



ارزیابی عملکرد منعقدکننده طبیعی باقلا (*Vicia faba*) در کاهش آلاینده‌های COD، TSS، NH₄ و TP سیتاژ

سیده فاطمه موسوی^۱، لیلا اوشک‌سرای^۲، فاطمه شریعتی^{۳*}، فریبا صفا^۴، حسن کریم‌زادگان^۵

- ۱- گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران.
- ۲- گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران.
- ۳- گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران.
- ۴- گروه شیمی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران.
- ۵- گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	در این مطالعه، تصفیه فاضلاب سیتاژ با استفاده از یک فرآیند کلیدی و مؤثر در کاهش بار آلودگی فاضلاب تحت عنوان فرآیند انعقاد و لخته‌سازی انجام شد. در این راستا کاهش آلاینده‌گی سیتاژ از طریق بررسی منعقدکننده طبیعی باقلا (<i>Vicia faba</i>) مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور استخراج مؤثرترین ماده مؤثره منعقدکننده طبیعی، فرآیند عصاره‌گیری تحت شرایط مختلف به روش خیساندن انجام شد. به منظور تعیین مؤثرترین عصاره از نرم‌افزار SPSS23 استفاده شد. بر این اساس عصاره استخراج شد و منعقدکننده طبیعی در زمان عصاره‌گیری ۶ ساعته با حلال آب نمک به عنوان بهترین منعقدکننده انتخاب شد. به منظور بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر واکنش انعقاد و لخته‌سازی، روش تک‌متغیره (OFAT) مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، شرایط عملیاتی مناسب برای منعقدکننده طبیعی باقلا در pH برابر با ۶، غلظت منعقدکننده برابر با ۲۸۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان اختلاط تند برابر با ۲ دقیقه و زمان اختلاط کند برابر با ۳۰ دقیقه تعیین شد. مطالعه حاضر نشان داد که در شرایط عملیاتی، کاهش پارامترهای COD، TSS، NH ₄ و TP سیتاژ به ترتیب ۴۲/۰۱، ۵۴/۱۱، ۶۳/۷۷ و ۷۰/۲۴ درصد است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که روش تک‌متغیره قابلیت بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی را دارد و استفاده از منعقدکننده طبیعی باقلا می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مؤثر و پایدار در کاهش آلاینده‌های سیتاژ پیشنهاد شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰	
کلید واژه‌ها: سیتاژ، منعقدکننده، انعقاد و لخته‌سازی، عصاره‌گیری، ماسراسیون، باقلا (<i>Vicia faba</i>)	



Evaluation of the Performance of Broad Bean (*Vicia faba*) as a Natural Coagulant in Reducing COD, TSS, NH_4 , and TP in Septage

Seyedeh Fatemeh Mousavi¹, Leila Ooshaksaraie², Fatemeh Shariati^{3✉}, Fariba Safa⁴, Hassan Karimzadegan⁵

1- Department of Environment, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

2- Department of Environment, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

3- Department of Environment, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

4- Department of Chemistry, Ra.C., Islamic Azad University, Rasht, Iran.

5- Department of Environment, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

Article Info	Abstract
Article type: Research Article	In this study, septage treatment was investigated using coagulation and flocculation, a key and effective process for reducing wastewater pollutant loads. In this regard, the pollutant reduction performance of <i>Vicia faba</i> as a natural coagulant was examined. To effectively extract the active component of the natural coagulant, the extraction process was carried out under various conditions using the maceration method. SPSS 23 software was utilized to determine the most effective extract. Based on the results, the extract obtained after 6 hours of maceration using a saline solution was selected as the most effective natural coagulant. To investigate and optimize the parameters influencing the coagulation and flocculation process, an OFAT (one-factor-at-a-time) approach was employed. Accordingly, the optimal operating conditions for the natural coagulant were determined as follows: pH 6, coagulant dosage 280 mg/L, rapid mixing time 2 minutes, and slow mixing time 30 minutes. The present study showed that, under the operating conditions, the removal efficiencies of COD, TSS, NH_4, and TP from septage were 42.01%, 54.11%, 63.77%, and 70.24%, respectively. These findings indicate that the OFAT method can effectively investigate the impact of operational parameters on the coagulation and flocculation process, and that the use of <i>Vicia faba</i> as a natural coagulant can be proposed as an effective and sustainable option for reducing septage pollutants.
Article history:	
Received: 2025/12/27	
Accepted: 2026/05/16	
Available online: 2026/05/20	
Keywords: Septage, Coagulant, Coagulation and Flocculation, Extraction, Maceration, <i>Vicia faba</i>	

✉ Corresponding author E-mail address: fatemshariati@gmail.com

مقدمه

دسترسی پایدار به منابع آب، یکی از اولویتهای راهبردی برای بقای انسان و توسعه پایدار جوامع است (تایوو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). در سالهای اخیر، مدیریت پایدار منابع آبی به دلیل نقش کلیدی آن در حفظ محیط زیست، افزایش رفاه اجتماعی و رونق اقتصادی، توجه گستردهای یافته است (تشییرا^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). بهره‌برداری بیش از ظرفیت منابع آب، به یکی از چالش‌های جدی در مسیر توسعه پایدار تبدیل شد و در نتیجه در دهه‌های اخیر، فناوری‌های مختلف تصفیه آب و فاضلاب با هدف کاهش فشار بر منابع طبیعی توسعه یافته‌اند (انگ و محمد^۳، ۲۰۲۰). با رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی، فشار فزاینده‌ای بر زیرساخت‌های شهری به‌ویژه سیستم‌های دفع فاضلاب وارد شده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، تخلیه غیرمجاز فاضلاب و لجن سپتاژ توسط تانکرهای حمل سپتاژ است که می‌تواند سلامت عمومی را تهدید کند (بایو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰). سپتاژ پس از ماندگاری در چاه‌های جذبی و سپتیک‌تانک‌ها، تحت فرآیند تغلیظ قرار گرفته و به دلیل تغییرات فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی، کیفیت آن تغییر می‌یابد (سلاجقه و همکاران، ۱۴۰۳). بنابراین، تصفیه و استفاده مجدد از سپتاژ راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات منفی این پدیده و کمک به بحران کم‌آبی و توسعه پایدار محسوب می‌شود (بایو و همکاران، ۲۰۲۰). به علت نوع منبع تولید سپتاژ، غلظت آلاینده‌های آن می‌تواند ۱۰ تا ۱۰۰ برابر فاضلاب شهری باشد (جین^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). مشخصات کیفی شامل COD (۱۵۰۰ تا ۷۰۳۰۰۰ میلی گرم در لیتر)، کل جامدات (۱۱۳۲ تا ۱۳۰۴۷۵ میلی گرم در لیتر)، نیتروژن کل (۴ تا ۵۰۰ میلی گرم در لیتر)، نیتروژن آمونیاکی (۲ تا ۱۲۹ میلی گرم در لیتر) و فسفات کل (۵ تا ۲۷۶ میلی گرم در لیتر) در سپتاژ گزارش شده است (کریتهیکا^۶ و همکاران، ۲۰۱۷). از این رو سپتاژ را نمی‌توان معادل فاضلاب خام شهری دانست (سلاجقه و همکاران، ۱۴۰۳) و در بسیاری موارد تصفیه‌خانه‌های شهری توانایی حذف بار بالای آلودگی سپتاژ را ندارند (کینزلی^۷ و همکاران، ۲۰۱۷). با وجود اهمیت این موضوع، تصفیه سپتاژ در بسیاری از مطالعات و برنامه‌های اجرایی کمتر مورد توجه قرار گرفته و همین امر مدیریت سپتاژ را به یکی از چالش‌های محیط زیستی تبدیل کرده است (تن^۸ و همکاران، ۲۰۱۷). برای تصفیه سپتاژ روش‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند. به عنوان نمونه، سلاجقه و همکاران برای بخش مایع، تصفیه مستقل و برای بخش لجن، کمپوست را مناسب‌ترین روش دانستند و در لاگون بی‌هوازی به راندمان تقریبی ۵۰ درصد حذف COD و BOD و راندمان حذف ۷۰ درصد TSS دست یافتند (سلاجقه و همکاران، ۱۴۰۳). همچنین، میثمی و همکاران با توجه به آلاینده‌گی بیشتر سپتاژ نسبت به فاضلاب خام (به عنوان نمونه میزان TSS در سپتاژ برابر با ۷۹۰۰ میلی گرم در لیتر و فاضلاب خام شهری مشهود برابر با ۲۵۰ میلی گرم در لیتر)، استفاده از منعقدکننده‌های شیمیایی و اجرای فرآیند به صورت مستقل از فاضلاب شهری را پیشنهاد کردند (میثمی و همکاران، ۱۳۹۸). علاوه بر این، یوسفی و سیدی‌راد به دلیل سهولت اجرا، مقرون به صرفه بودن و کاهش MPN/100CC به کمتر از ۱۰۰۰ تصفیه کلیایی را مطرح کردند (یوسفی و سیدی‌راد، ۱۳۹۳). در مطالعه‌ای دیگر، بهره‌گیری از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از منعقدکننده طبیعی منجر به کاهش ۹۵/۸۹ درصد از میزان کدورت در نمونه فاضلاب شد (هسانین^۹، ۲۰۲۱). در مطالعه‌ای توسط کروز^{۱۰} و همکاران، به منظور کاهش آلاینده‌گی سپتاژ از روش انعقاد الکتریکی استفاده شد که به وسیله این روش، آمونیاک به ۹۷/۷۹ درصد، TSS به ۹۵/۸۳ درصد و COD به ۶۷/۵۰ درصد کاهش

