

بهینه‌سازی فرآیند کاهش شوری زیستی از پساب صنعتی مصنوعی با TDS بالا به وسیله ریز جلبک *Spirulina maxima* با استفاده از روش سطح پاسخ

مریم اسدی قاله‌ری^۱، رویا مافی غلامی^{۱*}، افشین تک‌دستان^۲، بهنوش خوش منش زاده^۱

^۱گروه علوم و مهندسی محیط زیست، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^۲گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات و فناوری های زیست محیطی، دانشگاه علوم پزشکی جندی
شاپور اهواز، اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

چکیده

امروزه بکارگیری روش‌های تولید آب شیرین از آب‌های شور، می‌تواند راهکاری برای کاهش شدید منابع آب شیرین باشد. در این پژوهش از سلول‌های زنده ریز جلبک *Spirulina maxima* برای کاهش کل جامدات محلول پساب صنعتی مصنوعی با استفاده از فتوبیوراکتور به‌عنوان یک روش مفهومی جدید استفاده شد. اثر متغیرهای TDS، pH، شدت روشنایی و مدت زمان روشنایی-تاریکی بر رشد ریز جلبک‌ها و کاهش TDS بررسی و شرایط بهینه با روش سطح پاسخ باکس بنکن به‌دست آمد. با توجه به مدل به‌دست آمده، به‌ترتیب TDS پساب و pH بیشترین تأثیر را در کاهش TDS پساب مصنوعی داشتند. نتایج مطالعه نشان داد که میزان جذب TDS از مدل درجه دوم با توجه به مقادیر ضریب تعیین تعدیل شده (R^2 Adjusted) و ضریب تعیین پیش‌بینی شده (R^2 Predicted) برابر با ۰/۹۵۰۸ و ۰/۸۶۳۶ تبعیت می‌کند. بر این اساس حداکثر بازدهی حذف TDS در این مطالعه با متغیرهای TDS (۲۰۰۰ mg/l)، (۹/۳۶ pH)، شدت روشنایی ۴۰۱۰ lux و مدت زمان روشنایی-تاریکی ۱۵ ساعت به میزان ۷۶ درصد به‌دست آمد که نشان از بازدهی این روش در حذف پساب مصنوعی داشت.

کلید واژگان: ریز جلبک، اسپیرولینا ماکزیمما، مواد جامد محلول، شوری‌زدایی

مقدمه

امروزه به دلیل رشد جمعیت، افزایش شهرنشینی و کاهش منابع آب شیرین، مردم جهان را با مشکل جدی کمبود آب شیرین مواجه کرده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، بیش از یک میلیارد نفر به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند و حدود ۴۱ درصد از جمعیت جهان در مناطق کم آب زندگی می کنند (Jones, 2014). از این رو، استفاده از منابع آبی غیر متداول نظیر پساب فاضلاب های تصفیه شده، آب لب شور و آب دریا به طور فزاینده ای در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است. از مجموع کل آب های جهان، ۹۷/۴ درصد آن را آب شور دریاها و اقیانوس ها تشکیل می دهند که به دلیل شوری فراوان، قاعدتاً قابل استفاده نیستند (Chong et al., 2019). فاضلاب شور یک منبع آلودگی است که از سطوح و انواع مختلف نمک تشکیل شده است. این موضوع، یکی از مهمترین مشکلات محیط زیستی است که پیامدهای جبران ناپذیری را به دنبال خواهد داشت. فاضلاب شور حاوی نمک های غیر آلی است که می تواند آسیب جدی به تولید محصولات برساند، ظرفیت نفوذ پذیری زمین های شور را کاهش داده و در نهایت سبب افزایش شوری آب های شیرین شود (Tian et al., 2021). این ماده همچنین با سایر آلاینده هایی که از طریق فرسایش، تأثیرات مخربی روی سیستم های محیط زیستی دارند که باعث تهدید سلامت جامعه می شود، مرتبط است. به عنوان مثال، وجود ترکیبات دارویی، محصولات مراقبت شخصی (PPCP) و فلزات سنگین که در فاضلاب های شور می توانند وجود داشته باشند، خاصیت تجمع پذیری زیستی داشته و برخی از این ترکیبات در زنجیره غذایی موجودات تجمع پیدا کرده و وارد سطوح بالایی هرم غذایی (انسان ها) می شوند. همین موضوع سبب شد تا محققین زیادی به دنبال ایجاد روش هایی برای توسعه فناوری های نمک زدایی از آب های شور باشند (Porika et al., 2021). عمده ترین روش های نمک زدایی شامل روش غشایی اسمز معکوس (Reverse Osmosis: RO)، تقطیر چند مرحله ای (Multiple Effect Distillation: MED)،

