پژوهش و فناوری محیط زیست، ۱۴۰۲،(۱۴)۸، ۳۳-۱۹

پژوهش و فناوری محیط زیست

وبگاه نشریه:www.journal.eri.acecr.ir

پژوهشکده محیط زیست

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۳۰۶۰

اسپیرولینا، میکروجلبک جاذب رنگ از فاضلاب

فاطمه قنبری[۱]، هومن هروی[۲]، هانیه میربلوکی*[۳]

۱- دکتری محیط زیست، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی گیلان، رشت، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران- محیطزیست، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی، رشت، ایران

۳- گروه مهندسی محیطزیست، پژوهشکده محیطزیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مروری

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۹/۲۱

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۱۱/۲۳

دسترسی آنلاین:
۱۴۰۲/۱۲/۰۸

کلید واژه‌ها:
پساب صنعتی،
حذف رنگ،
جذب زیستی،
میکروجلبک اسپیرولینا

چکیده

رنگ اولین آلاینده‌ایی است که در پساب‌های صنعتی شناخته می‌شود و مقدار کم آن هم، در آب بسیار نامطلوب است. اکثر رنگ‌ها شامل مولکول‌های آلی پیچیده بوده و به دلیل حضور فلزات، آروماتیک‌ها و دیگر ترکیبات در ساختارشان، برای زندگی آبزیان و انسان‌ها مضر هستند. حذف و یا کاهش مقدار ورود این آلاینده به محیط امری ضروری بوده که جذب زیستی یکی از این روش‌ها است. هدف اصلی از این تحقیق بررسی حذف رنگ نساجی راکتیو آبی توسط میکروجلبک اسپیرولینا است. در روند انجام پژوهش، اثر متغیرهایی چون زمان تماس، دوز جلبک تزریقی و غلظت فاضلاب، بر فرایند حذف رنگ بررسی و مقدار جذب نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد و دامنه و تعداد آزمایش‌ها با نرم‌افزار طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM) تعیین شد، همچنین برای تحلیل و تجزیه نتایج به‌دست‌آمده از ابزار آماری تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در شرایط بهینه آزمایش، بهترین درصد حذف رنگ توسط میکروجلبک اسپیرولینا، در زمان تماس ۳۰ دقیقه با دوز جلبک تزریقی ۱۰ میلی‌لیتر به فاضلاب با غلظت رنگ ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، ۱۰۰ درصد به‌دست آمد. بنابراین، استفاده از میکروجلبک‌ها، علاوه‌بر اینکه روشی ارزان با راهبری آسان به‌منظور حذف رنگ از فاضلاب رنگی مثل فاضلاب نساجی است، به‌عنوان یک روش دوست‌دار محیط‌زیست برای حذف آلاینده‌های سخت تجزیه‌پذیر، موردتوجه محققان خواهد بود.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: h.mirbolooki@gmail.com

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 3060-2676

Spirulina, wastewater dye absorbent microalgae

Fatemeh Ghanbari[1], Hooman Heravi[2], Hanieh Mirbolooki[3*]

1-PhD in Environmental Science, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Higher Education Research Institute, Rasht, Iran
2 -MSc Graduated in Civil Engineering- Environment, Higher Education Research Institute, Rasht, Iran
3 -Department of Environmental Engineering, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Environmental Research Institute, Rasht, Iran

Article Info

Article type:
Review Article

Article history:
Received:
12/12/2024
Accepted:
12/02/2024
Available online:
27/02/2024

Keywords:
Industrial wastewater,
Dye removal,
Biosorption,
Spirulina microalgae

Abstract

Dye is the first known pollutant in industrial wastewater, and its small amount is very undesirable in water. Most of the dyes contain complex organic molecules and are harmful to aquatic life and humans due to the presence of metals, aromatics and other compounds in their structure. Removing or reducing the amount of this pollutant entering the environment is essential, and biological absorption is one of these methods. The main purpose of this research is to investigate the removal of blue reactive textile dye by spirulina microalgae. In the process of conducting the research, the effect of variables such as contact time, injected algae dose and wastewater concentration was investigated on the dye removal process and the amount of absorption of the samples was measured by a spectrophotometer and the number of experiments was determined by the design expert software via response surface method (RSM) and the analysis of variance (ANOVA) statistical tool was used to analyze the obtained results. Based on the obtained results, in the optimal conditions of the experiment, the best percentage of dye removal by spirulina microalgae was 100% in contact time of 30 minutes with a dose of 10 ml of injected algae into wastewater with a color concentration of 50 mg/L. Therefore, the use of microalgae, in addition to being an inexpensive and easy-to-operate method for color removal from colored wastewater such as textile wastewater, it will be of interest to researchers as an environmentally friendly method to remove hard degradable pollutants.

مقدمه

یکی از عمده‌ترین آلاینده‌های محیط زیست که در پساب صنایع مختلف ازجمله نساجی وجود دارد رنگ‌ها می‌باشند که در نظام طبیعت و محیط‌زیست ایجاد اختلال می‌کنند و برای انسان‌ها نیز عوارض زیادی به دنبال خواهد داشت. بیش از ده هزار مواد رنگ‌زا سنتزی و رنگ‌دانه تا پایان قرن نوزدهم تولید و مورد استفاده قرار گرفت که ازجمله کاربرد آن‌ها می‌توان به‌عنوان افزودنی در محصولات نفتی، صنایع غذایی، دارویی و لوازم آرایشی اشاره کرد. در بسیاری از صنایع مهم از جمله صنعت نساجی، خمیر و کاغذ، پلاستیک، چرم‌سازی و رنگرزی به‌منظور تولید محصولات رنگی، از مواد شیمیایی رنگ‌زا استفاده می‌شود و از آنجایی که در این صنایع مقادیر زیادی آب به کار گرفته می‌شود، در نتیجه مقادیر قابل‌توجهی پساب رنگی حاصل از آن‌ها وارد محیط‌زیست می‌شود. اغلب رنگ‌های مورد استفاده در این صنایع از نوع رنگ‌های سنتیتیک و دارای ساختار مولکولی آروماتیکی پیچیده‌ای هستند که به دلیل سمی بودن و دیر تجزیه شدن، چنانچه بدون تصفیه وارد محیط شوند می‌توانند صدمات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست وارد کنند (حبیب زاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ دونکادکولا[۱] و همکاران، ۲۰۲۰). انواع رنگینه‌های پرکاربرد در صنایع مختلف شامل رنگینه‌های آزو (تقریباً بیش از ۵۰ درصد از کل مجموع مواد رنگ‌زای تولید شده در جهان- برای الیاف پنبه‌ای)، رنگینه‌های رآکتیو (در گروه مواد خطرناک برای محیط‌زیست- برای الیاف پنبه‌ای)، رنگینه‌های اسیدی (دارای ترکیبات سمی- برای الیاف پروتئینی و پلی‌آمیدی)، رنگینه‌های کاتیونی یا بازی (برای الیاف ابریشمی، پشمی و پنبه‌ای)، رنگینه‌های گوگردی (برای الیاف سلولوزی)، رنگینه‌های حلال (برای روغن‌های جلادهنده، مرکب‌های چاپ، فرآورده‌های نفتی و واکس) و رنگینه‌های دیسپرس (جزء رنگ‌های آزو- برای الیاف سلولز استات، نایلون، پلی‌استر، الیاف آکریلیک، پشم و الیاف پلی‌آمیدی) است (ال-انازی و همکاران، ۲۰۲۲).