1- Taiwo

2- Teixeira

3- Ang & Mohammad

4- Bao

5- Jain

6- Krithika

7- Kinsley

8- Tan

9- Hassanien

10- Cruz

یافت (کروز و همکاران، ۲۰۲۴). در پژوهشی، از دانه ریجان به عنوان منعقدکننده طبیعی در فرآیند تصفیه فاضلاب نساجی با هدف حذف ۶۸/۵۰ درصد از رنگ استفاده شد (شمس‌نجاتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). در مطالعه‌ای دیگر، از فرآیند پیش تصفیه سپتاژ قبل از ورود به بخش بیولوژیکی تصفیه‌خانه شهری استفاده شد. نتایج حاصل از این روش نشان‌دهنده کاهش آلاینده‌های سپتاژ به میزان ۸۲ درصد حذف COD و BOD5، ۹۱ درصد حذف TSS و ۷۱ درصد حذف TKN^۲ بود (کارولینچاک^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعه‌ای از منعقدکننده طبیعی دانه بنه (Pictacia atlantica) در تصفیه آب بوسیله روش سطح پاسخ استفاده شد. در این روش کدورت در شرایط بهینه ۹۵/۱۳ درصد کاهش یافت (شریفی^۴ و همکاران، ۲۰۲۱). از میان روش‌های رایج، انعقاد و لخته‌سازی به دلیل کارایی بالا و هزینه عملیاتی کمتر، گزینه مناسبی برای بهبود کیفیت پساب محسوب می‌شود (نیمشا^۵ و همکاران، ۲۰۲۲) و قابلیت استفاده مجدد پساب را در کاربردهای مختلف، از جمله کشاورزی و صنعت، افزایش می‌دهد (نیکونهاد و همکاران، ۱۳۹۶). در سال‌های اخیر، منعقدکننده‌های طبیعی به دلیل سازگاری بهتر با محیط زیست، توجه بیشتری یافته‌اند (الازایزا^۶ و همکاران، ۲۰۲۵). بهینه‌سازی پارامترهایی مانند pH، غلظت منعقدکننده و زمان اختلاط تند و کند نیز برای دستیابی به راندمان بالاتر ضروری است (الطویل^۷ و همکاران، ۲۰۲۳). از نظر مکانیسم، منعقدکننده‌های طبیعی برخلاف بسیاری از منعقدکننده‌های شیمیایی باعث تشکیل رسوبات هیدروکسیدی نمی‌شوند و عمدتاً از طریق خنثی‌سازی بار سطحی ذرات و ایجاد پل بین ذرات، موجب تشکیل لخته و کاهش ناخالصی‌ها می‌شوند (انگ و محمد، ۲۰۲۰). با وجود اثربخشی بالای منعقدکننده‌های شیمیایی، حجم لجن تولیدی آن‌ها معمولاً زیاد است و این مسئله نگرانی‌های محیط زیستی و پیامدهای مرتبط با سلامت را افزایش می‌دهد. در مقابل، منعقدکننده‌های طبیعی به دلیل در دسترس بودن، تجزیه‌پذیری بیولوژیک، ایمنی بیشتر، تولید لجن کمتر و هزینه پایین‌تر، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مورد توجه قرار گرفته‌اند (شریفی و همکاران، ۲۰۲۱). بر این اساس، در این مطالعه با هدف کاهش آلاینده‌های سپتاژ و بهینه‌سازی فرآیند با روش تک‌متغیره^۸، از گیاه باقلا به عنوان یک منعقدکننده طبیعی و بومی استفاده شده است. باقلا به عنوان محصول کشاورزی پرمحصول در ایران، دارای مقادیر قابل توجهی پروتئین و پلی‌ساکارید در پوست و دانه است. به کارگیری آن می‌تواند علاوه بر ایجاد ارزش افزوده، با جایگزینی مواد شیمیایی هزینه تصفیه را کاهش دهد و به توسعه فناوری‌های سبز در تصفیه کمک کند. با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه منعقدکننده‌های طبیعی، کاربرد باقلا تاکنون به شکل مؤثر بررسی نشده است. همچنین اغلب مطالعات پیشین عمدتاً بر حذف کدورت و COD تمرکز داشته‌اند، در حالی که این پژوهش به طور اختصاصی توانایی باقلا در حذف همزمان آلاینده‌های نیتروژنی همراه با پارامترهای استاندارد (COD، TSS و TP) در سپتاژ با بار آلودگی بالا را دنبال می‌کند؛ موضوعی که می‌تواند به عنوان راهکاری نوین برای کنترل فرآیند یوتروفیکاسیون مطرح شود.

مواد و روش‌ها

● مواد

گیاه باقلا به عنوان منعقدکننده طبیعی از بازار محلی خریداری شد. نمونه سپتاژ جمع‌آوری شده تا زمان انجام آزمایش

1- Shamsnejati

2- Total Kjeldahl Nitrogen

3- Karolinczak

4- Sharifi

5- Nimesha

6- Alazaiza

7- El-taweel

8- One-Factor-at-a-Time

در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. برای تنظیم pH از NaOH و HCl خریداری شده از شرکت مرک آلمان استفاده شد. در این مطالعه جهت انجام آزمایش‌ها، تجهیزاتی نظیر جارتست (مدل PIK.CO - ساخت کشور ایران) برای تعیین شرایط بهینه عملیاتی، اسپکتروفتومتر (مدل WTW spectroflex 6100 - ساخت کشور آلمان)، pH متر (مدل WTW inolab 740 - ساخت کشور آلمان)، ترازو (Scilab WBA-110M - ساخت کشور آلمان)، شیکر جهت هم‌زدن، مخلوط کردن، یکنواخت‌سازی و آماده‌سازی نمونه‌ها در روش ماسراسیون^۱ قبل از سنجش پارامترها (مدل Rotomix - ساخت کشور ایران) و آون (مدل Memmert - ساخت کشور ایران) مورد استفاده قرار گرفتند.

• روش آماده‌سازی منعقدکننده طبیعی

پوست‌های دوم باقلا پس از تهیه و آسیاب شدن به مقدار ۱۲۰ گرم، با روش ماسراسیون در حجم‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و آب نمک ۱۰ درصد (تهیه غلظت‌های ۱۲ و ۲۴ درصد) استخراج شدند. فرآیند استخراج در دمای محیط و با استفاده از شیکر (۶۵ دور در دقیقه) در زمان‌های ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت انجام شد. غلظت عصاره‌های به دست آمده پس از فیلتر و خشک شدن تعیین و به نمونه‌های سپتاژ با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر افزوده شد (میربلوکی و همکاران، ۱۳۹۵؛ شریفی و همکاران، ۲۰۲۱).

• روش تحلیل

به منظور ارزیابی تصفیه‌پذیری و تعیین میزان کاهش پارامترهای COD، TSS، NH₄ و TP سپتاژ از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از دستگاه جارتست استفاده شد. برای تعیین مؤثرترین عصاره باقلا، داده‌ها ابتدا با آزمون شاپیرو-ویلک^۲ از نظر نرمال بودن بررسی و سپس با تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) در نرم‌افزار SPSS 23 مقایسه شدند. به منظور تعیین مقدار بهینه پارامترهای عملیاتی (غلظت منعقدکننده، pH، زمان اختلاط تند و زمان اختلاط کند)، روش تک‌متغیره به کار گرفته شد که در آن هر متغیر به طور مستقل و در بازه‌های تعیین‌شده بر اساس مطالعات پیشین و آزمایش‌های مقدماتی طبق جدول (۱) تغییر یافت. در نهایت، درصد حذف آلاینده‌ها از طریق مقایسه نمونه‌های خام و تصفیه‌شده بر اساس فرمول‌های (۱ تا ۴) محاسبه شد.

جدول (۱) سطوح متغیرهای مستقل عملیاتی

نام متغیر	واحد	سطح پایین (-۱)	سطح بالا (+۱)
غلظت منعقدکننده	mg/L	۵۰	۵۰۰
pH	-	۴	۱۰
زمان اختلاط تند	Minutes	۱	۵
زمان اختلاط کند	Minutes	۱۵	۴۵

$$\text{COD (\%)} = \frac{(\text{COD}_0 - \text{COD})}{\text{COD}_0} \times 100 \quad (۱)$$

$$\text{TSS (\%)} = \frac{(\text{TSS}_0 - \text{TSS})}{\text{TSS}_0} \times 100 \quad (۲)$$

$$\text{NH}_4 (\%) = \frac{(\text{NH}_{40} - \text{NH}_4)}{\text{NH}_{40}} \times 100 \quad (۳)$$

$$\text{TP (\%)} = \frac{(\text{TP}_0 - \text{TP})}{\text{TP}_0} \times 100 \quad (۴)$$

1- Maceration

2- Shapiro-Wilk Test

که در آن: COD_0 ، TSS_0 ، NH_4_0 و TP_0 مقادیر قبل تصفیه و COD ، TSS ، NH_4 و TP مقادیر بعد تصفیه می‌باشند (رسول و همکاران، ۱۳۹۳).

