89 dye from synthetic wastewater by hydrodynamic cavitation process: An empirical modeling. *Ultrasonics Sonochemistry*, *67*, 105133. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105133>
- [18] Kharub, M. (2012). Use of Various Technologies, Methods and Adsorbents for The Removal of Dye. *Journal of Environmental Research and Development*, *6*(3A), 879-883.
- [19] Kumar, M. S., Sonawane, S., Bhanvase, B., & Bethi, B. (2018). Treatment of ternary dye wastewater by

- hydrodynamic cavitation combined with other advanced oxidation processes (AOP's). *Journal of Water Process Engineering*, 23, 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.04.004>
- [2] Lakshmi, N., Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2021). Treatment of acid violet 7 dye containing effluent using the hybrid approach based on hydrodynamic cavitation. *Process Safety and Environmental Protection*, 153, 178-191. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.07.023>
- [21] Li, P., Song, Y., Wang, S., Tao, Z., Yu, S., & Liu, Y. (2015). Enhanced decolorization of methyl orange using zero-valent copper nanoparticles under assistance of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.025>
- [22] Rajoriya, S., Bargole, S., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.028>
- [23] Rajoriya, S., Carpenter, J., Saharan, V. K., & Pandit, A. B. (2016). Hydrodynamic cavitation: an advanced oxidation process for the degradation of bio-refractory pollutants. *Reviews in Chemical Engineering*, 32(4), 1-33. <https://doi.org/10.1515/revce-2015-0075>
- [24] Saharan, V. K., Pandit, A. B., Satish Kumar, P. S., & Anandan, S. (2011). Hydrodynamic Cavitation as an Advanced Oxidation Technique for the Degradation of Acid Red 88 Dye. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(4), 1981-1989. <https://doi.org/10.1021/ie200249k>
- [25] Saharan, V. K., Rizwani, M. A., Malani, A. A., & Pandit, A. B. (2013). Effect of geometry of hydrodynamically cavitating device on degradation of orange-G. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.08.011>
- [26] Sivakumar, M., & 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)
- [27] Tao, Y., Cai, J., Huai, X., & Liu, B. (2017). A novel device for hazardous substances degradation based on double-cavitating-jets impingement: Parameters optimization and efficiency assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 335, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.046>
- [28] Tao, Y., Cai, J., Huai, X., Liu, B., & Guo, Z. (2016). Application of Hydrodynamic Cavitation to Wastewater Treatment. *Chemical Engineering & Technology*, 39(8), 1363-1376. <https://doi.org/10.1002/ceat.201500362>
- [29] Wang, J., Guo, Y., Guo, P., Yu, J., Guo, W., & Wang, X. (2014). Degradation of reactive brilliant red K-2BP in water using a combination of swirling jet-induced cavitation and Fenton process. *Separation and Purification Technology*, 130, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.04.020>
- [30] Wang, J., Wang, X., Guo, P., & Yu, J. (2011). Degradation of reactive brilliant red K-2BP in aqueous solution using swirling jet-induced cavitation combined with H₂O₂. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(2), 494-500. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.08.006>
- [31] Wang, X., Jia, J., & Wang, Y. (2010). Electrochemical degradation of reactive dye in the presence of water jet cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(3), 515-520. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.10.023>
- [32] Wang, X., Jia, J., & Wang, Y. (2011). Degradation of C.I. Reactive Red 2 through photocatalysis coupled with water jet cavitation. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1), 315-321. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.036>
- [33] Wang, X., Wang, J., Guo, P., Guo, W., & Li, G. (2008). Chemical effect of swirling jet-induced cavitation: Degradation of rhodamine B in aqueous solution. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(4), 357-363. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.09.008>
- [34] Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- [35] Yi, C., Lu, Q., Wang, Y., Wang, Y., & Yang, B. (2018). Degradation of organic wastewater by hydrodynamic cavitation combined with acoustic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 43, 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.01.013>
- [36] Zampeta, C., Bertaki, K., Triantaphyllidou, I.-E., Frontistis, Z., Koutsoukos, P., & Vayenas, D. V. (2022). Pilot-scale hybrid system combining hydrodynamic cavitation and sedimentation for the decolorization of industrial inks and printing ink wastewater. *Journal of Environmental Management*, 302, 114108. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114108>
- [37] Zampeta, C., Bertaki, K., Triantaphyllidou, I.-E., Frontistis, Z., & Vayenas, D. V. (2021). Treatment of real industrial-grade dye solutions and printing ink wastewater using a novel pilot-scale hydrodynamic cavitation reactor. *Journal of Environmental Management*, 297, 113301. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113301>