تخلیه پساب حاوی مواد رنگی به آب‌های پذیرنده از قبیل دریاچه‌ها و رودخانه‌ها موجب کاهش انتقال نور، کاهش مقدار اکسیژن محلول و افزایش COD می‌شود و از این راه زندگی آبزیان را مختل می‌کند. افزون بر این پژوهشگران دریافته‌اند، برخی از رنگزاها می‌توانند طی فرایند تجزیه احیایی، آمین‌های آروماتیک سرطان‌زا تولید کنند (حبیب‌زاده و همکاران)؛ بنابراین لازم است که این‌گونه پساب‌ها قبل از تخلیه به محیط‌زیست با استفاده از روش‌های مناسب مورد تصفیه قرار گیرند. تاکنون روش‌های مختلفی ازجمله روش‌های فیزیکی (ترسیب، فرآیندهای غشایی)، روش شیمیایی (انعقاد، اکسیداسیون پیشرفته، کلر، پراکسید هیدروژن، فتوکاتالیست) و تصفیه بیولوژیکی (تصفیه هوازی، تصفیه بی‌هوازی، ترکیب روش تصفیه هوازی و بی‌هوازی) به‌منظور حذف رنگ از فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته است (ال-انازی و همکاران، ۲۰۲۲).

استفاده از جاذب‌های مختلف برای تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی رنگ‌ها و فلزات سنگین از فرایندهای نوآورانه‌ای است که به دلیل کاربرد آسان و دوست‌دار محیط‌زیست بودن، بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از انواع مهم جاذب‌ها، جاذب‌های زیستی هستند. جلبک‌ها با توجه به اینکه در هر دو نوع آب‌شور و شیرین به مقدار زیادی یافت می‌شوند، به‌عنوان یک جاذب زیستی مناسب برای حذف ترکیبات رنگ‌زا به شمار می‌آیند و دارای گروه‌های عاملی سطحی هستند که باعث افزایش جذب مولکول‌های ماده رنگ‌زا می‌شوند (چین[۲] و همکاران، ۲۰۲۰؛ شی[۳] و همکاران، ۲۰۱۶؛ عبدالفتاح[۴] و همکاران، ۲۰۲۳).

---

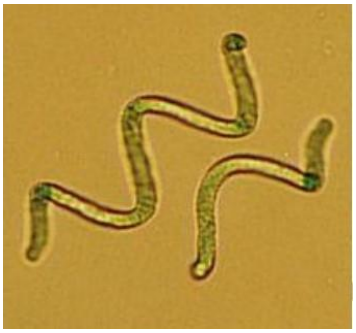
۱. Donkadokula
۲. Chin
۳. Shi
۴. Abdelfattah

در فرایند حذف رنگ توسط جلبک‌ها، پارامترهایی چون pH، زمان تماس، دوز بیوجاذب (ریزجلبک‌ها)، غلظت و نوع محلول رنگی بسیار مهم هستند. زمان تماس از پارامترهای مهمی است که در آزمایشات باید مورد توجه قرار گیرد و با توجه به دوز جاذب و غلظت فاضلاب رنگی به زمان تماس بهینه دست یافت. مقدار بیوجاذب تاثیر بالایی در فرایند تصفیه دارد و نتایج نشان می‌دهد اغلب با کاهش مقدار بیوجاذب، با کاهش حذف رنگ مواجه می‌شویم. در مقادیر پایین جاذب، سطح جاذب به‌سرعت با مولکول‌های رنگ اشباع‌شده و رنگ زیادی در محلول فاضلاب رنگی باقی می‌ماند (مزناه[۱]و همکاران، ۲۰۱۲؛ دونکادکولا[۲]و همکاران، ۲۰۲۰). ظرفیت جذب زیستی جلبک ها به مساحت سطح و تمایل بالای اتصال آن‌ها نسبت داده می‌شود (عبدل-اتی[۳]و همکاران، ۲۰۰۶؛ سلطانی و همکاران، ۱۳۹۴). خواص دیواره سلولی جلبک‌ها نقش مهمی در جذب زیستی ایفا می‌کند جاذبه الکترواستاتیک و پیچیدگی‌های زیادی در طول فرآیند جذب زیستی اتفاق می‌افتد، گروه‌های عامل هیدروکسیل، کربوکسیلات، آمینو و فسفات موجود در سطح سلول جلبک به‌عنوان عامل جداسازی و جذب آلودگی از فاضلاب شناخته می‌شود (ازر[۴]و همکاران، ۲۰۰۶؛ رائی[۵]و همکاران، ۲۰۲۲) در آزمایش‌های جذب توسط جلبک‌ها پارامترهایی چون دما، pH، غلظت آلاینده و مقدار جاذب در فرایند جذب تأثیرگذارند و از ایزوترم‌های مختلف برای تعیین جذب استفاده می‌شود (اسبچین، ۱۳۹۱؛ جاود[۶]و همکاران، ۲۰۲۲).

- جلبک اسپیرولینا

اسپیرولینا نوعی جلبک سبز-آبی از شاخه سیانوباکترها است و اسم آن از شکل مارپیچی و رشته‌ای آن مشتق شده است. جلبک اسپیرولینا حاوی مقادیر زیادی از مواد مغذی، مواد معدنی، عناصر کمیاب و آنزیم‌های قابل جذب است. اسپیرولینا حاوی ویتامین B12 بوده و مقدار پروتئین آن ۶۵ تا ۷۱ درصد وزن خشک آن و میزان چربی اسپیرولینا معمولاً بین ۵ تا ۷ درصد وزن خشک آن است (قائنی و همکاران، ۱۳۸۹؛ قبادیان و همکاران، ۱۳۹۷). اسپیرولینا در دریاچه‌های مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری رشد می‌کند که آب‌های آن‌ها قلیایی بوده و سرشار از کربنات و بی‌کربنات و سرشار از آنتی اکسیدان‌ها و پروبیوتیک‌هاست (قائنی و همکاران، ۱۳۸۹؛ دیانتی و همکاران، ۲۰۱۹). پودر اسپیرولینا به‌عنوان یک مکمل کاربردی در خوراک دام برای رشد بیشتر و کاهش مرگ‌ومیر استفاده می‌شود. این پودر شامل مواد آلی و معدنی مختلف بوده و می‌تواند یک مکمل خوراک برای پرورش آبزیان گرفته تا حیوانات پرورشی باشد (قبادیان و همکاران، ۱۳۹۷؛ جین[۷]و همکاران، ۲۰۲۰). تصویر میکروسکوپی اسپیرولینا در شکل (۱) آورده شده است.