یافته‌های پژوهش

• بررسی مشخصه‌های سپتاژ خام

نمونه‌های سپتاژ خام در این مطالعه، از سپتیک‌تانک‌های خانگی جمع‌آوری شده و پارامترهای COD ، TSS ، NH_4 و TP آن پس از انتقال به آزمایشگاه مورد تحلیل قرار گرفتند. جدول (۲)، میانگین و انحراف استاندارد آلاینده‌های سپتاژ خام را با سه بار تکرار نشان می‌دهد.

جدول (۲) میانگین و انحراف استاندارد پارامترهای COD ، TSS ، NH_4 و TP سپتاژ خام

ماه	شهریور			میانگین $\pm$ استاندارد
	روز	۱	۱۸	۲۶
سال	۱۴۰۳	۱۴۰۳	۱۴۰۳	۱۴۰۳
$COD (mg/L)$	۱۷۴۰	۱۹۶۰	۲۱۸۰	220 ± 1960
$TSS (mg/L)$	۲۴۳۰	۲۱۸۰	۱۹۳۰	250 ± 2180
$NH_4 (mg/L)$	۱۴۰	۱۵۵	۱۷۰	155 ± 15
$TP (mg/L)$	۲۸/۶۲	۴۰/۳۲	۵۲/۶۲	$40/12 \pm 52$

• بررسی اثر شرایط استخراج در عصاره‌گیری باقلا

جدول (۳)، مقادیر غلظت عصاره باقلا در شرایط مختلف ماسراسیون شامل نوع حلال (آب نمک، آب مقطر)، حجم حلال (۵۰۰، ۱۰۰۰ میلی‌لیتر) و زمان اختلاط (۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت) را نشان می‌دهد.

جدول (۳) مقادیر غلظت عصاره باقلا در شرایط مختلف ماسراسیون

ردیف	مقدار وزنی پوست باقلا (گرم)	نوع حلال	حجم حلال (میلی‌لیتر)	زمان (ساعت)	غلظت عصاره (mg/L)
۱	۱۲۰	آب مقطر	۱۰۰۰	۶	۳۵۱۱۹
۲			۵۰۰	۶	۴۳۵۰۵
۳			۱۰۰۰	۲۴	۲۵۵۹
۴			۵۰۰	۲۴	۴۰۰۷
۵			۱۰۰۰	۴۸	۱۱۳۸
۶			۵۰۰	۴۸	۱۶۲۵
۷	۱۲۰	آب نمک	۱۰۰۰	۶	۷۸۹۱۲
۸			۵۰۰	۶	۸۹۹۷۵
۹			۱۰۰۰	۲۴	۶۱۱۲۹
۱۰			۵۰۰	۲۴	۶۸۳۹۰
۱۱			۱۰۰۰	۴۸	۱۶۱۰۵
۱۲			۵۰۰	۴۸	۲۲۷۹۱

جدول (۴)، نتایج آزمون آنالیز واریانس (ANOVA) یک طرفه را نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که درصد کاهش پارامترهای TSS، COD، NH₄ و TP در حضور حلال آب نمک (Sw1^۱ و Sw2^۲) و حلال آب مقطر (Dw1^۳ و Dw2^۴) در غلظت‌های مختلف، تفاوت‌های معناداری دارد ($P < 0.05$). میانگین درصد COD در گروه Sw1 نسبت به Sw2 به میزان ۲/۲۷ ($P = 0.35$) کاهش یافته و در مقایسه با گروه‌های Dw1 و Dw2 به ترتیب ۶/۴۵ و ۵/۴۷ ($P < 0.001$) افزایش داشته است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه نوع و غلظت حلال بر درصد کاهش COD است. میانگین درصد TSS در گروه Sw1 نسبت به Sw2 به میزان ۲/۷۴ ($p = 0.48$) کاهش یافته، در حالی که در مقایسه با گروه Dw1 به میزان ۹/۳۹ و Dw2 به میزان ۷/۹۸ ($P < 0.001$) افزایش نشان می‌دهد. میانگین درصد کاهش NH₄ در گروه Sw1 نسبت به Sw2 به میزان ۲/۹۵ ($p = 0.08$) کاهش یافته و در مقایسه با گروه‌های Dw1 و Dw2 به ترتیب ۱۰/۸۲ و ۹/۱۹ ($P = 0.001$) افزایش معناداری دارد. میانگین درصد کاهش TP در گروه Sw1 نسبت به Sw2 به میزان ۲/۹۹ ($P = 0.21$) کاهش یافته، در حالی که گروه Dw1 به میزان ۱۱/۵۶ و Dw2 به میزان ۹/۸۲ ($p < 0.001$) افزایش معناداری را نشان می‌دهند.

جدول (۴) میانگین و انحراف معیار اثر نوع و غلظت حلال (Sw1، Sw2، Dw1 و Dw2) بر درصد کاهش پارامترهای COD، TSS، NH₄ و TP سپتاژ

نام پارامتر	Sw1	Sw2	Dw1	Dw2	میانگین $\pm$ انحراف معیار
COD%	b7/69 31/63 $\pm$	a8/66 33/90 $\pm$	c5/86 25/18 $\pm$	c6/21 26/15 $\pm$	c3/65 29/21 $\pm$
TSS%	b9/99 46/09 $\pm$	a10/98 48/83 $\pm$	c7/54 36/70 $\pm$	c8/01 38/11 $\pm$	c5/14 42/43 $\pm$
NH ₄ %	b8 53/10 $\pm$	a9/14 56/06 $\pm$	c5/68 42/28 $\pm$	c6/22 43/91 $\pm$	c5/86 48/83 $\pm$
TP%	b9/44 56/75 $\pm$	a10/39 59/75 $\pm$	c6/85 45/18 $\pm$	c7/42 46/93 $\pm$	c6/21 52/15 $\pm$

حروف غیر مشترک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در گروه است ($p < 0.05$). عدد ۱ نشان‌دهنده محلول ۱۲ درصد و عدد ۲ نشان‌دهنده محلول ۲۴ درصد است.

جدول (۵)، میانگین و انحراف معیار اثر زمان عصاره‌گیری بر درصد کاهش پارامترهای سپتاژ را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، علاوه بر پارامترهای نوع و غلظت حلال، زمان‌های مختلف عصاره‌گیری (۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت) نیز اثر معناداری را بر درصد کاهش آلاینده‌های سپتاژ نشان می‌دهد ($P < 0.05$). به‌طور کلی، درصد پارامترهای TSS، COD، NH₄ و TP به ترتیب از ۳۴/۱۸، ۴۹/۳۸، ۵۶/۷۵ و ۶۰/۵۳ در ۶ ساعت به ۲۴/۲۷، ۳۵/۳۷، ۴۰/۷۵ و ۴۳/۵۵ در ۴۸ ساعت، کاهش یافته است ($P < 0.05$).

جدول (۵) میانگین و انحراف معیار اثر زمان عصاره‌گیری (۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت) بر درصد کاهش پارامترهای COD، TSS، NH₄ و TP سپتاژ

نام پارامتر	۶	۲۴	۴۸	میانگین $\pm$ انحراف معیار
COD%	a8/02 34/18 $\pm$	a7/35 29/20 $\pm$	c5/23 24/27 $\pm$	a7/95 29/21 $\pm$
TSS%	a9/02 49/38 $\pm$	a9/63 42/55 $\pm$	c7/56 35/37 $\pm$	a7 42/43 $\pm$
NH ₄ %	a7/48 56/75 $\pm$	a8/05 49/02 $\pm$	c7/19 40/75 $\pm$	a8 48/84 $\pm$
TP%	a8/85 60/53 $\pm$	a9/36 52/39 $\pm$	c7/41 43/55 $\pm$	a8/49 52/15 $\pm$

حروف غیر مشترک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در گروه است ($p < 0.05$)

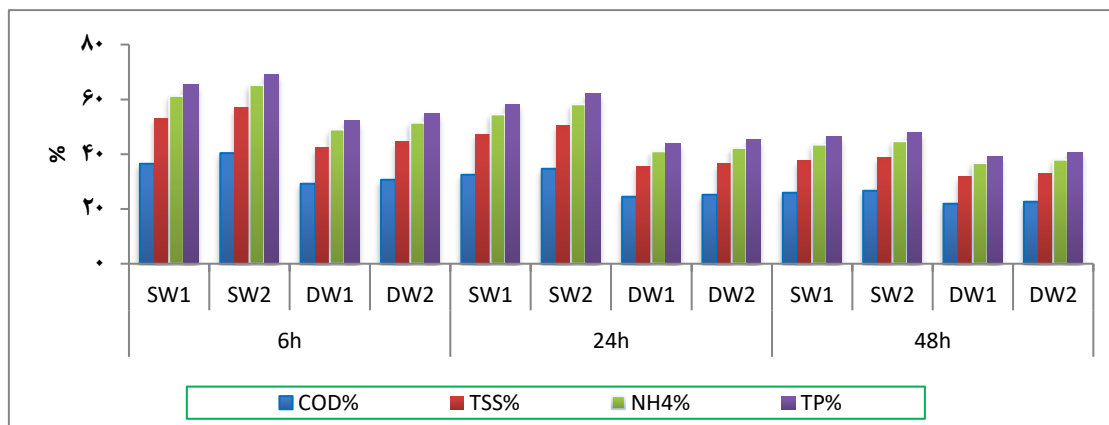
1- Salt Water (%2.5)