روش های حرارتی تبخیر آبی چند مرحله ای (Multi Stage Flash: MSF) و الکترو دیالیز (Electro Dialysis: ED) می باشند که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. از جمله این معایب مصرف زیاد انرژی، رسوب گذاری، تخریب غشا و تخلیه آب نمک غلیظ به محیط زیست می باشد (Panagopoulos., 2021). به همین دلیل محققان در تلاشند تا فرآیندهای نمک زدایی آب را با مصرف انرژی کمتری توسعه دهند. در این بین استفاده از روش های زیستی جهت نمک زدایی از محیط های آبی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این فرآیندهای زیستی جدید برای تولید آب شیرین، استفاده از ریز جلبک ها است (Taheri et al., 2021, Herrera-León et al., 2016). ریز جلبک ها گروه متنوعی از میکروارگانیسم ها و بزرگترین گروه تولید کننده اولیه در محیط آبی می باشند که به وسیله تولید اکسیژن و مصرف دی اکسید کربن در نگهداری و ساختن اتمسفر زمین و به واسطه فعالیت های فتوسنتزی در تبادل انرژی نقش مهمی ایفا می کنند (Bhalamurugan et al., 2018). با توجه به این واقعیت که ریز جلبک ها می توانند به راحتی در اکوسیستم های آبی رشد کنند و همچنین به دلیل توانایی رشد سریع و جذب مواد مغذی بالا از جمله کربن، فسفر، نیتروژن و سایر ترکیبات مغذی به طور گسترده ای برای تصفیه فاضلاب استفاده می شود (Han et al., 2021). *Spirulina maxima* (به اختصار *S. maxima*) نوعی سیانوباکتر است که به عنوان ریز جلبک سبز آبی نیز شناخته می شود که جمعیت های عظیمی را در آب های گرمسیری و نیمه گرمسیری تشکیل می دهد. زیست توده *S. maxima* که به طور طبیعی در دریاچه Texcoco (مکزیک) و دریاچه چاد (آفریقا) یافت می شود، به دلیل غنی بودن از پروتئین، اسیدهای آمینه ضروری، کمپلکس ویتامین B، منبع غذایی مناسبی برای جوامع محلی این مناطق به حساب می آید (Lafarga et al., 2020). یکی از ویژگی های اصلی گونه اسپیرولینا توانایی رشد در چندین نوع فاضلاب از جمله فاضلاب شور و پساب حاصل

(شامل کارخانه‌ها: ییاف، شست و شوی حیوانات خانگی، بسته‌بندی گوشت، سوسیس و کالباس، مکمل‌های غذایی و کنسانتره خوراک دام و طیور و آبزیان، و تولید انواع فوم) بود، استفاده شد. در ادامه، شرایط بهینه برای کاهش میزان TDS در پساب صنعتی مصنوعی توسط ریزجلبک *S. maxima* در فتوبیوراکتور (PBR) مورد بررسی قرار گرفت. برای آزمایش و بهینه‌سازی از روش سطح پاسخ باکس-بنکن (BBD) استفاده شد. اثرات میزان TDS، pH مطلوب، شدت روشنایی و چرخه روشنایی-تاریکی، به‌عنوان پارامترهای مورد بررسی در بازدهی کاهش TDS مورد تحلیل قرار گرفت تا مناسب‌ترین مقدار هر پارامتر مشخص شود.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، نمونه ریز جلبک *S. maxima* از بانک جلبک دانشگاه تهران (ایران) تهیه شد. تلقیح اولیه به میزان 50 mg/l در ظروف 4 لیتری طی 14 روز کشت انجام شد (شکل 1). جهت کشت ریز جلبک‌ها از محیط کشت زاروک استفاده و ترکیب آن در جدول 1 نشان داده شد. محیط کشت‌ها در اتوکلاو به مدت 20 دقیقه در دمای 121 °C استریل شدند و به‌طور مداوم با دستگاه هوادهی (Heidolph, Hei-mix S, آلمان) با سرعت هوادهی 0/5 L/L.min مخلوط شدند. روشنایی موردنیاز توسط لامپ‌های فلورسنت نصب‌شده (11W, 220-240V) در دو طرف فتوبیوراکتور که توسط یک لوکس‌متر (TES-1330A، تایوان) اندازه‌گیری می‌شد، تأمین شد. دوره نوری 12 ساعت روشنایی-تاریکی با شدت نور 4000 lux و دمای 20 ± 30 °C در نظر گرفته شد. زیست‌توده با سانتریفیوژ (5ws-tdz، ایران) در 8000 دور در دقیقه به مدت 30 دقیقه برداشت شد و سپس با آب مقطر دو بار تقطیر شسته شد (Volkman et al., 2007; Castro et al., 2015). در این مطالعه، متغیرهای مختلف شدت نور (5000-3000-1000 lux)، pH (5/10، 8/5، 6/5)، غلظت

از نمک‌زدایی می‌باشد (Lucakova et al., 2021). این سازگاری متابولیکی، این ریزجلبک‌ها را به انتخاب خوبی برای حذف املاح محلول و ریزمغذی‌ها از فاضلاب تبدیل می‌کند و آن‌ها را به زیست‌توده‌ای تبدیل می‌کند که در صنایع غذایی، خوراک و صنایع دارویی نیز استفاده شود (Araujo et al., 2017; de Carvalho et al., 2020; Kalra et al., 2021). در مطالعه‌ای، Yang و همکاران (2008) تصفیه ادرار انسان توسط *Spirulina platensis* را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، *S. platensis* با تغذیه نسبتاً بالا برای تصفیه ادرار انسان کشت داده شد. نتایج نشان داد که حذف نیتروژن در ادرار انسان می‌تواند به 99٪ و حذف فسفر به بیش از 99/9٪ و 10/5 گرم زیست‌توده با تصفیه 12/5 میلی‌لیتر ادرار انسان به‌دست آید (Yang et al., 2008). Mata و همکاران (2020) دو محیط کشت فاضلاب حاصل از نمک‌زدایی با 25 درصد محیط کشت زاروک (Tcs) و 100 درصد محیط کشت زاروک (کنترل)، برای تعیین میزان تولید زیست‌توده *Spirulina sp. LEB 18* استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که میزان تولید زیست‌توده (1/14 g/l) با روش Tcs تنها 9 درصد کمتر از روش کنترل (1/25 g/l) است. مطالعات آن‌ها نشان داد که *Spirulina sp. LEB 18* می‌تواند به‌طور مؤثر از مواد مغذی فاضلاب استفاده کند که نشان‌دهنده بازدهی حذف بالای یون نیترات تا 96/99 درصد، یون فسفات تا 88/11 درصد و یون روی تا 96/43 درصد می‌باشد (Mata et al., 2020). تاکنون تحقیقات جامعی در مورد حذف مواد جامد محلول (TDS) از پساب‌های صنعتی با استفاده مستقیم از ریز جلبک‌ها انجام نشده است به‌همین دلیل نمی‌توان هیچ تجزیه و تحلیل عمیقی از فعالیت ریزجلبک‌ها در حذف شوری داشت. در نتیجه ایجاد منابع آبی قابل شرب و سالم از طریق روش‌های جدید نمک‌زدایی برای غلبه بر کمبود آب ضروری به‌نظر می‌رسد.