۱ Maznah
۲ Donkadokula
۳ Abdel-Aty
۴ Özer
۵ Rai
۶ Javed
۷ Jin



شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی از جلبک اسپیرولینا (۱۰۰ میکرون) (خزایی و فخری، ۱۳۹۳)

سابقه پژوهش

در سال ۲۰۲۳، مقاله‌ای مروری توسط رامش و همکاران بر جذب زیستی جلبک برای حذف آلاینده‌های خطرناک از فاضلاب به چاپ رسید که پس از معرفی چندین روش تصفیه مرسوم برای حذف آلاینده‌های نوظهور از فاضلاب، تأکید گردید که جذب زیستی جلبکی، در میان سایر استراتژی‌ها و تکنیک‌ها، نشان می‌دهد که یک درمان فنی متمرکزتر و کارآمدتر است و به حذف آلاینده‌های خطرناک از منابع آب کمک می‌کند، اثرات مختلف محیطی آلاینده‌های مضر، از جمله فلزات سنگین، رنگ‌ها، و مواد شیمیایی دارویی و همچنین منابع آن‌ها مورد بررسی قرارگرفته‌اند؛ به عبارتی، گیاه‌پالایی جلبکی یک فناوری پایدار است که با ایجاد سیستم‌های تصفیه تکمیلی در پساب، فناوری جدید مؤثرتر و سودآوری را ارائه می‌دهد. در نهایت، این مطالعه نشان داد که وجود جلبک‌ها تائید کننده یک ماده زیستی جاذب بالقوه، مؤثر، مقرون‌به‌صرفه و پایدار برای به حداقل رساندن آلودگی محیطی است (رامش[۱] و همکاران، ۲۰۲۳).

در سال ۲۰۲۰، مطالعه‌ای بر حذف رنگ سنتزی توسط میکروجلبک کلرلا ولگاریس به‌عنوان جاذب طبیعی انجام شد؛ بالاترین راندمان حذف در غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به میزان ۸۳/۰۴ درصد پس از ۳ روز جذب ثبت شد. بهترین مکانیسم حذف در ایزوترم فروندلیچ قرار گرفت که نشان‌دهنده وجود جذب چندلایه در این آزمایش است (چین[۲] و همکاران، ۲۰۲۰).

در سال ۲۰۱۹، چین و همکاران در پژوهشی به بررسی کلرلا ولگاریس در حذف رنگ متلین بلو پرداختند که نتایج حاصل شده نشان‌دهنده حذف رنگ متلین بلو توسط جلبک کلرلا بوده است، جلبک کلرلاولگاریس توانایی بالایی به جذب متلین بلو با بار مثبت دارد و بیشترین مقادیر حذف در غلظت‌های پایین (۵۰ و۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) به دست آمد و در غلظت‌های بالا مانند ۵۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌شدت کاهش یافت (یاسین و شولز[۳] ۲۰۱۹).

یاسین و شولز در سال ۲۰۱۸ به بررسی رنگ در فاضلاب نساجی و مواد تشکیل دهنده پساب مصنوعی پرداختند. مواد شیمیایی روی پارچه‌ها و حین شستشو استفاده می‌شود. روش‌هایی چون ازن سازی، انعقاد و فرایند لجن فعال در راکتورهای متعدد برای پساب‌هایی که از رنگرزی مختلف دریافت می‌شوند می‌توان از سیستم‌های بیولوژیکی برای تصفیه استفاده کرد مانند تالاب‌ها با گیاهان برجسته یا استفاده از روش فیزیکی کربن فعال یا روش شیمیایی با استفاده از اسید استیک یا روشی که در سال ۲۰۰۵ بولیگ (Mbuligwe) گیاهان آبزی را با استفاده از سیستم‌های تالاب مهندسی شده برای تصفیه پساب‌های

---

۱ Ramesh

۲ Chin

۳ Yaseen and Scholz

مصنوعی استفاده کرد و در نتیجه مقدار حذف رنگ بین ۷۲ تا ۷۷ درصد و حذف COD ۶۷ تا ۷۳ درصد بوده است (یاسین و شولز، ۲۰۱۹).

در سال ۱۳۹۶، تحقیقی بر جذب رنگ متیلن بلو از محلول‌های آبی توسط جلبک سبز کلادوفورا انجام شد؛ نتایج نشان داد که با افزایش دوز جاذب، درصد حذف رنگ افزایش یافت و همچنین با افزایش pH میزان جذب رنگ افزایش یافت. pH بهینه در جذب متیلن بلو توسط جلبک سبز کالدوفورا ۶/۵ انتخاب شد. حداکثر درصد حذف، برای محلول رنگی متیلن بلو با غلظت اولیه ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر که به مدت ۶۰ دقیقه در تماس با ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از جاذب قرار گرفت، به دست آمد. وقتی مقدار جاذب از ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت، درصد حذف رنگ برای سیستم کلادوفورا-متیلن بلو از ۵۷ به ۹۸ درصد افزایش یافت (رئیس و همکاران، ۱۳۹۶).

همچنین در تحقیقاتی مشابه در سال۱۳۹۴ ملکوتیان و همکاران به حذف فلز روی با استفاده از جلبک کلرلاولگاریس پرداختند و بر اساس نتایج در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی گراد، pH بهینه ۷، زمان تماس تعادلی ۶۰ دقیقه و مقدار جاذب ۲گرم بر لیتر، میزان کارایی حذف روی در نمونه واقعی، ۶۷/۷۲ درصد و در نمونه سنتتیک، ۹۰/۲۳ درصد گزارش شد. با افزایش زمان تماس به ۱۰۰ ۱۵۰ و ۲۰۰ دقیقه نیز تغییر چندانی در فرایند جذب رخ نداد (ملکوتیان و همکاران، ۱۳۹۴).

در سال ۲۰۱۲ گاجار و منگانی در مطالعه خود به بررسی جذب زیستی مالاشیت سبز توسط زیست‌توده جلبکی پرداختند، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، غلظت اولیه محلول رنگی اثر مهمی در فرآیند جذب دارد و جذب رنگ با افزایش غلظت محلول کاهش یافت و در غلظت‌های بالا جذب بسیار کمی از مولکول‌های رنگ صورت گرفت که دلیل آن، اشباع مکان‌های اتصال در زیست‌توده جلبکی است. محلول‌های رنگ در غلظت‌های متفاوت ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و ۲ گرم پودر جلبک در ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول رنگی استفاده شد که بیشترین میزان حذف رنگ نزدیک به ۹۵٪ در غلظت فاضلاب رنگی ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده است (گاجار و منگانی[1] ۲۰۱۲).