2- Salt Water (%5)

3- Distilled Water (%2.5)

4- Distilled Water (%5)

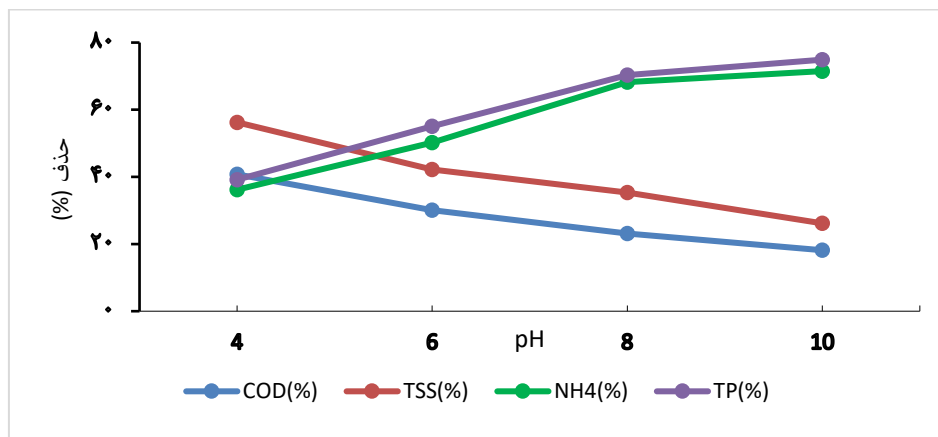
تحلیل‌های آماری تایید کرد که زمان عصاره‌گیری، نوع و غلظت حلال اثرات معناداری ($P < 0.05$) بر کاهش آلاینده‌های سپتاژ دارند. شکل (۱)، درصد کاهش آلاینده‌های سپتاژ را در شرایط مختلف استخراج نشان می‌دهد. بر این اساس، تفاوت بین زمان عصاره‌گیری بسیار چشمگیر بود (سطح اطمینان بیشتر از ۹۹/۹۹ درصد). همچنین، در بررسی نوع حلال و غلظت‌های متفاوت، تفاوت‌های معناداری بین گروه‌های SW1، SW2، DW1 و DW2 وجود داشت، اما بین DW1 و DW2 تفاوت معناداری مشاهده نشد ($P = 0.183$).



شکل (۱) درصد کاهش پارامترهای COD، TSS، NH₄ و TP در شرایط مختلف استخراج

• اثر تغییرات pH بر حذف پارامترهای سپتاژ

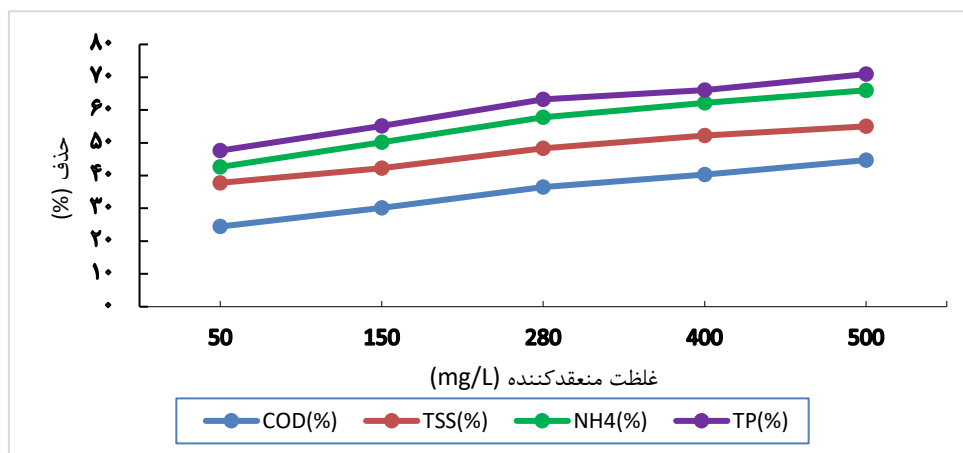
pH به دلیل تأثیر مستقیم بر تشکیل و انحلال هیدروکسیدهای فلزی، همواره بر عملکرد حذف COD، TSS، NH₄ و TP مؤثر است (کرامت و سیدی، ۱۳۹۴). مطابق شکل (۲)، اثر تغییرات pH در محدوده ۴ تا ۱۰، در حالی که سایر متغیرها (غلظت منعقدکننده معادل ۱۵۰ میلی گرم در لیتر، زمان اختلاط تند معادل ۲ دقیقه و زمان اختلاط کند معادل ۲۰ دقیقه) ثابت بودند، ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با افزایش pH، راندمان حذف COD و TSS روند کاهشی و راندمان حذف NH₄ و TP روند افزایشی داشت. هر چند حداکثر راندمان حذف COD و TSS در pH معادل ۴ و NH₄ و TP در pH معادل ۱۰ مشاهده شده است، اما جهت ادامه فرآیند، تعیین بهترین pH ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اهمیت حیاتی پارامتر COD در محیط زیست و به منظور ایجاد تعادل میان خنثی‌سازی بار ذرات (مؤثر بر TSS) و فرآیندهای شیمیایی حذف فسفر، pH برابر با ۶ به عنوان مناسب‌ترین مقدار تعیین شد. انتخاب این مقدار علاوه بر پایداری عملیاتی، نیاز به تنظیم‌های شیمیایی اضافی را کاهش می‌دهد. انتخاب pH مناسب بر اساس تحلیل دقیق روند حذف آلاینده‌ها در محیط اکسل و با در نظر گرفتن تعادل بین پارامترهای مختلف (نه فقط یک پارامتر) انجام شده است. میزان حذف پارامترهای COD، TSS، NH₄ و TP در pH برابر با ۶ به ترتیب ۳۰/۱۲، ۴۲/۲۳، ۵۰/۱۹ و ۵۵/۱۱ درصد بوده است.



شکل (۲) اثر تغییرات pH بر حذف پارامترهای سپتاژ شامل COD، TSS، NH₄ و TP

• اثر تغییرات غلظت منعقدکننده بر حذف پارامترهای سپتاژ

شکل (۳)، اثر تغییر غلظت منعقدکننده (۵۰ تا ۵۰۰ میلی گرم در لیتر) را بر حذف پارامترهای سپتاژ در pH معادل ۶، زمان اختلاط تند معادل ۲ دقیقه و زمان اختلاط کند معادل ۲۰ دقیقه نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش غلظت، راندمان حذف COD، TSS، NH₄ و TP به صورت یکنواخت افزایش یافته است. بیشترین راندمان حذف در غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر، برای پارامتر TP (۷۰/۹۳ درصد) و کمترین برای COD (۴۴/۷۱ درصد) گزارش شد. با این حال، از غلظت ۲۸۰ تا ۵۰۰ میلی گرم در لیتر، افزایش راندمان از نظر آماری معنادار نبود ($p > 0.05$)، و منجر به افزایش تولید لجن و شوری پساب شد. لذا غلظت ۲۸۰ میلی گرم در لیتر به عنوان نقطه مناسب اقتصادی-زیست‌محیطی انتخاب شد که در آن میزان حذف پارامترهای COD، TSS، NH₄ و TP به ترتیب ۳۶/۴۸، ۴۸/۲۵، ۵۷/۷۶ و ۶۳/۲۲ درصد بوده است.