در پژوهش اخیر، برای بهینه‌سازی پارامترها از پساب صنعتی مصنوعی که ویژگی‌های آن مشابه پساب صنعتی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی محیط کشت زاروک.

ردیف	ماده و ترکیب	غلظت (g/l)
۱	NaHCO ₃	۱۶/۸
۲	K ₂ HPO ₄	۰/۵
۳	NaNO ₃	۲/۵
۴	K ₂ SO ₄	۱
۵	MgSO ₄ . 7 H ₂ O	۰/۲
۶	CaCl ₂	۰/۰۴
۷	FeSO ₄ . 7 H ₂ O	۰/۰۱
۸	EDTA	۰/۰۸

جدول ۲- مشخصات شیمیایی پساب صنعتی مصنوعی.

پارامتر	محدوده غلظت
(mg/l) COD	۴۱±۵۳۳
(mg/l) BOD	۳۲±۱۷۰
TDS (mg/l)	۹۳±۳۲۰۰
EC (mS/cm)	۰/۸±۴/۶
TSS (mg/l)	۱۲±۱۰۴
NO ₃ ⁻ (mg/l)	۷±۴۷
PO ₄ ⁻³ (mg/l)	۰/۱±۴/۲۱
(mg/l) SO ₄ ⁻²	۳۶±۳۷۰
cl ⁻ (mg/l)	۱۹±۱۲۰
Na ⁺ (mg/l)	۲۶±۱۵۲

در پساب مصنوعی با مقدار توصیه شده ۱ml در هر ۱۰۰۰L محیط استفاده شد. ترکیب این پساب مصنوعی در جدول ۲ نشان داده شده است (Vo et al., 2019).

طراحی آزمایش: پس از کشت ریز جلبکها در محیط کشت زارو، زمانی که غلظت آنها به میزان ۱۰۰-۵۰ mg/l رسید (در مرحله رشد لگاریتمی)، میزان ۵۰ ml از ریز جلبکها به فتوبیوراکتورهای ۵۰۰ml اضافه شد. در این آزمایش از ارلن مایر برای کشت آنها استفاده شد (شکل ۱). این ظروف شیشه‌ای کاملاً استریل شدند و از پساب مصنوعی پر شدند. جهت جلوگیری از ورود آلودگی، فتوبیوراکتورها کاملاً درب‌بندی شدند. دمای کار در کل آزمایشها ۳۰±۲ °C در نظر گرفته شد. pH پساب با HCl

TDS (۲۰۰۰-۳۰۰۰-۴۰۰۰ mg/l) و چرخه روشنایی- تاریکی (۶-۱۸، ۹-۱۵، ۱۲-۱۲)، در دمای ثابت ۲۰±۳ °C ارزیابی شدند. برای جلوگیری از آلودگی در طول دوره کشت، تمام قسمت‌های سیستم، محیط کشت، پساب مصنوعی، ظروف مورد استفاده، فتوبیوراکتور و اتصالات قبل و در حین آزمایش و نمونه‌برداری استریل شدند.

پساب مصنوعی: پساب مصنوعی توسط آب مقطر با مواد شیمیایی تهیه شده از شرکت مرک Merck و سیگما آلدریچ (آلمان) ساخته شد. مواد شیمیایی مورد استفاده، C₆H₁₂O₆، Na₂SO₄، Aceton، NaCl، NaNO₃، KH₂PO₄، MgSO₄ با درصد خلوص ۹۹ درصد بود و مقادیر TDS و pH در پساب مصنوعی تنظیم شد. همچنین عناصر کمیاب



شکل ۱- کشت ریز جلبک در محیط کشت زاروک.



شکل ۲- فتوبیوراکتور ارلن مایر برای کاهش TDS پساب صنعتی.

رنگ به پایان رسید. جهت اندازه‌گیری میزان TDS از دستگاه TDS سنج (AD330، Adwa، مجارستان) استفاده شد (Volkmann *et al.*, 2008, Zhou *et al.*, 2017).

روش‌های تحلیلی:

چگالی نوری: چگالی نوری در ۵۶۰nm برای تعیین کمیت تراکم سلول توسط دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد. ارتباط بین چگالی نوری و غلظت میکرو جلبک‌ها در پساب مصنوعی در معادله خطی ۱ آورده شده است.

(۱)

Spirolina. M: $y = 0.0023x + 0.0084$ ($R^2 = 0.96$)

و ۰/۱ M (NaOH) تنظیم شد. pH محیط کشت با pH متر دیجیتالی (UB-10، دنور) اندازه‌گیری شد (Pandey *et al.*, 2011, Fan *et al.*, 2020).