بررسی حذف رنگ آزوAcid Red 18 از محیط‌های آبی توسط جلبک قهوه‌ای سارگاسوم در سال ۱۳۹۳ انجام شد؛ نتایج این مطالعه نشان داد که بهینه زمان حذف این رنگ در مدت زمان ۶۰ دقیقه و بیشترین ظرفیت جذب در۶: pH حاصل گردید. با افزایش زمان تماس و مقدار جاذب و غلظت اولیه رنگ، راندمان حذف افزایش، و با افزایش pH راندمان حذف کاهش یافت (مرادی و زززولی، ۱۳۹۳).

در سال ۲۰۱۳ ازا و همکاران به بررسی جذب زیستی کادمیوم و سرب از محلول توسط جلبک اسفریکای آب شیرین پرداختند که در آن میزان زیست‌توده جلبکی ۰/۰۲۵ تا ۰/۲۵ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر بوده است و در زمان‌های ۲۰ تا ۱۲۰ دقیقه و pH ۲ تا ۶ انجام شد و بهترین pH برای جذب زیستی کادمیوم ۵/۵ بود و با توجه به نمودار جذب زیستی دوز جلبک می‌توان به این نتیجه رسید که در غلظت‌های ۰/۲۵ و ۰/۲ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر بیشترین میزان جذب برای کادمیوم به دست آمد که بیش از ۹۰ درصد بود و با کاهش دوز جلبک درصد حذف زیستی نیز به‌شدت کاهش می‌یابد (عبدل- اتی[2] ۲۰۱۳).

در سال ۱۳۹۲، پژوهشی بر حذف رنگ‌های آزو از محلول‌های آبی با استفاده از بیومس جلبک قهوه‌ای سیستوسیرا ایندیکا انجام شد؛ در این مطالعه بیوجذب دورنگ آزو، مشکی مستقیم ۱۹ و قرمز مستقیم ۲۳ روی جلبک قهوه‌ای سیتوسیرا ایندیکا مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر پارامترهای بهره‌برداری نظیر زمان تماس، pH، غلظت اولیه‌ی رنگ‌زا و اثر مقدار بیوجاذب در

[1] Gajare and Menghani

[2] Abdel-Aty

حذف رنگ‌زا بررسی شد. مطالعات سینتیکی نشان داد که فرآیند بیوجذب این رنگ‌ها در مدت‌زمان ۱۲۰ دقیقه به تعادل رسیده است (۸۹/۳ درصد رنگ قرمز مستقیم ۲۳ و ۶۹/۰۲ درصد رنگ مشکی مستقیم ۱۹ حذف شد)؛ نتایج نشان داد، می‌توان با تعیین شرایط بهینه زمان تماس، pH، غلظت اولیه رنگ و دوز جاذب، از جلبک سیتوسیرا ایندیکا به‌عنوان یک جاذب ارزان برای حذف رنگ‌های آزو از محلول‌های آبی استفاده کرد (پورعشق و همکاران، ۱۳۹۲).

در سال ۲۰۱۰ دوگار و همکاران به بررسی ترمودینامیک و مطالعات جنبشی جذب بیولوژیکی یک ماده رنگی بازی از محلول جلبک سبز اولوتریکس پرداختند در این پژوهش رنگ بازی متلین بلو با زیست‌توده جلبک الوتریکس مورد بررسی قرار گرفت و به مدت‌های نیم ساعت تا ۱۲ ساعت آزمایش شد و زمان تعادل برای غلظت‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌گرم در لیتر و دوز جلبک ۰/۱ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر ۳۰ دقیقه به دست آمد که کمترین زمان تصفیه بود (دوگار[1] و همکاران، ۲۰۱۰).

در سال ۲۰۰۹، در پژوهشی به توانایی تجزیه بیولوژیکی رنگ‌ها توسط برخی از جلبک‌های سبز مثل نوستوک لینکی، اسکی لاتوریا رابسنس و کلرلا ولگاریس پرداخته شد؛ این جلبک‌های سبز در محیطی استریل و با pH برابر ۷ ایزوله شدند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میزان حذف رنگ توسط جلبک لینکی و رابسنس برای تصفیه رنگ متیل قرمز، ۸۲ درصد؛ همچنین میزان حذف رنگ قرمز جی توسط جلبک لینکی و ولگاریس میزان بین ۷۱ تا ۷۲ درصد بوده است (ال-شیخ[2] و همکاران، ۲۰۰۹).

در سال ۲۰۰۹ دنگ و همکاران در پژوهشی به بررسی جذب زیستی کروم ۶ ظرفیتی توسط بیومس جلبک‌های کلادوفورا آلبیدا پرداختند که در آزمایشات آن‌ها در pH بهینه برابر با ۲ در دوزهای مختلف ۰/۲ تا ۱۰ گرم بر لیتر و غلظت بهینه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر کمترین دوز یعنی ۰/۲ گرم بر لیتر کمترین جذب را به همراه داشت و اثر زمان به‌گونه‌ای بود که در ۶۰ دقیقه ابتدایی بالاترین درصد حذف و راندمان حذف به‌دست آمد و بالاترین مقدار حذف نیز در دوز جلبک ۱۰ گرم بر لیتر مشاهده شد که براساس نمودار بیش از ۹۰ درصد بود (دنگ[3] و همکاران، ۲۰۰۹).

مواد و روش‌ها

این تحقیق، در مقیاس آزمایشگاهی در آزمایشگاه پژوهشکده محیط‌زیست جهاد دانشگاهی انجام شد. در این پژوهش، به بررسی حذف رنگ از فاضلاب سنتزی توسط جلبک اسپیرولینا پرداخته شده است؛ میزان حذف رنگ از طریق قرائت میزان جذب نمونه‌ها، در حداکثر طول‌موج رنگ مورد بررسی (۵۹۰ نانومتر) بررسی شد به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر، (مدل JENWAY ساخت کشور انگلیس) به دست آمد. در این تحقیق، فاضلاب سنتزی با استفاده از رنگ نساجی راکتیو آبی با غلظت‌های ۵۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر برای بررسی آزمایش‌های حذف رنگ توسط میکروجلبک تهیه گردید. تعیین دوز تزریق میکروجلبک به نمونه‌های فاضلاب از طریق رسم منحنی استاندارد وزن خشک به دست آمد که با تبدیل آن به میلی‌لیتر، در دامنه ۲، ۴، ۶ و ۱۰ میلی‌لیتر به نمونه‌های فاضلاب تزریق گردید. زمان انجام عملیات تصفیه نیز ۳۰، ۱۰۵ و ۱۸۰ دقیقه تعیین گردید. دامنه و تعداد آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ (RSM) و با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. سپس، فاضلاب تصفیه شده با استفاده از کاغذ صافی واتمن با منافذ ۰/۴۵ میکرون صاف شد تا میزان جذب آن از طریق دستگاه اسپکتروفتومتر محاسبه شود. نتایج خروجی نیز با استفاده از آزمون آماری ANOVA مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

---

[1] Doğar

[2] El-Sheekh

[3] Deng

pH فاضلاب سنتزی بر اساس محدوده فعالیت میکروجلبک‌ها، با استفاده از اسیدسولفوریک (H_2SO_4) ۰/۱ مولار برای کاهش pH و هیدروکسید سدیم ($NaOH$) ۰/۱ مولار برای افزایش pH تنظیم شد. محدوده فعالیت جلبک اسپیرولینا در pH قلیایی است.