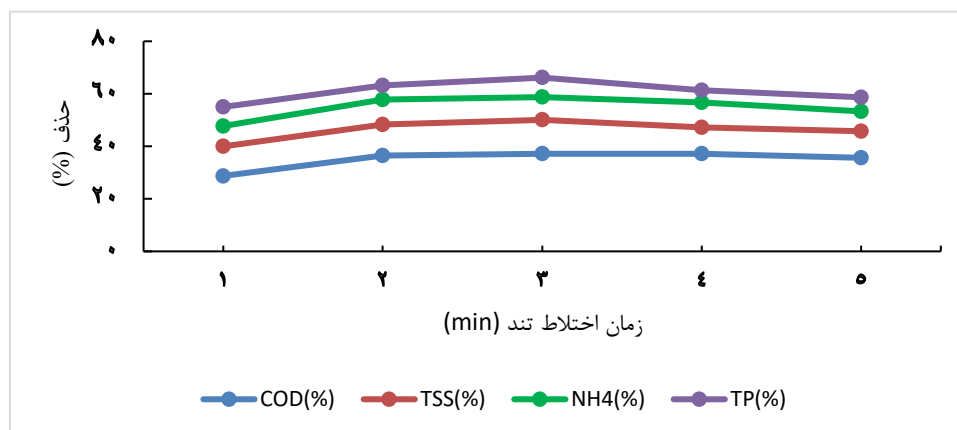


شکل (۳) اثر تغییرات غلظت منعقدکننده بر حذف پارامترهای سپتاژ شامل COD، TSS، NH₄ و TP

• اثر تغییرات زمان اختلاط تند بر حذف پارامترهای سپتاژ

شکل (۴)، اثر تغییر زمان اختلاط تند (۱ تا ۵ دقیقه) را بر راندمان حذف پارامترهای سپتاژ در شرایط ثابت (pH معادل ۶، غلظت منعقدکننده معادل ۲۸۰ میلی گرم در لیتر و زمان اختلاط کند معادل ۲۰ دقیقه) نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش زمان اختلاط از ۱ به ۳ دقیقه، راندمان حذف تمامی آلاینده‌ها افزایش یافت. به طوری که

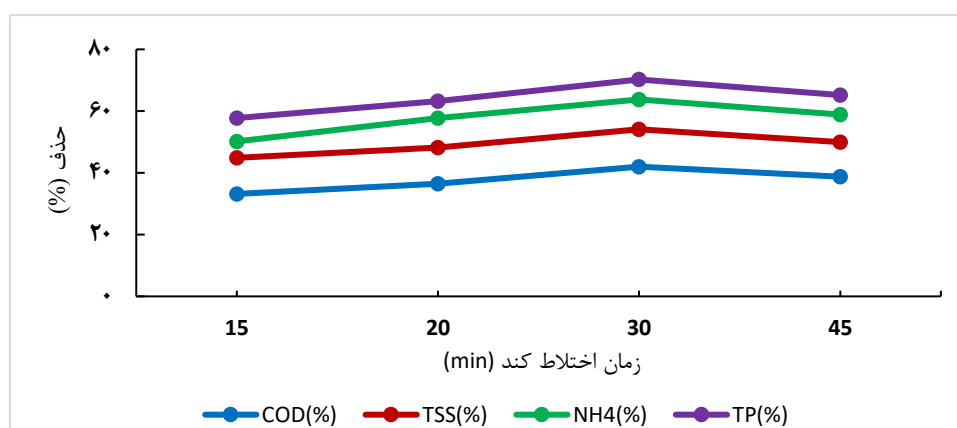
بیشترین میزان حذف در زمان ۳ دقیقه مشاهده شد. با این حال، افزایش زمان اختلاط به ۵ دقیقه منجر به کاهش نسبی راندمان شد. با توجه به اینکه میزان بهبود راندمان بین دقایق ۲ و ۳ کمتر از ۵ درصد بود، زمان اختلاط تند ۲ دقیقه به عنوان مناسب‌ترین زمان انتخاب شد که در آن راندمان حذف COD، TSS، NH₄ و TP به ترتیب برابر با ۳۶/۴۸، ۴۸/۲۵، ۵۷/۷۶ و ۶۳/۲۲ درصد بدست آمد.



شکل (۴) اثر تغییرات زمان اختلاط تند بر حذف پارامترهای سپتاژ شامل COD، TSS، NH₄ و TP

● اثر تغییرات زمان اختلاط کند بر حذف پارامترهای سپتاژ

شکل (۵)، اثر زمان اختلاط کند (۱۵ تا ۴۵ دقیقه) را بر راندمان حذف پارامترهای سپتاژ در شرایط ثابت (pH معادل ۶، غلظت منعقدکننده معادل ۲۸۰ میلی گرم در لیتر و زمان اختلاط تند معادل ۲ دقیقه) نشان می‌دهد. با افزایش زمان از ۱۵ به ۳۰ دقیقه، راندمان حذف آلاینده‌ها به طور قابل توجهی افزایش داشته است. به طوری که COD با ۴۲/۰۱، TSS با ۵۴/۱۱، NH₄ با ۶۳/۷۷ و TP با ۷۰/۲۴ درصد بیشترین میزان حذف را در زمان ۳۰ دقیقه داشته‌اند، اما با افزایش بیشتر زمان به ۴۵ دقیقه، راندمان حذف کاهش یافت. علت این کاهش، ایجاد نیروی برشی بیش از حد توسط همزن و شکستن لخته‌های بزرگ به ذرات ریزتر بوده که ته‌نشینی آن‌ها را دشوار می‌کند. بنابراین، زمان ۳۰ دقیقه به عنوان زمان مناسب اختلاط کند انتخاب شد.



شکل (۵) اثر تغییرات زمان اختلاط کند بر حذف پارامترهای سپتاژ شامل COD، TSS، NH₄ و TP

• نتایج روش تک متغیره

در این مطالعه، تأثیر مستقل هر پارامتر عملیاتی بر راندمان حذف آلاینده‌ها با استفاده از روش تک‌متغیره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از نمودارها نشان داد که هر عامل به تنهایی نقش مؤثری در بهبود عملکرد فرآیند تصفیه دارد و شرایط مناسب برای حذف هر آلاینده به طور جداگانه تعیین شد. بر اساس شکل های (۲ تا ۵)، میزان حذف پارامترهای NH_4 ، TSS، COD و TP سپتاژ به طور خلاصه در جدول (۶) ارائه شده است. بر اساس جدول، نتایج بیانگر آن است که بهترین عملکرد فرآیند در pH برابر با ۶، غلظت منعقدکننده برابر با ۲۸۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان اختلاط تند برابر با ۲ دقیقه و زمان اختلاط کند برابر با ۳۰ دقیقه حاصل شد.

جدول (۶) میزان حذف پارامترهای NH_4 ، TSS، COD و TP سپتاژ در شرایط عملیاتی پیشنهادی

شرایط عملیاتی	COD%	TSS%	NH4%	TP%
pH: ۶				
غلظت منعقدکننده: ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر	۳۰/۱۲	۴۲/۲۳	۵۰/۱۹	۵۵/۱۱
زمان اختلاط تند: ۲ دقیقه				
زمان اختلاط کند: ۲۰ دقیقه				
pH: ۶				
غلظت منعقدکننده: ۲۸۰ میلی‌گرم در لیتر	۳۶/۴۸	۴۸/۲۵	۵۷/۷۶	۶۳/۲۲
زمان اختلاط تند: ۲ دقیقه				
زمان اختلاط کند: ۲۰ دقیقه				
pH: ۶				
غلظت منعقدکننده: ۲۸۰ میلی‌گرم در لیتر	۳۶/۴۸	۴۸/۲۵	۵۷/۷۶	۶۳/۲۲
زمان اختلاط تند: ۲ دقیقه				
زمان اختلاط کند: ۲۰ دقیقه				
pH: ۶				
غلظت منعقدکننده: ۲۸۰ میلی‌گرم در لیتر	۴۲/۰۱	۵۴/۱۱	۶۳/۷۷	۷۰/۲۴
زمان اختلاط تند: ۲ دقیقه				
زمان اختلاط کند: ۳۰ دقیقه				

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی میزان تصفیه‌پذیری سپتاژ با استفاده از منعقدکننده طبیعی باقلا (*Vicia faba*) پرداخته شد. پس از تعیین بهترین شرایط عصاره‌گیری در راستای استخراج مؤثرترین عصاره منعقدکننده طبیعی و تعیین محدوده پارامترهای عملیاتی تأثیرگذار، تعیین مناسب‌ترین شرایط آزمایشات به روش تک‌متغیره انجام شد. در این آزمایش‌ها، مقدار منعقدکننده در محدوده غلظتی ۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، مقدار pH در محدوده ۴ تا ۱۰، زمان اختلاط تند در محدوده ۱ تا ۵ دقیقه و زمان اختلاط کند در محدوده ۱۵ تا ۴۵ دقیقه انتخاب شد. سپس شرایط عملکرد فرایند کاهش آلودگی سپتاژ تعیین شده و داده‌های حاصل مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، نتایج زیر حاصل شد: (۱) بهترین عصاره استخراج شده در شرایط استخراج با زمان عصاره‌گیری ۶ ساعت و با محلول نمکی ۵ درصد به دست آمد که در مقایسه با سایر عصاره‌ها، در کاهش پارامترهای NH_4 ، TSS، COD و TP سپتاژ عملکرد بالاتری داشت. (۲) بر اساس یافته‌های این مطالعه، بالاترین کاهش آلاینده‌گی سپتاژ در شرایطی که pH برابر با ۶، غلظت منعقدکننده برابر با ۲۸۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان اختلاط تند برابر با ۲ دقیقه و زمان اختلاط کند برابر با ۳۰ دقیقه بود، تعیین شد. (۳) در شرایط عملیاتی پیشنهادی فرایند انعقاد و لخته‌سازی، میزان کاهش پارامترهای COD،

TSS، NH₄ و TP سپتاژ به ترتیب ۴۲/۰۱، ۵۴/۱۱، ۶۳/۷۷ و ۷۰/۲۴ درصد بود.