پساب مصنوعی با ۳ سطح غلظت TDS (۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ mg/l) مورد آزمایش قرار گرفت. غلظت سلولی در فواصل زمانی ۷۲ ساعت با استفاده از منحنی کالیبراسیون (۵۶۰ نانومتر) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1780، Shimadzu، ژاپن)، برآورد شد. یک رابطه خطی ($R^2 = ۰/۹۶$) بین وزن ریز جلبک و مقدار چگالی نوری (OD)، ۵۶۰nm که حداکثر طول موج جذب با اسپکتروفتومتر بود به دست آمد. آزمایش‌ها با مشاهده کاهش رشد سلولی و تغییر

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در طراحی به همراه مقادیر و محدوده در نظر گرفته شده.

سطح کد داده شده			متغیرهای مستقل	
۱	۰	۱-		
۱۰/۵	۸/۵	۶/۵	A	pH
۴۰۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰	B	TDS
۵۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰	C	شدت روشنایی
۱۸	۱۵	۱۲	D	مدت زمان روشنایی-تاریکی

بنکن (BBD) جهت ارزیابی تأثیر متغیرهای مستقل بر عملکرد پاسخ (جذب TDS) به وسیله ریز جلبک‌ها استفاده شد. متغیرهای مستقل در این مطالعه شامل pH، غلظت اولیه TDS، شدت روشنایی و مدت زمان روشنایی-تاریکی در دو سطح حداقل و حداکثر ۱ و ۱- بودند. ۲۹ پیاده‌سازی آزمایشی توسط نرم‌افزار Design Expert نسخه ۷/۰ ایجاد شد. متغیرها با سطح خود در جدول ۳ طبقه‌بندی شدند.

نتایج

تأثیر تغییر شرایط کشت بر پارامترهای سینتیک رشد: تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) برای تعیین ضرایب تعیین و به دست آوردن یک مدل ریاضی مناسب که با متغیرها مطابقت دارد، انجام شد. از طریق ارزیابی مقدار R^2 ، P ، F ، R^2 تنظیم شده (R^2 Adjusted) و R^2 پیش‌بینی شده (R^2 Predicted) کفایت مدل تعیین شد. نتایج بررسی تأثیر فاکتورهای pH، غلظت TDS، شدت روشنایی و مدت زمان روشنایی-تاریکی بر میزان کاهش TDS به وسیله ریز جلبک‌ها به روش سطح پاسخ بر مبنای مدل باکس بنکن در جدول ۴ ارائه شده است.

نتایج تحلیل ANOVA نشان داد که مدل‌ها دارای مقادیر F بالا یعنی $۳۹/۶۸$ و P -values پایین ($> ۰/۰۰۰۱$) هستند (جدول ۵) که تأییدکننده این موضوع بود که مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی جذب TDS از پساب توسط ریز جلبک‌ها دارای اهمیت است. مدل ارائه شده برای سیستم، شامل چهار مرحله اثرات تک جزئی یا خطی غلظت TDS، pH، شدت نور و مدت زمان روشنایی تاریکی، شش اثر دوگانه یا برهم‌کنشی و چهار اثر انحنا یا درجه دوم است. اما

X: بازده زیست‌توده (mg/l)

Y: تراکم نوری (nm)

نرخ رشد ویژه: رشد جلبکی یک فرآیند خودبه‌خودی است به طوری که نرخ رشد متناسب با غلظت سلولی است که در محیط وجود دارد. نرخ رشد ویژه که با علامت μ_{max} (1/day) نشان داده می‌شود با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد.

$$\mu_m = \frac{\ln N_0 - \ln N_1}{t} \quad (2)$$

که در آن، N_0 و N_1 به ترتیب غلظت سلول‌ها در زمان‌های (t_0) و (t_1) در فاز رشد لگاریتمی هستند. این ثابت نرخ رشد برای انواع مختلف جلبک‌ها، نوع مواد مغذی استفاده شده و غلظت اولیه نمک متغیر است (Anjos et al., 2013, (hwan Seo et al., 2013, Wei et al., 2020).

اندازه‌گیری میزان جذب TDS و شوری پساب: یکی از پارامترهای لازم برای تشخیص شوری و املاح محلول‌های آبی، TDS است. در پایان کشت، جهت اندازه‌گیری میزان TDS، زیست‌توده فیلتر (استات سلولز $۰/۴۵ \mu m$) شد، سپس با دور ۱۰۰۰۰ دور به مدت ۶ دقیقه سانتریفیوژ گردید. با پیش (TDS)، درصد کاهش TDS با استفاده از معادله زیر تعیین شد (معادله ۳).

$$(3)$$

$$\text{salinity reduction \%} = 100(TDS_i - TDS_f) / TDS_i$$

جایی که TDS_i و TDS_f به ترتیب مقادیر اولیه و نهایی TDS محیط هستند (Igwegbe and Onukwuli, 2019).

طراحی و بهینه‌سازی تجربی توسط روش سطح پاسخ: در مطالعه حاضر، از روش سطح پاسخ بر مبنای طراحی باکس

جدول ۴ - نتایج روش باکس بنکن جذب TDS به‌وسیله میکرو جلبک‌ها.