یافته‌های پژوهش

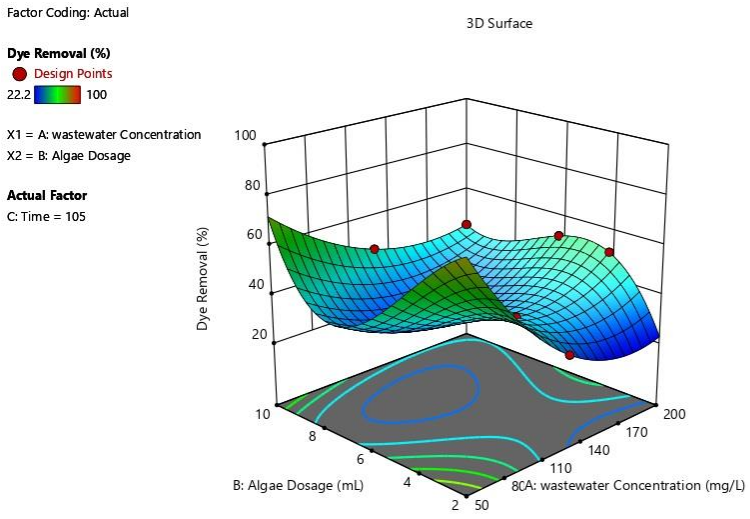
در این بخش، نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار طراحی آزمایش آورده شده است.

در جدول (۱)، طراحی آزمایش‌ها و مقادیر حذف رنگ بعد از تصفیه فاضلاب سنتزی با استفاده از میکرو جلبک نشان داده شده است.

جدول (۱) طراحی آزمایش‌ها و مقادیر حذف رنگ از فاضلاب سنتزی توسط جلبک اسپیرولینا

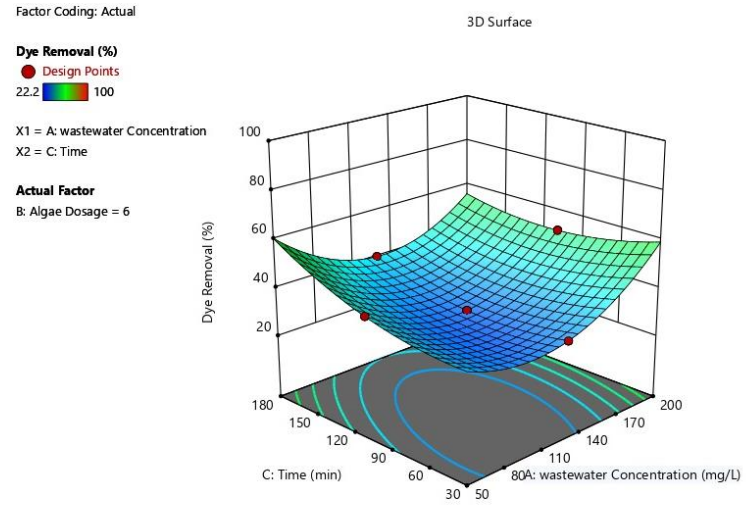
ردیف	زمان (دقیقه)	زیتوده جلبک (mL)	فاضلاب رنگی (mg/L)	درصد حذف رنگ (٪)
۱	۳۰	۶	۱۲۵	**۳۳/۳۶**
۲	۱۰۵	۴	۱۲۵	**۳۸/۱۶**
۳	۳۰	۱۰	۲۰۰	**۴۷**
۴	۱۰۵	۱۰	۲۰۰	**۴۴/۲۹**
۵	۱۰۵	۶	۲۰۰	**۵۱/۶**
۶	۱۰۵	۶	۱۲۵	**۳۰/۶۱**
۷	۱۰۵	۶	۲۰۰	**۵۱/۶**
۸	۱۸۰	۱۰	۵۰	**۵۵/۶**
۹	۱۰۵	۱۰	۱۲۵	**۴۵/۸۸**
۱۰	۱۰۵	۴	۲۰۰	**۵۱/۰۴**
۱۱	۱۰۵	۶	۱۲۵	**۳۰/۶۱**
۱۲	۱۰۵	۲	۱۲۵	**۳۰/۸۷**
۱۳	۱۸۰	۶	۱۲۵	**۴۰**
۱۴	۳۰	۱۰	۵۰	**۱۰۰**
۱۵	۱۰۵	۶	۱۲۵	**۳۰/۶۱**
۱۶	۱۰۵	۶	۱۲۵	**۳۲**
۱۷	۳۰	۲	۵۰	**۴۲/۵۳**
۱۸	۱۸۰	۲	۲۰۰	**۲۲/۲**
۱۹	۱۰۵	۶	۵۰	**۴۳/۱۵**
۲۰	۱۰۵	۶	۱۲۵	**۳۰/۶۱**

در شکل (۲)، تأثیر غلظت‌های مختلف فاضلاب سنتزی و میکروجلبک اسپیرولینا بر میزان حذف رنگ از فاضلاب نشان داده شده است.



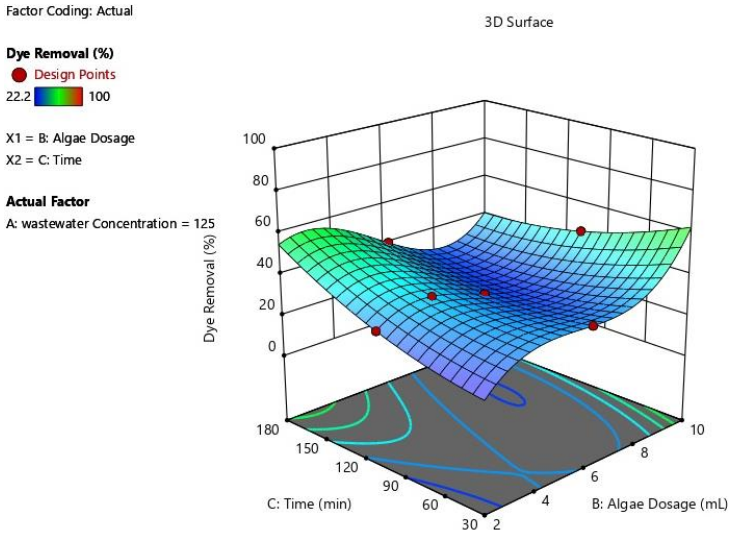
شکل (۲) تأثیر متقابل غلظت فاضلاب و دوز میکروجلبک اسپیرولینا

در شکل (۳)، تأثیر غلظت‌های مختلف فاضلاب سنتزی و زمان انجام عملیات تصفیه بر میزان حذف رنگ از فاضلاب نشان داده شده است.



شکل (۳) تأثیر متقابل غلظت فاضلاب و زمان تصفیه توسط میکروجلبک اسپیرولینا

در شکل (۴)، تأثیر دوزهای مختلف تزریق شده از میکروجلبک اسپیرولینا و زمان انجام عملیات تصفیه بر میزان حذف رنگ از فاضلاب نشان داده شده است.