● اثر شرایط استخراج در عصاره‌گیری باقلا

نتایج اثر شرایط استخراج در عصاره‌گیری باقلا نشان داد که کاهش پارامترهای COD، TSS، NH₄ و TP سپتاژ تحت تأثیر نوع حلال، غلظت و زمان عصاره‌گیری است. بر اساس نتایج، بهترین عملکرد در شرایط استخراج با آب نمک ۲۴ درصد و زمان ۶ ساعت حاصل شد. برتری آب نمک نسبت به آب مقطر به دلیل وجود یون‌های مثبت و منفی است که موجب خنثی‌سازی بار سطحی آلاینده‌ها، تشکیل لخته‌های بزرگ‌تر و تسهیل ته‌نشینی می‌شود (اوکودا^۱ و همکاران، ۲۰۰۱). این نتایج با مطالعات سایر محققین مقایسه شد. در مطالعه‌ای که بر تأثیر پارامترهای کیفی آب (آب نمک و آب مقطر) بر راندمان انعقاد به‌وسیله منعقدکننده دانه مورینگا اولیفر^۲ انجام شد، مشخص شد که استفاده از آب نمک به عنوان حلال در عصاره‌گیری دانه مورینگا مانند باقلا، عملکرد انعقاد را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. آب نمک از طریق افزایش انحلال پروتئین‌های فعال و تقویت بار مثبت آن‌ها موجب خنثی‌سازی بار منفی ذرات معلق شد. این عصاره در برابر تغییرات pH، سختی و شوری آب پایدارتر بوده و در حذف کدورت تا ۸۹ درصد راندمان بهتری نسبت به عصاره استخراج شده با آب مقطر را نشان داد (گلستانباغ^۳ و همکاران، ۲۰۱۵). مگرسا^۴ در مطالعه خود بیان داشت نمک با آزادسازی بهتر ترکیبات فعال منعقدکننده از ساختار گیاه منجر به حذف مؤثرتر آلاینده‌ها شد (مگرسا و همکاران، ۲۰۱۹). یکی دیگر از شرایط عصاره‌گیری در این مطالعه، مربوط به غلظت حلال است. غلظت ۲۴ درصد نمک به دلیل افزایش قدرت یونی محلول، استخراج مؤثرتری از پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدهای فعال ایجاد کرد و از تخریب بافت گیاه جلوگیری نمود. نتایج مطالعات پیشین نشان داد که عصاره خوش‌اریزه حاصل از استخراج اتانول ۱۰۰ درصد منجر به استخراج مؤثرتر عصاره شده که می‌تواند ۱۰۰ درصد پروتواسکولکس‌های^۵ زنده استحصال شده (نوزادان انگل) را از بین ببرد (قربانی‌پور و همکاران، ۱۴۰۱).

بر اساس جدول (۵) بالاترین کاهش در آلاینده‌های سپتاژ در زمان ۶ ساعت اتفاق افتاد. این بدان علت است که ترکیبات فعال در ساعات اولیه خاصیت انعقادی بیشتری داشته و در زمان طولانی‌تر، احتمال تخریب مواد مؤثره، رشد میکروبی و تولید تانن‌های اثرگذار بر کاهش راندمان انعقاد افزایش می‌یابد. با بررسی مطالعات گذشته، مشخص شد زمان استخراج کوتاه‌تر مورینگا اولیفر^۳، منجر به غلظت بالاتر پروتئین‌های فعال و بار مثبت بیشتر در عصاره می‌شود. با افزایش زمان استخراج، عملکرد انعقاد کاهش می‌یابد (جونگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات هم‌راستا، خواص انعقادی مثبت عصاره‌های باقلا را به‌عنوان منعقدکننده‌های طبیعی تأیید می‌کند (کوکچ^۷ و همکاران، ۲۰۱۵).

● اثر تغییرات pH بر حذف پارامترهای سپتاژ

نتایج بررسی تأثیر pH بر راندمان حذف آلاینده‌ها مطابق با شکل (۲) نشان داد، حداکثر راندمان حذف COD و TSS در pH برابر با ۴ بوده است. در pH اسیدی، پروتونه شدن گروه‌های آمینی پروتئین‌های عصاره باقلا موجب خنثی‌سازی بار سطحی ذرات معلق و تقویت حذف TSS می‌شود و همچنین با تغییر بار سطحی ذرات و منعقدکننده، تجمع و ته‌نشینی ترکیبات آلی افزایش می‌یابد. کاهش راندمان COD با افزایش pH می‌تواند با کاهش فعالیت رادیکال‌های هیدروکسیل در محیط‌های بازی مرتبط باشد (چن^۸ و همکاران، ۲۰۲۱). همسو با این موضوع، برخی مطالعات بیان

1- Okuda

2- Moringa oleifera

3- Golestanbagh

4- Megersa

5- Protoscolicess

6- Jung

7- Kukic

8- Chen

می‌کنند که در pH اسیدی به دلیل وجود یونهای فلزی فعال، کمپلکس‌سازی و لخته‌سازی مؤثرتر رخ می‌دهد و با افزایش مکان‌های فعال منعقدکننده، نیروهای جاذبه الکتروستاتیکی تقویت شده و راندمان حذف COD و TSS افزایش می‌یابد (شمس‌نجاتی و همکاران، ۲۰۱۵). این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پیشین نیز هم‌راستا است. به‌عنوان نمونه، در تصفیه فاضلاب با منعقدکننده طبیعی، حداکثر حذف TSS در pH معادل ۵ برابر با ۹۲/۸ درصد گزارش شده است (جواکین^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین استفاده از روش تصفیه ترکیبی برای فاضلاب خمیر و کاغذ در pH معادل ۳، منجر به راندمان حذف COD برابر با ۹۵/۲۰ درصد شده که با نتایج حاضر همخوانی دارد (عابدین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶). در مطالعه‌ای دیگر نیز پیش تصفیه شیرابه با منعقدکننده طبیعی ریحان در ترکیب با آلوم در pH معادل ۷ منجر به حذف ۶۵ درصد COD شده است (رسول و همکاران، ۱۳۹۳).

بر اساس شکل (۲)، حداکثر حذف NH_4 و TP در pH معادل ۱۰ به دست آمد. راندمان بالای حذف این پارامترها را می‌توان به تغییرات شیمیایی و تشکیل ترکیبات فرار یا نامحلول در pH قلیایی نسبت داد. NH_4 در pH بازی به آمونیاک تبدیل شده و از محیط خارج می‌شود. همچنین افزایش حذف فسفر در این شرایط ناشی از تغییر مکانیسم به سمت ته‌نشینی شیمیایی است؛ در این شرایط، یون‌های فلزی موجود در عصاره (مانند کلسیم و منیزیم) با فسفات واکنش داده و آن را ته‌نشین می‌کنند (عبدلی^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). در مطالعه‌ای درباره حذف آمونیوم با استفاده از ماده جاذب نیز بیان شده است که در pH بالا، تبدیل NH_4 به فرم غیر یونی (آمونیاک) موجب افزایش راندمان حذف می‌شود (اترو^۳ و همکاران، ۲۰۲۴). در نهایت، با توجه به ملاحظات عملیاتی و اقتصادی، pH برابر با ۶ به عنوان نقطه تعادل پیشنهاد می‌شود. در این محدوده، همزمان مکانیسم‌های انعقاد و ته‌نشینی شیمیایی به‌صورت مؤثر عمل کرده و هزینه خنثی‌سازی نیز کاهش می‌یابد.

● اثر تغییرات غلظت منعقدکننده بر حذف پارامترهای سپتاژ

نتایج بررسی تأثیر غلظت منعقدکننده طبق شکل (۳) نشان داد که با افزایش غلظت از ۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، راندمان حذف COD، TSS، NH_4 و TP به‌صورت یکنواخت افزایش یافته است. افزایش راندمان را می‌توان به افزایش ناپایداری کلوئیدها، افزایش برخورد ذرات و تشکیل لخته‌های مؤثرتر نسبت داد. در غلظت‌های پایین، تعداد زنجیره‌های پلیمری عصاره باقلا برای اتصال کامل ذرات معلق کافی نیست، اما در غلظت مناسب ۲۸۰ میلی‌گرم در لیتر زنجیره‌ها به‌قدر کافی در محلول حضور یافت و با ایجاد پل بین ذرات، لخته‌های بزرگ‌تر و سنگین‌تر تشکیل می‌شوند. با این حال، در شرایطی که مکانیسم غالب انعقاد جذب و خنثی‌سازی بار باشد، افزایش بیش از مقدار پیشنهادی می‌تواند به دلیل معکوس شدن بار سطحی ذرات موجب کاهش راندمان حذف شود (غلامی‌مقدم و همکاران، ۱۴۰۳). از منظر عملیاتی نیز تعیین غلظت مناسب علاوه بر افزایش حذف، سبب کاهش هزینه و حجم لجن می‌شود (نیکونهاد و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین الحفیدی^۴ و همکاران در مطالعه استفاده از کلرید فریک گزارش کردند که افزایش غلظت منعقدکننده تا سطح بهینه باعث بهبود حذف COD و TSS می‌شود (الحفیدی و همکاران، ۲۰۲۴). رحیمی و همکاران نیز نشان دادند در صنایع لبنی، غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر PAC راندمان حذف ۷۴/۵۱ و ۶۵/۴۶ درصد به ترتیب برای COD و TP ایجاد کرد، اما با افزایش به ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر راندمان کاهش یافت (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۵).