TDS %	D:مدت زمان روشنایی-تاریکی hr	C:شدت روشنایی lux	B:TDS mg/l	A:pH	Run	Std
۶۵	۶-۱۸	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۸/۵	۱	۲۳
۳۸	۶-۱۸	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۶/۵	۲	۱۱
۴۷	۹-۱۵	۵۰۰۰	۴۰۰۰	۸/۵	۳	۱۶
۶۶	۱۵-۹	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۸/۵	۴	۲۶
۵۷	۱۵-۹	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۸/۵	۵	۱۳
۳۱	۱۲-۱۲	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۶/۵	۶	۹
۲۶	۱۵-۹	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۶/۵	۷	۱۷
۴۱	۱۸-۶	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۸/۵	۸	۲۴
۶۷	۱۵-۹	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۸/۵	۹	۲۵
۳۲	۱۵-۹	۱۰۰۰	۴۰۰۰	۸/۵	۱۰	۱۴
۶۷	۱۵-۹	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۸/۵	۱۱	۲۹
۶۱	۱۲-۱۲	۵۰۰۰	۳۰۰۰	۸/۵	۱۲	۶
۴۲	۱۵-۹	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۶/۵	۱۳	۱
۳۷	۱۲-۱۲	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۸/۵	۱۴	۲۲
۶۵	۱۵-۹	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۸/۵	۱۵	۲۸
۶۱	۱۸-۶	۵۰۰۰	۳۰۰۰	۸/۵	۱۶	۸
۴۲	۱۵-۹	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰/۵	۱۷	۱۸
۴۷	۱۲-۱۲	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰/۵	۱۸	۱۰
۴۵	۱۸-۶	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰/۵	۱۹	۱۲
۳۴	۱۵-۹	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۱۰/۵	۲۰	۴
۳۴	۱۸-۶	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۸/۵	۲۱	۷
۶۷	۱۵-۹	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰/۵	۲۲	۲
۴۳	۱۵-۹	۵۰۰۰	۳۰۰۰	۶/۵	۲۳	۱۹
۶۷	۱۵-۹	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۸/۵	۲۴	۲۷
۳۷	۱۲-۱۲	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۸/۵	۲۵	۵
۶۸	۱۵-۹	۵۰۰۰	۲۰۰۰	۸/۵	۲۶	۱۵
۳۳	۱۵-۹	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۶/۵	۲۷	۳
۶۲	۱۵-۹	۵۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰/۵	۲۸	۲۰
۶۱	۱۲-۱۲	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۸/۵	۲۹	۲۱

۵ اثر پارامترهای مختلف (طراحی شده با روش BBD) را به‌عنوان پاسخ نشان می‌دهد. پس از تحلیل‌های آماری، مدل پیشنهادی برای جذب TDS به‌وسیله ریز جلبک‌ها به‌صورت معادله کوآدراتیک توسط نرم‌افزار ارائه شد که در معادله ۴ نشان داده شده است:

$$TDS = +65/80 + 7/00A - 11/33B + 0/8333C - 6/00AB + 0/7500AC - 2/25AD + 1/0000BC + 0/0000BD + 0/7500CD - 15/44A^2 - 6/19B^2 - 7/94C^2 - 9/44D^2$$

همه این پارامترها در مدل تأثیر معنی‌دار و مهم نداشته و با حذف برخی از این پارامترها مدل ساده‌تر می‌شود که نشان‌دهنده کفایت آن‌ها برای بهینه‌سازی پارامترهای مورد مطالعه است.

براساس جدول ۵، ضرایب شرایط مدل از نظر آماری معنی‌دار است ($P < 0/05$)؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل برای پیش‌بینی کاهش میزان TDS در محدوده‌های متغیر مناسب است. برای محاسبه حداکثر نرخ کاهش، جدول

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس مدل درجه دوم برای جذب TDS به وسیله ریز جلبک‌ها.