شکل (۴) تأثیر متقابل دوز تزریقی میکروجلبک اسپیرولینا و زمان تصفیه فاضلاب

آنالیز واریانس (ANOVA) و شاخص‌های رگرسیونی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲) آنالیز واریانس و شاخص‌های رگرسیونی

P-value	۰/۰۲۸۱	F-value	۳/۶۵
خطای معیار	±۱۰/۹۳	R^2	۰/۷۶۶۴
میانگین	۴۲/۵۲	Adj R^2	۰/۵۵۶۱
ضریب تغییرات (٪)	۲۵/۷۱	Pred R^2	-۳/۲۱۰۵
		Adeq Precision	۸/۶۵۲۳

مدل ارائه شده توسط نرم‌افزار

در مدل ارائه شده توسط نرم‌افزار A، B و C نشان‌دهنده اثر اصلی متغیرهای مستقل به ترتیب شامل غلظت فاضلاب، دوز میکرو جلبک و مدت‌زمان واکنش است. متغیر A*B نشان‌دهنده اثر متقابل غلظت فاضلاب (فاکتور A) و دوز میکروجلبک (فاکتور B)، متغیر A*C نشان‌دهنده اثر متقابل غلظت فاضلاب (فاکتور A) و مدت زمان واکنش (فاکتور C)، و متغیرهای A2، B2 و C2 و D2 نشان‌دهنده اثر مربعی فاکتورهای A ، B و C بر روی پاسخ موردنظر است.

مدل حذف رنگ برای میکروجلبک اسپیرولینا به شرح زیر است:

Dye Removal = +35.16-2.43 * A +13.21* B -10.63* C -11.92* A * B+6.49 * A* C+2.05 * B * C*+13.05 * A2*+0.1471 * B2-2.01* C2

بحث و نتیجه‌گیری

در این بخش، به تجزیه‌وتحلیل نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار طراحی آزمایش پرداخته می‌شود.

- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی حذف رنگ از فاضلاب سنتزی توسط میکروجلبک

همان‌طور که ذکر گردید، محدوده فعالیت میکروجلبک اسپیرولینا، pH قلیایی است؛ بنابراین، pH تمام فاضلاب‌هایی که توسط این جلبک مورد تصفیه قرار گرفتند، در محدوده قلیایی (حدود ۹) تنظیم شدند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، پارامتر زمان در این بخش ثابت نگهداشته شده تا تأثیر متقابل غلظت فاضلاب و دوز میکروجلبک اسپیرولینا بر میزان حذف رنگ فاضلاب مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس خروجی نرم‌افزار، غلظت فاضلاب سنتزی ۲۰۰ -۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و دوز جلبک تزریقی به فاضلاب ۱۰-۲ میلی‌لیتر است که حذف ۱۰۰ درصدی رنگ از فاضلاب، زمانی رخ داد که بالاترین دوز جلبک اسپیرولینا (۱۰mL) به کمترین غلظت فاضلاب سنتزی (۵۰ mg/L) تزریق شد. همچنین، عکس این موضوع نیز مشاهده می‌شود؛ کمترین میزان حذف رنگ (۲۲/۲ درصد) از فاضلاب زمانی حاصل شد که پایین‌ترین دوز جلبک اسپیرولینا (۲mL) به بیشترین غلظت فاضلاب سنتزی (۲۰۰ mg/L) تزریق شد. علت این موضوع را می‌توان بر اساس نتایج مشابه به‌دست‌آمده در تحقیقات دیگر تحلیل کرد؛ حذف رنگ توسط میکرو جلبک، بیشتر از طریق جذب سطحی (مکان‌های اتصال در زیست‌توده جلبکی و تفاوت بار سطحی جلبک با ماده آلاینده) و تا حدودی هم از طریق مصرف غذایی و تبدیل ماده آلی به مواد معدنی صورت می‌گیرد؛ بنابراین هرچقدر دوز بیشتری از میکروجلبک به محیط حاوی رنگ (پساب سنتزی در این مطالعه) افزوده شود، به همان میزان هم افزایش حذف رنگ از محیط بیشتر خواهد بود و همچنین، هرچقدر غلظت رنگ در این محیط کمتر باشد، عدد جذب کمتر و درنتیجه میزان حذف رنگ بیشتری مشاهده می‌شود (یاسین و شولز[۱] ۲۰۱۹؛ گاجار و منگانی[۲] ۲۰۱۲).

بر اساس شکل (۳)، که پارامتر دوز جلبک در این بخش ثابت نگهداشته شده است؛ میزان غلظت فاضلاب سنتزی برای انجام آزمایش‌ها، ۲۰۰ -۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و زمان انجام عملیات حذف رنگ توسط سوسپانسیون جلبکی از فاضلاب، ۱۸۰- ۳۰ دقیقه اعمال شد. بر این اساس، پایین‌ترین غلظت فاضلاب که ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده در کمترین زمان تصفیه (۳۰ دقیقه)، بهترین نتیجه (حذف ۱۰۰ درصدی رنگ) را نشان داده است. به همین ترتیب، وقتی که بالاترین زمان تصفیه فاضلاب توسط جلبک اسپیرولینا به بالاترین غلظت فاضلاب اختصاص یافت، کمترین راندمان حذف رنگ حاصل شد. علت این امر، اشباع شدن مکان‌های اتصال موجود در سطح جلبک در مدت زمان ۳۰ دقیقه است که در صورت متناسب بودن غلظت رنگ موجود در محیط با دوز جلبک یا به عبارتی میزان کل مکان‌های اتصال مولکول‌های رنگ، حذف ۱۰۰ درصدی رنگ رخ خواهد داد؛ عکس این موضوع نیز صادق است، در صورت بیشتر بودن غلظت رنگ از مکان‌های اتصال رنگ (در سطح میکروجلبک)، با افزایش زمان و اشباع شدن این مکان‌ها از رنگ، مولکول‌های رنگ در محیط باقی می‌مانند و میزان حذف رنگ کم می‌شود (دوگار[۳] و همکاران، ۲۰۱۰؛ ملکوتیان و همکاران، ۱۳۹۴).