1- Joaquin

2- Abdoli

3- Otero

4- El Hafidi

● اثر تغییرات زمان اختلاط تند بر حذف پارامترهای سپتاژ

نتایج بررسی زمان اختلاط تند نشان داد که افزایش این پارامتر تا مقدار معینی موجب بهبود در راندمان می‌شود. در محدوده ۱ تا ۲ دقیقه، افزایش راندمان COD، TSS، NH₄ و TP را می‌توان به پخش یکنواخت منعقدکننده و افزایش احتمال برخورد ذرات با زنجیره‌های پلیمری نسبت داد که منجر به تشکیل لخته‌های اولیه مناسب می‌شود. این روند در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (جین و همکاران، ۲۰۱۵). افزایش زمان از ۲ به ۳ دقیقه تنها به بهبود جزئی منجر شد، اما ادامه افزایش تا ۵ دقیقه باعث کاهش نسبی راندمان حذف شد. این کاهش می‌تواند ناشی از تخریب لخته‌های تشکیل شده توسط نیروهای برشی ناشی از اختلاط طولانی‌تر باشد، به گونه‌ای که لخته‌ها شکسته و به ذرات ریزتر و کم‌تشنش‌تر تبدیل می‌شوند. همچنین افزایش زمان، هزینه‌های بهره‌برداری و مصرف انرژی را نیز بالا می‌برد (استوار و همکاران، ۱۴۰۰، حسنین و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین در این مطالعه، زمان ۲ دقیقه به دلیل راندمان بالا، مصرف انرژی کنترل شده و پایداری لخته‌ها به عنوان نقطه عملیاتی برای اختلاط تند پیشنهاد شده است. یافته‌ها با اصول فرایند انعقاد و لخته‌سازی هم‌راستا است (متکالف و ادی^۱، ۲۰۱۴). همچنین نیکونهاد و همکاران در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر یزد نیز زمان اختلاط تند ۲ دقیقه را مناسب گزارش کرده‌اند (نیکونهاد و همکاران، ۱۳۹۶).

● اثر تغییرات زمان اختلاط کند بر حذف پارامترهای سپتاژ

نتایج بررسی زمان اختلاط کند نشان داد که افزایش زمان از ۱۵ به ۳۰ دقیقه موجب بهبود قابل توجه در حذف COD، TSS، NH₄ و TP سپتاژ شده است. این روند افزایشی می‌تواند به دلیل فراهم شدن فرصت کافی برای تماس و رشد لخته‌ها باشد که منجر به تشکیل لخته‌های پایدارتر و ته‌نشینی مؤثرتر می‌شود (جین و همکاران، ۲۰۱۵). در این مرحله، برخورد آرام ذرات و لخته‌های اولیه باعث اتصال آن‌ها به یکدیگر و تشکیل لخته‌های بزرگ‌تر و سنگین‌تر می‌شود که سرعت ته‌نشینی بالاتری دارند. با این حال، افزایش زمان از ۳۰ به ۴۵ دقیقه به دلیل شکستن لخته‌ها (برش لخته‌ها)، کاهش در راندمان حذف را منتج شده است. این رفتار نشان می‌دهد که نیروهای برشی وارد شده در زمان طولانی، باعث شکستن لخته‌های بزرگ و تبدیل آن‌ها به ذرات ریزتر می‌شوند که ته‌نشینی آن‌ها دشوارتر است. بنابراین، افزایش بیش از حد زمان نه تنها سبب بهبود عملکرد نمی‌شود، بلکه می‌تواند راندمان را کاهش دهد (استوار و همکاران، ۱۴۰۰، حسنین و همکاران، ۲۰۲۱). بر این اساس، زمان اختلاط کند ۳۰ دقیقه به عنوان زمان عملیاتی مناسب برای رشد کامل لخته‌ها و جلوگیری از تخریب آن‌ها پیشنهاد می‌شود تا از اتلاف انرژی و کاهش اثربخشی جلوگیری شود. همچنین رسول و همکاران در پیش تصفیه شیرابه زباله با منعقدکننده طبیعی ریحان (به همراه آلوم) گزارش کردند که زمان اختلاط کند ۱۵ دقیقه در شرایط بهینه منجر به بیشترین راندمان حذف COD معادل ۶۵ درصد شد (رسول و همکاران، ۱۳۹۳).

با توجه به ماهیت نوآورانه، محیط زیستی و پایدار استفاده از باقلا به عنوان یک منعقدکننده طبیعی، یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی برای ارزیابی و توسعه آن به عنوان جایگزینی بالقوه برای منعقدکننده‌های شیمیایی متداول در فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب فراهم آورد. همچنین، یکی از محدودیت‌های این مطالعه، استفاده از روش تک‌متغیره (OFAT) است که امکان شناسایی برهم‌کنش‌های پیچیده بین متغیرها را ندارد. از طرفی دیگر، این مطالعه بر روی فاضلاب سپتاژ جمع‌آوری شده از یک منطقه خاص متمرکز بود. با توجه به نوسانات کیفیت سپتاژ در فصول مختلف و مکان‌های مختلف، توصیه می‌شود در مطالعات آینده، پایداری این فرآیند بر روی نمونه‌های متنوع‌تر و با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندمتغیره (مانند RSM) بررسی شود.

منابع

- استوار، فریبا، صمدی، ناصر، و انصاری، رضا (۱۴۰۰). استفاده از روش اکسیداسیون پیشرفته فنتون جهت تصفیه پسابهای حاوی آلاینده‌های نفتی. شیمی کاربردی روز، ۱۶(۶۱)، ۸۵-۱۰۰. doi:org/10.22075/chem.2021.21787.1915
- رحیمی، سمیه، علیزاده، مصطفی، کرد مصطفی‌پور، فردوس، بذرافشان، ادریس، حسین‌زاده، ادریس، و تقوی، محمود (۱۳۹۵). شرایط بهینه فرایند انعقاد و لخته‌سازی با پلی‌آلومینیوم کلراید در تصفیه فاضلاب صنایع لبنی. مجله دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، ۲۳(۱)، ۴۸-۵۷. www.sid.ir/paper/82653/fa
- رسول، محمدعلی، چایخشی، ناز، توکلی، بابک، پنداشته، علیرضا، و میروشندل، اعظم‌السادات (۱۳۹۳). پیش تصفیه شیرابه محل دفن زباله با استفاده از منعقدکننده طبیعی. کنفرانس فناوری‌های نوین شیمی و مهندسی شیمی، قوچان، ۲۸۳۴۷۸. doi:isc.ac/dor/20.1001.1.10258620.1380.27.28.5.5
- سلاجقه، رضوان، راعی نائی، مهدی، و اسماعیلی، کاظم (۱۴۰۳). تحلیلی بر مدیریت دفع سپتاژ در مشهد و ارائه راه حل عملی مناسب. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱۱(۲)، ۶۵-۷۶. doi:org/10.22067/jwsd.v11i2.2308-1268
- عابدین‌زاده، نیلوفر، پنداشته، علیرضا، و استوار، فریبا (۱۳۹۶). بررسی تصفیه‌پذیری فاضلاب خمیر و کاغذ با استفاده از روش تصفیه ترکیبی اولترافیلتراسیون و فنتون. پژوهش و فناوری محیط زیست، ۲(۳)، ۱-۱۰. doi: net/dor/20.1001.1.26763060.1396.2.3.1.0
- غلامی‌مقدم، میترا، استوار، فریبا، و توکلی، محدثه (۱۴۰۳). بررسی تصفیه‌پذیری پساب صنایع غذایی آماده با فرایند شیمیایی انعقاد و لخته‌سازی. پژوهش و فناوری محیط زیست، ۹(۱۵)، ۴۷-۶۴. doi:org/10.61186/jert.45100.9.15.64
- قربانی‌پور، میلاد، صادقی‌دهکردی، زینب، سازمند، علیرضا، دارایی‌گره‌خانی، امیر، فلاح، محمد، و ساری، عباسعلی (۱۴۰۱). بهینه‌سازی شرایط استخراج (غلظت حلال و زمان استخراج) عصاره آبی، الکلی و هیدروالکلی گیاه خوشاریزه (*Echinophora platyloba*)، خصوصیات آنتی‌اکسیدانی و اثر کشندگی آن بر پروتواسکولکس‌های کیست هیداتید در شرایط آزمایشگاهی. مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران، ۱۹(۱۳۲)، ۸-۱۷. doi:isc.ac/dor/20.1001.1.20088787.1401.19.132.23.6
- کرامت، سینا، و سیدی، کامبیز (۱۳۹۴). بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر راندمان حذف COD، آمونیاک، فسفر و امکان حذف کدورت و کلیفرم مدفوعی در شرایط بهینه‌نهایی از فاضلاب شهری ارومیه به روش انعقاد الکتریکی با استفاده از یک راکتور الکتروشیمیایی با جریان برگشتی. نخستین همایش بین‌المللی جامع محیط زیست، تهران، ۴۷۸۶۵۵. civilica.com/doc/478655
- میثمی، فرهاد، تفضلی، سیدمحمد، و اسماعیلیان، حسین (۱۳۹۸). ساماندهی، انتقال و تصفیه سپتاژ شهری مشهد. دومین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدر رفت و بازیافت، تهران، ۹۹۰۴۴۷. civilica.com/l/11593.990447
- میربلوکی، هانیه، پنداشته، علیرضا، و استوار، فریبا (۱۳۹۵). مقایسه راندمان حذف کدورت از فاضلاب صنعتی توسط منعقدکننده گیاهی *Vicia faba* (باقلا) با منعقدکننده‌های شیمیایی آلوم و پلی‌آلومینیوم کلراید. کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری، مدیریت شهری و محیط زیست در هزاره سوم، رشت، ۵۸۵۷۸۱. civilica.com/doc/585781
- نیکونهاد، علی، احرامپوش، محمدحسن، قانعیان، محمدتقی، قلیزاده، عبدالمجید، و غلمانی، سیدوحید. (۱۳۹۶). بررسی تأثیر شدت و روند اختلاط، بر کارایی فرایند انعقاد و لخته‌سازی و ارتقاء پساب تصفیه‌خانه SBR فاضلاب شهر یزد. مجله آب و فاضلاب، ۲۸(۲)، ۲۹-۳۶. doi:org/10.22093/wwj.2017.17355
- یوسفی، ذبیح‌الله، سیدی‌راد، مهدی (۱۳۹۲). بررسی کمی و کیفی فاضلاب سپتاژ شهری شرق مازندران و راهکار مدیریتی. مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ۲۳(۱۰۲)، ۶۱-۷۱. jmums.mazums.ac.ir/article-1-2391-fa.html
- Abdoli, S., Asgari Lajayer, B., Dehghanian, Z., Bagheri, N., Vafaei, A. H., Chamani, M., Rani, S., Lin, Z., Shu, W., & Price, G. W. (2024). A review of the efficiency of phosphorus removal and recovery from wastewater by physicochemical and biological processes: challenges and opportunities. *Water*, 16, 2507. www.mdpi.com/journal/water
- Alazaiza, M. Y. D., Alzghoul, T. M., Nassani, D. E., & Bashir, M. J. K. (2025). Natural coagulants for sustainable wastewater treatment: current global research trends. *processes*, 13(6), 1754. doi:org/10.3390/pr13061754
- Ang, W. L., & Mohammad, A.W. (2020). State of the art and sustainability of natural coagulants in water