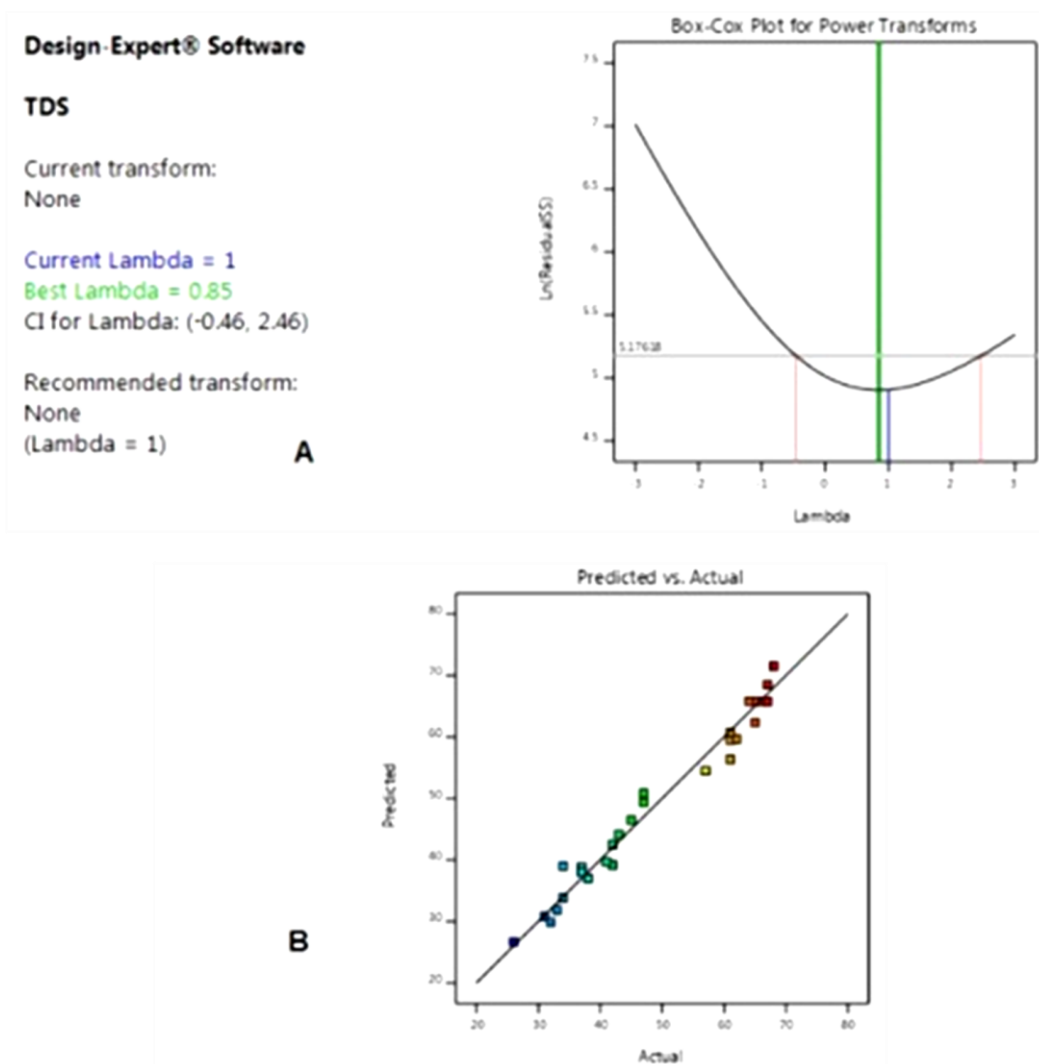
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	value-p	
Model	۵۳۵۵/۵۹	۱۴	۳۸۲/۵۴	۳۹/۶۸	۰/۰۰۰۱ <	significant
A-pH	۵۸۸/۰۰	۱	۵۸۸/۰۰	۶۰/۹۹	۰/۰۰۰۱ <	
B-TDS	۱۵۴۱/۳۳	۱	۱۵۴۱/۳۳	۱۵۹/۸۸	۰/۰۰۰۱ <	
C- شدت روشنایی	۱۰۸۳/۰۰	۱	۱۰۸۳/۰۰	۱۱۲/۳۴	۰/۰۰۰۱ <	
D- مدت زمان روشنایی-تاریکی	۸/۳۳	۱	۸/۳۳	۰/۸۶۴۴	۰/۳۶۸۳	
AB	۱۴۴/۰۰	۱	۱۴۴/۰۰	۱۴/۹۴	۰/۰۰۱۷	
AC	۲/۲۵	۱	۲/۲۵	۰/۲۳۳۴	۰/۶۳۶۵	
AD	۲۰/۲۵	۱	۲۰/۲۵	۲/۱۰	۰/۱۶۹۳	
BC	۴/۰۰	۱	۴/۰۰	۰/۴۱۴۹	۰/۵۲۹۹	
BD	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	
CD	۲/۲۵	۱	۲/۲۵	۰/۲۳۳۴	۰/۶۳۶۵	
A ²	۱۵۴۶/۶۷	۱	۱۵۴۶/۶۷	۱۶۰/۴۴	۰/۰۰۰۱ <	
B ²	۲۴۸/۶۷	۱	۲۴۸/۶۷	۲۵/۷۹	۰/۰۰۰۲	
C ²	۴۰۹/۱۰	۱	۴۰۹/۱۰	۴۲/۴۴	۰/۰۰۰۱ <	
D ²	۵۷۸/۲۴	۱	۵۷۸/۲۴	۵۹/۹۸	۰/۰۰۰۱ <	
Residual	۱۳۴/۹۷	۱۴	۹/۶۴			
Lack of Fit	۱۲۸/۱۷	۱۰	۱۲/۸۲	۷/۵۴	۰/۰۵۳۲	Not significant
Pure Error	۶/۸۰	۴	۱/۷۰			
Cor Total	۵۴۹۰/۵۵	۲۸				

جدول ۶- پارامترهای آماری برای مدل کوآدراتیک.

Std. Dev.	۳/۱۰	R ²	۰/۹۷۵۴
Mean	۴۹/۶۶	Adjusted R ²	۰/۹۵۰۸
C.V. %	۶/۲۵	Predicted R ²	۰/۸۶۳۶
		Adeq Precision	۲۰/۰۷۷۳

به دست آمد که در اینجا اختلاف کمتر از ۰/۲ است. همچنین این مقادیر نزدیک به مقدار R² هستند که نشان دهنده مناسب بودن مدل از نظر آماری است (جدول ۶؛ Singh et al., 2021). همچنین Adeq Precision نسبت سیگنال به نویز را اندازه گیری می کند که نسبت بزرگ تر از ۴ قابل قبول است که این مقدار ۲۰/۰۷۷۳ حاصل شد که نشان دهنده

Y: پاسخ پیش بینی شده برای جذب TDS به وسیله ریز جلبک‌ها و پارامترهای A، B، C و D به ترتیب pH، TDS، شدت روشنایی و مدت زمان روشنایی-تاریکی است. ضریب تعیین (R²) از مقادیر تجربی ۰/۹۷۵۴ تعیین شد. مقدار پارامتر ضریب تعیین تعدیل شده (Adj-R²) و پارامتر ضریب تعیین پیش بینی شده (Pre-R²) به ترتیب ۰/۹۵۰۸ و ۰/۸۶۳۶