در شکل (۴)، غلظت فاضلاب سنتزی در این بخش ثابت نگه‌داشته شده است تا اثر متقابل دوز میکرو جلبک اسپیرولینا و زمان عملیات حذف رنگ بررسی شود. حذف ۱۰۰ درصدی رنگ از فاضلاب، در مدت زمان ۳۰ دقیقه (کمترین زمان تصفیه) در شرایطی که ۱۰ میلی‌لیتر از میکرو جلبک اسپیرولینا با فاضلاب در تماس بوده، صورت گرفته است و این نسبت به‌صورت خطی تنزل داشته؛ بطوری‌که در مدت‌زمان ۱۰۵ دقیقه (زمان حد وسط در تصفیه) و دوز جلبک ۶ میلی‌لیتر، حدود ۴۶ درصد و در

---

۱. Yaseen and Scholz

۲. Gajare and Menghani

۳. Doğar

مدت زمان ۱۸۰ دقیقه (بیشترین زمان تصفیه) و دوز جلبک ۲ میلی‌لیتر، ۲۲/۲ درصد از رنگ فاضلاب حذف شده است. بنا بر نتایج به‌دست‌آمده در سه نمودار، دوز بهینه میکرو جلبک اسپیرولینا برای حذف رنگ راکتیو آبی، ۱۰ میلی‌لیتر و زمان بهینه حذف رنگ راکتیو آبی توسط جلبک اسپیرولینا، ۳۰ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. بر اساس تحقیقات مشابه صورت گرفته، بالاترین میزان جذب رنگ توسط میکروجلبک در شرایطی صورت می‌گیرد که نسبت غلظت زیست‌توده از نسبت میزان غلظت رنگ موجود در محیط که می‌توانند جایگاه‌های اتصال را پر کنند، بیشتر باشد (عبدل- اتی[۱] ۲۰۱۳؛ دنگ[۲]و همکاران، ۲۰۰۹)؛ در این تحقیق، مدت زمان پر شدن این جایگاه‌ها و به عبارتی مدت‌زمان جذب رنگ توسط میکرو جلبک، ۳۰ دقیقه بوده که ۱۰۰ درصد حذف رنگ را نشان داده است.

تحلیل آنالیز واریانس به‌منظور حذف رنگ

بر اساس جدول آنالیز واریانس (جدول (۲))، مقدار ۳/۶۵ در مدل F-value نشان‌دهنده معنی‌دار بودن مدل است و به این معنی است که این مدل با نتایج آزمایشگاهی، مطابقت خوبی دارد. در این مدل، تنها ۲/۸۱ درصد احتمال خطا در رخ دادن فراوانی‌ها وجود دارد. مقادیر P-value کمتر از ۰/۰۵۰۰ نیز بر معنی‌دار بودن شرایط مدل تأکید دارد. همچنین، مدل در مقادیر بیش از ۰/۱۰۰۰ معنی‌دار نیست. اگر تعدادی شرایط بی‌معنی در مدل وجود داشته باشد (غیر از شرایط موردنیاز برای تائید مراحل آزمایش)، کاهش تعداد مراحل مدل، ممکن است مدل را بهبود بخشد.

با توجه به جدول (۲)، مقدار منفی R^2 پیش‌بینی‌شده، بیانگر این است که میانگین کلی مدل، نتایج را بهتر پیش‌بینی می‌کند. Adeq Precision نسبت سیگنال به نویز را اندازه‌گیری می‌کند. نسبت بیش از ۴ مطلوب است که نسبت ۸/۶۵۲ در مدل ارائه شده برای حذف رنگ توسط میکروجلبک اسپیرولینا بیانگر سیگنال مناسب و کافی است؛ این مدل می‌تواند برای انجام فضای طراحی استفاده شود.

نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج، بهترین درصد حذف رنگ راکتیو آبی توسط میکرو جلبک اسپیرولینا، در زمان ۳۰ دقیقه با دوز جلبک تزریقی ۱۰ میلی‌لیتر به فاضلاب با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۰۰ درصد به دست آمد. به عبارتی، پایین‌ترین غلظت فاضلاب، در کمترین زمان تصفیه، بهترین نتیجه را نشان داده است. کمترین میزان حذف رنگ از فاضلاب نیز زمانی حاصل شد که پایین-ترین دوز جلبک اسپیرولینا، به بیشترین غلظت فاضلاب سنتزی تزریق شد. همچنین، بالاترین زمان تصفیه فاضلاب توسط جلبک اسپیرولینا در بالاترین غلظت فاضلاب، کمترین راندمان حذف رنگ را نشان داد. با جمع‌بندی نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر و بر اساس سایر تحقیقات دیگری که در زمینه حذف رنگ‌ها صورت گرفته، میکروجلبک اسپیرولینا، جاذب خوبی برای رنگ‌های آنیونی محسوب می‌شود. یافته‌های حاصل از طیف‌سنجی FTIR در تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که مسئولیت فرآیند جذب در میکروجلبک‌ها، باندهای شیمیایی و گروه‌های مولکولی سطح آن‌هاست؛ به‌طوری‌که میکروجلبک اسپیرولینا نیز جاذب خوبی برای رنگ‌های آنیونی در pH های قلیایی است (قائنی و همکاران، ۱۳۸۹؛ تانگ[۳]و همکاران،

۱ Abdel-Aty
۲ Deng
۳ Tang

۲۰۲۲). بنابر نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از میکروجلبک روشی ارزان با راهبری آسان به‌منظور حذف رنگ از فاضلاب نساجی است. همچنین استفاده از جلبک‌ها در حذف آلاینده‌ها از محیط‌های آبی یک روش دوست دار محیط‌زیست است که از ورود آلودگی‌های ثانویه به محیط جلوگیری می‌کند و برخلاف روش‌های انعقاد شیمیایی لجن باقیمانده از فرآیند تصفیه دارای حجم زیادی نبوده و سمی نیز نیستند.

سپاسگزاری

از پژوهشکده محیط‌زیست جهاد دانشگاهی، برای همکاری در انجام پژوهش حاضر و استفاده از امکانات آزمایشگاهی، سپاسگزاریم.

منابع

مرادی، ابراهیم؛ زززولی، محمدعلی (۱۳۹۳). بررسی حذف رنگ آزو Acid Red 18 از محیط های آبی توسط جلبک قهوه ای سارگاسوم. چهارمین همایش ملی سلامت، محیط زیست و توسعه پایدار.

خزایی پول، اسماعیل؛ شهیدی، فخری (۱۳۹۳). ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس یک افزودنی سودمند و مغذی برای بهبود ارزش تغذیه ای میان وعده های غذایی، همایش ملی میان وعده های غذایی، ۱(۱).

دیانتی تیکلی، رمضانعلی؛ جعفر صالحی، مرتضی؛ اسفندیاری، یحیی (۲۰۱۹). بررسی حذف فسفر و تولید ریزجلبک اسپیرولینا با استفاده از فاضلاب در فتوبیوراکتور، زیست فناوری دانشگاه تربیت مدرس، ۱۰(۲).

قبادیان، ساسان؛ گنجی دوست، حسین؛ آیتی، بیتا؛ سلطانی، ندا (۱۳۹۷). بهینه سازی رشد و کیفیت بیومس ریزجلبک اسپیرولینا با تغییر رقت محیط کشت و استفاده از سیکل هوادهی، زیست فناوری دانشگاه تربیت مدرس، ۹ (۳).

رئیس فرشید، ساناز؛ بابایی درویشی، فرشته؛ روشانی دشتمیان، اعظم؛ مظاهری، رفعت (۱۳۹۶). جذب رنگ متیلن بلو از محلول‌های آبی توسط جلبک سبز کلادوفورا نشریه کاربرد شیمی در محیط زیست، ۳۲.