- and wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121267. doi:org/10.1016/j.jclepro.2020.121267.
- Bao, P. N., Abfertiawan, M. S., Kumar, P., & Hakim, M. F. (2020). Challenges and opportunities for septage management in the urban areas of Indonesia—case study in Bandung City. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 52, 481-500. doi:org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.4.3
- Chen, Y., Miller, C. J., & Waite, D. (2021). pH dependence of hydroxyl radical, ferric peroxo species generation in the heterogeneous fenton process. *Environmental Science Technology*, 56(2), 1278-1288. doi:org/10.1021/acs.est.1c05722
- Cruz, K. D., Villanueva, B. H. A., Martos, M. K. D., Asuncion, A. J. G., & Esguerra, M. J. S. (2024). Black Iron Electrode/Persulfate System: A Reduction Method for Ammonia, Oil and Grease, TSS, and COD Content of Septage Wastewater via Electrocoagulation. *Paper presented at the Trends in Environmental Sustainability and Green Energy*. doi:org/10.1007/978-3-031-52330-41
- El-taweel, R. M., Mohamed, N., Alrefaey, K. A., Husien, Sh., Abdel-Aziz, A. B., Salim, A. I., Mostafa, N. G., Said, L. A., Fahim, I. S., & Radwan, A. G. (2023). A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 6, 100358. doi:org/10.1016/j.crgsc.2023.100358
- El Hafidi, EL. M., Mortadi, A., Chahid, EL. G., & Laasri, S. (2024). Optimization of Domestic Wastewater Treatment Using Ferric Chloride Coagulant: Physicochemical Analysis and Impedance Spectroscopy Studies. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(68). link.springer.com
- Golestanbagh, M., Parvini, M., & bt Ahamad, I. S. (2015). Studying effect of water quality parameters on coagulation efficiency by Moringa Oleifera seeds. *Advances in Environmental Technology*, 1, 41-47. doi:dx.doi.org/10.22104/aet.2015.12
- Hassanien, A. M. M. (2021). Usage of Cicer Arietinum as a local and ecofriendly natural coagulant in sewage treatment and its ability to increase the formation of floc process. *Revista Bionatura*, 6, 1939-1943. doi:org/10.21931/RB/2021.06.03.9
- Jain, M., Upadhyay, M., Gupta, A. K., & Ghosal, P. S. (2022). A review on the treatment of septage and faecal sludge management: A special emphasis on constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*, 315, 115143. doi:org/10.1016/j.jenvman.2022.115143
- Jain, R. K., Dange, P. S., & Lad, R. K. (2015). A treatment of domestic sewage and generation of biosludge using natural coagulants. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4(7). www.ijret.org
- Joaquin, A. A., Nirmala, G., & Kanakasabai, P. (2021). Response surface analysis for sewage wastewater treatment using natural coagulants. *Pollution Research*, 30(2), 1215-1225. https://www.ijret.org. doi:10.15244/pjoes/120515
- Jung, Y., Jung, Y., Kwon, M., Kye, H., Abrha, Y. W., & Kang, J. W. (2018). Evaluation of Moringa oleifera seed extract by extraction time: effect on coagulation efficiency and extract characteristic. *Journal of Water and Health*. iwaponline.com/jwh/article-pdf/16/6/904/511604/jwh0160904.pdf
- Karolinczak, B., Miłaszewski, R., & Dąbrowski, W. (2020). Cost optimization of wastewater and septage treatment process. *Energies*, 13, 6406. doi:org/10.3390/en13236406
- Krithika, D., Thomas, A. R., Iyer, G. R., Kranert, M., & Philip, L. (2017). Spatio-temporal variation of septage characteristics of a semi-arid metropolitan city in a developing country. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 7060-7076. doi:org/10.1007/s11356-016-8336.z
- Kukić, D. V., Šćiban, M. B., Prodanović, J. M., Tepić, A. N., & Vasić, M. A. (2015). Extracts of fava bean (*Vicia faba* L.) seeds as natural coagulants. *Ecological Engineering*, 84, 229-232. doi:org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.008
- Megersa, M., Gach, W., Beyene, A., Ambelu, A., & Triest, L. (2019). Effect of salt solutions on coagulation performance of *Moringa stenopetala* and *Maerua subcordata* for turbid water treatment. *Separation and Purification Technology*, 221, 319-324. doi:org/10.1016/j.seppur.2019.04.013
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., & Tsuchihashi, R. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed). McGraw-Hill education.
- Nimesha, S., Hewawasam, C., Jayasanka, D. J., Murakami, Y., Araki, N., & Maharjan, N. (2022). Effectiveness of natural coagulants in water and wastewater treatment. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 8, 101-116. doi:org/10.22034/GJESM.2022.01.08
- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from *moringa oleifera* seed by salt solution. *Water Research*, 35, 405-410.

doi:org/10.1016/S0043-1354(00)00290-6

- Okoye, K., & Hosseini, S. (2024). Understanding dependent and independent variables in research experiments and hypothesis testing. *Research Methodology for Science and Engineering*, 67–85. Springer. **doi:org/10.1007/978-981-97-3385-9-5**
- Otero, M., Freire, L., Gomes-Cuervo, S., & Avila, C. (2024). Ammonium removal in wastewater treatment by adsorbent geopolymer material with granite wastes: full-scale validation. *Clean Technologies*, 6, 339-364. **doi:org/10.3390/cleantechnol6010017**
- Shamsnejati, S., Chaibakhsh, N., Pendashteh, A. R., & Hayeripour, S. (2015). Mucilaginous seed of *Ocimum basilicum* as a natural coagulant for textile wastewater treatment. *Industrial Crops and Products*, 69, 40-47. **doi:org/10.1016/j.indcrop.2015.01.045**
- Shamsnejati, S., Hayeripour, S., & Pendashteh, A. (2013). Investigating the effectiveness of basil seeds in removing cod and concord dye from synthetic textile wastewater. *The first national conference on environmental research*, 1-17. civilica.com/doc/238604/
- Sharifi, S., Hosseini, M., & Aminirad, H. (2021). Optimization of the coagulation process in drinking water treatment using *Pistacia atlantica* seed by response surface methodology (RSM). *Journal of Iranian Water Research*, 15(4), 1-10.
- Taiwo, A. S., Adenike, K., & Aderonke, O. (2020). Efficacy of a natural coagulant protein from *Moringa oleifera* (Lam) seeds in treatment of Opa reservoir water, Ile-Ife, Nigeria. *Heliyon*, 6. **doi:org/10.1016/j.heliyon.2020.e03335**
- Tan, Y. Y., Tang, F. E., Ho, C. L., & Jong, V. S. (2017) Dewatering and Treatment of Septage Using Vertical Flow Constructed Wetlands. *Technologies*, 5(4).
- Teixeira, M. R., Camacho, F. P., Sousa, V. S., & Bergamasco, R. (2017). Green technologies for cyanobacteria and natural organic matter water treatment using natural based products. *Journal of Cleaner Production*, 162, 484-490. **doi:org/10.1016/j.jclepro.2017.06.004**