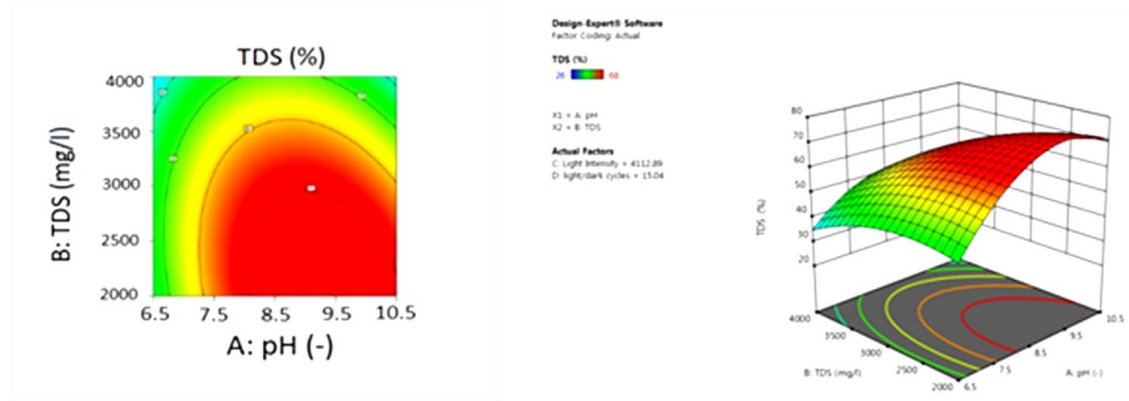
شکل ۳- (A) نمودار Box-Cox برای تبدیل قدرت، (B) مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای کاهش TDS.

جدول ۴ ترتیب پارامترهای مؤثر بر رشد *S. maxima* و کاهش TDS به ترتیب غلظت TDS، شدت روشنایی، pH و مدت زمان روشنایی-تاریکی است. لازم به ذکر است که تمام محدوده‌های مقدار انتخاب شده برای پارامترها با توجه به مقادیر بهینه به دست آمده از بررسی تحقیقات گذشته (Ainas et al., 2017; Soni et al., 2017; Mirhosseini et al., 2021; Soni et al., 2019; Bezerra et al., 2011) انتخاب شدند.

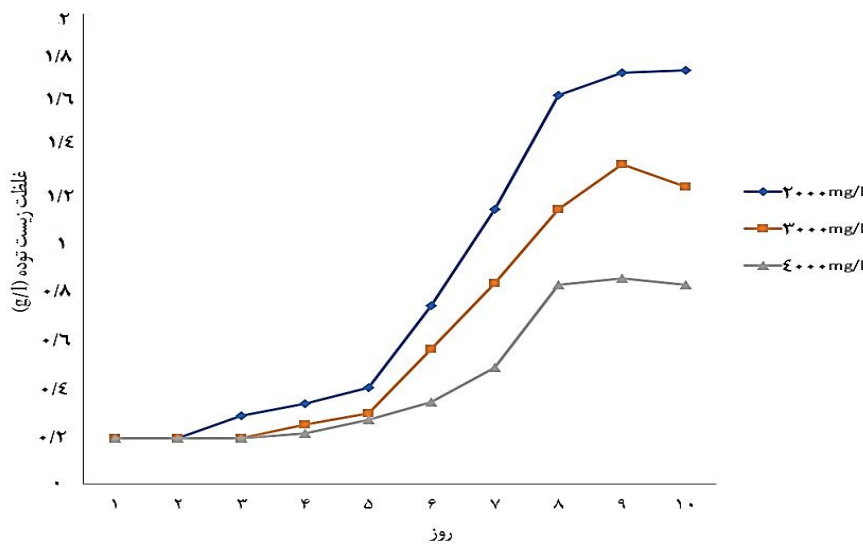
نمودارهای کانتور و سه‌بعدی TDS در برابر غلظت pH در شکل ۴ نشان داده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با کاهش میزان TDS و افزایش pH، درصد حذف TDS افزایش می‌یابد. در این فرآیند جذب نمک در دو قسمت اتفاق

مقدار مطلوب این پارامتر است. در نتیجه از این مدل می‌توان برای طراحی استفاده کرد.

مطابق شکل ۳ (A)، مقدار Lambda 1 بهترین مدل برازش قدرت را ارائه می‌دهد. شکل ۳ (B) نتایج ایده‌آلی بین مقادیر پیش‌بینی شده مدل و مقادیر واقعی را برای کاهش TDS در غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر P و F-values مشخص شد که زمان روشنایی-تاریکی کمترین پارامتری است که بر نرخ رشد *S. maxima* تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین می‌توان این عبارت را از معادله مدل پیش‌بینی حذف کرد، در حالی که مهم‌ترین پارامتر، TDS است که کاهش آن باعث افزایش تولید پساب با شوری کمتر می‌شود. با توجه به



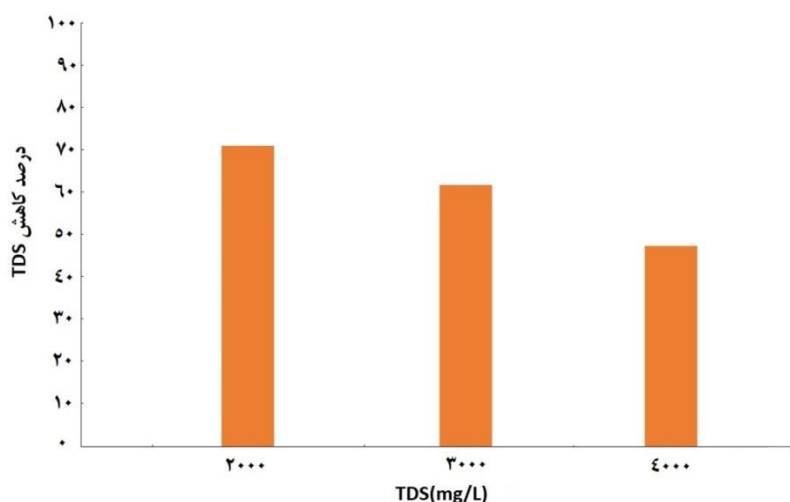
شکل ۴- نمودار کانتور و سه بعدی کاهش TDS توسط *S. maxima*، TDS در برابر غلظت pH.