احمدی اسبچین، سلمان (۱۳۹۱). جذب زیستی کادمیم از محلول های آبی به وسیله جلبک قهوه ای فوکوس سراتوس: خواص سطح جلبک و مکانیسم جذب،نشریه مهندسی شیمی ایران، سال ۱۱(۶۴)، ۵۴-۴۹.

قسیم و گوانگ جو، (۲۰۱۸). تصفیه و استفاده مجدد از فاضلاب. مترجم: مهران سپیددست، زهرا سلیمی، سید فخرالدین طاهرزاده موسویان، نشر عطران.

ملکوتیان، محمد؛ یوسفی، ذبیح الله؛ خداشناس لیمونی، زهرا (۱۳۹۴). حذف روی در فاضلاب صنعتی با استفاده از جلبک سبز میکروسکوپی کلرلا ولگاریس، مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ۶ (۱۱).

قائنی، منصوره؛ متین‌فر، محمد؛ رومیانی، لاله؛ چوبکار، نسرین (۱۳۸۹). ترکیب شیمیایی پودر ریز جلبک اسپیرولینا، فصلنامه زیست شناسی شیل آمایش، ۱(۲).

سلطانی، ندا؛ صابری نجفی، محسن؛ عامری، مریم (۱۳۹۴). تأثیر تثبیت ریزجلبک *Scenedesmus quadricauda 109* بر توان کاهش آلودگی فلز سنگین کروم، مجله بوم شناسی آبزیان، ۳(۵)، صفحه ۸۰-۸۸.

پور عشق، یوسف؛ رستگار، ایوب؛ اله آبادی، احمد؛ رضائی گزل آباد، زهرا؛ قلی زاده، عبدالمجید (۱۳۹۲). بررسی حذف رنگ‌های آزو از محلول‌های آبی با استفاده از بیومس جلبک قهوه‌ای سیستوسیرا ایندیکا. مجله علمی-پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، ۲۰(۱)، ۷۲- ۸۳.

Abdel-Aty, A. M., Ammar, N. S., Ghafar, H. H. A., & Ali, R. K. (2013). Biosorption of cadmium and lead from aqueous solution by fresh water alga Anabaena sphaerica biomass. Journal of advanced research, 4(4), 367-374.
Abdel-Aty, A. M., Ammar, N. S., Ghafar, H. H. A., & Ali, R. K. (2013). Biosorption of cadmium and lead from aqueous solution by fresh water alga Anabaena sphaerica biomass. Journal of advanced research, 4(4), 367-374.
Abdelfattah, A., Ali, S. S., Ramadan, H., El-Aswar, E. I., Eltawab, R., Ho, S. H., ... & Sun, J. (2023). Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. Environmental Science and Ecotechnology, 13, 100205.
Al-Enazi, N. M. (2022). Optimized synthesis of mono and bimetallic nanoparticles mediated by unicellular algal (diatom) and its efficiency to degrade azo dyes for wastewater treatment. Chemosphere, 303, 135068.
Chin, J. Y., Chng, L. M., Leong, S. S., Yeap, S. P., Yasin, N. H. M., & Toh, P. Y. (2020). Removal of synthetic Dye by Chlorella vulgaris microalgae as natural adsorbent. Arabian Journal for Science and Engineering, 45, 7385-7395.
D. A. Yaseen, M. Scholz, 2019, Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic efuents: a critical review, International Journal of Environmental Science and Technology, volume 16:1193–1226.
Deng, L., Zhang, Y., Qin, J., Wang, X., & Zhu, X. (2009). Biosorption of Cr (VI) from aqueous solutions by nonliving green algae Cladophora albida. Minerals Engineering, 22(4), 372-377.
Doğar, Ç., Gürses, A., Açıkyıldız, M., & Özkan, E. (2010). Thermodynamics and kinetic studies of biosorption of a basic dye from aqueous solution using green algae Ulothrix sp. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 76(1), 279-285.
Donkadokula, N. Y., Kola, A. K., Naz, I., & Saroj, D. (2020). A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques. Reviews in environmental science and bio/technology, 19, 543-560.
El-Sheekh, M. M., Gharieb, M. M., & Abou-El-Souod, G. W. (2009). Biodegradation of dyes by some green algae and cyanobacteria. International Biodeterioration & Biodegradation, 63(6), 699-704.
Gajare, S. M., & Menghani, S. (2012). Biosorption of malachite green by naturally grown algal biomass from Girna river, Jalgaon District, Maharashtra. J. Algal. Biomass. Utln, 3(4), 60-65.
Habibzadeh, M., Chaibakhsh, N., & Naeemi, A. S. (2018). Optimized treatment of wastewater containing cytotoxic drugs by living and dead biomass of the freshwater microalga, Chlorella vulgaris. Ecological engineering, 111, 85-93.
Javed, F., Rehman, F., Khan, A. U., Fazal, T., Hafeez, A., & Rashid, N. (2022). Real textile industrial wastewater treatment and biodiesel production using microalgae. Biomass and Bioenergy, 165, 106559.
Jin, S. E., Lee, S. J., Kim, Y., & Park, C. Y. (2020). Spirulina powder as a feed supplement to enhance abalone growth. Aquaculture reports, 17, 100318.
Maznah, W. W., Al-Fawwaz, A. T., & Surif, M. (2012). Biosorption of copper and zinc by immobilised and free algal biomass, and the effects of metal biosorption on the growth and cellular structure of Chlorella sp. and Chlamydomonas sp. isolated from rivers in Penang, Malaysia. Journal of Environmental Sciences, 24(8), 1386-1393.
Özer, A., Akkaya, G., & Turabik, M. (2006). The removal of Acid Red 274 from wastewater: combined biosorption and biocoagulation with Spirogyra rhizopus. Dyes and pigments, 71(2), 83-89.

Rai, A., Sirotiya, V., Mourya, M., Khan, M. J., Ahirwar, A., Sharma, A. K., ... & Vinayak, V. (2022). Sustainable treatment of dye wastewater by recycling microalgal and diatom biogenic materials: Biorefinery perspectives. Chemosphere, 305, 135371.

Ramesh, B., Saravanan, A., Kumar, P. S., Yaashikaa, P. R., Thamarai, P., Shaji, A., & Rangasamy, G. (2023). A review on algae biosorption for the removal of hazardous pollutants from wastewater: Limiting factors, prospects and recommendations. Environmental Pollution, 121572.

Shi, W. Q., Li, S. D., Li, G. R., Wang, W. H., Chen, Q. X., Li, Y. Q., & Ling, X. W. (2016). Investigation of main factors affecting the growth rate of Spirulina. Optik, 127(16), 6688-6694.

Tang, K. H. D., Darwish, N. M., Alkahtani, A. M., AbdelGawwad, M. R., & Karácsony, P. (2022). Biological removal of dyes from wastewater: a review of its efficiency and advances. Tropical Aquatic and Soil Pollution, 2(1), 59-75.

Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. International journal of environmental science and technology, 16, 1193-1226.