شکل ۵- میزان تولید زیست توده در غلظت‌های مختلف TDS و پارامترهای بهینه: pH (۹/۳۶)، شدت روشنایی (۴۰۱۰ lux) و (مدت زمان روشنایی-تاریکی ۱۵ hr).

در محیط پساب عملی نبود، که می‌تواند به علت غلظت بالای یون‌های ایجادکننده شوری به‌خصوص یون‌های Na^+ و Cl^- در پساب باشد، این یون‌ها باعث می‌شود که اثر شوری فزاینده‌ای روی سلول‌های ریز جلبک داشته و سبب کاهش رشد ریز جلبک شود (White et al., 2013). بر اساس شکل ۴، بالاترین مقادیر کاهش TDS پیش‌بینی شده به وسیله طراحی آزمایش (۷۶٪)، زمانی بود که *S. maxima* در غلظت TDS (۲۰۰۰ mg/l) با pH ۹/۳۶، شدت روشنایی ۴۰۱۰ lux و مدت زمان روشنایی ۱۵ hr کشت شد. پس از اینکه بهترین شرایط برای رشد ریز جلبک‌ها حاصل شد، آزمایشی را در شرایط بهینه پیش‌بینی شده که توسط RSM به دست آمده بود، برای تأیید نتایج

افتاد؛ قسمت اول به دلیل افزایش فاز رشد ریز جلبک و قسمت دوم مربوط به مرحله ثابت رشد ریز جلبک بود. همان‌طور که از نام آن‌ها پیداست، میزان جذب نمک در مرحله رشد زیاد است درحالی‌که حذف بسیار جزئی در مرحله ثابت رخ می‌دهد (Mutale-joan et al., 2021). در این پژوهش کاهش TDS طی ۱۰ روز به نتیجه رسید. این کاهش فقط به دلیل مصرف املاح مغذی پساب بود. نتیجه گیری شد که پساب به دلیل داشتن ترکیبات مغذی، می‌تواند به‌عنوان یک محیط کشت برای رشد و تولید بیومس ریز جلبک عمل نموده و با مصرف املاح موجود در پساب، به تصفیه پساب کمک کند. همچنین نتایج نشان داد که کاهش TDS در غلظت‌های بالای TDS، با ریز جلبک‌ها



شکل ۶- درصد کاهش TDS در برابر غلظت‌های TDS توسط *S. maxima*.

با این حال، سطوح بالای غلظت یون‌ها می‌تواند اسیدهای چرب را در غشای سلولی ناپایدار کند و رشد فتواتوتروفیک که همان تغذیه مصنوعی با دی‌اکسید کربن است را متوقف کند. غلظت‌های بالاتر نمک می‌تواند شرایط نامطلوبی برای رشد در جلبک‌ها ایجاد کند. افزایش غلظت‌های خارجی یون‌ها تعادل اسمزی سلول‌ها و محیط اطراف آن‌ها را مختل می‌کند و سبب توقف رشد ریز جلبک می‌شود (Zafar et al., 2022). جذب متابولیک نمک‌ها در سیستم‌های زیستی یک فرآیند خود به خودی است که در آن جذب زیستی از نظر ترمودینامیکی مطلوب است و نیازی به انرژی ندارد. مقدار یونی که یک جاذب جامد می‌تواند از محلول حذف کند به سینتیک تعادل و نوع ترکیبات سطح سلولی جاذب بستگی دارد (Velásquez and Dussan, 2009). ریزجلبک‌ها می‌توانند یون‌های فلزی را از آب با جذب زیستی یا تجمع زیستی حذف کنند. دیواره سلولی جلبک‌ها عمدتاً از پروتئین‌ها، پلی ساکاریدها و لیپیدها تشکیل شده است. دیواره سلولی نیز دارای بار منفی و چسبنده است که اجازه جذب کاتیون‌ها را فراهم می‌کند (Gupta and Rastogi, 2009; Gupta et al., 2010). مکانیسم‌هایی که جلبک‌ها کاتیون‌ها را جذب می‌کنند شامل رسوب سطحی، جذب فیزیکی و زیستی می‌شود. با این حال عامل مهمی که از طریق آن حدود ۸۰ درصد کاتیون‌ها جذب

پیش‌بینی شده و مقایسه نتایج با داده‌های تجربی طراحی شد. مقادیر نهایی TDS که توسط RSM طراحی شده بود، به ترتیب به مقدار ۷۱ درصد برای سری تست و مقدار ۷۶ درصد برای سری پیش‌بینی توسط RSM حاصل شد؛ بنابراین، نتایج پیش‌بینی شده که توسط مدل پیشنهادی به دست آمد، نتایج خوبی در تطابق نمونه‌های تجربی با خطای قابل قبول ۵ درصد حاصل کرد. این یافته‌ها با نتایج مطالعات قبلی مطابقت داشت (El Sergany et al., 2019; Shashirekha et al., 2011; Cardoso et al., 2021).

شکل ۵ غلظت زیست‌توده را طی ۱۰ روز در غلظت‌های مختلف TDS در محدوده ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ mg/l نشان می‌دهد. طبق شکل حداکثر غلظت زیست‌توده ۱/۸ g/l بود که در غلظت TDS (۲۰۰۰ mg/l) به دست آمد. بنابراین کاهش غلظت بیومس با افزایش TDS به معنی کاهش سرعت رشد در TDS بالا است. مطابق شکل ۵، کاهش در حذف TDS به دلیل کاهش رشد جلبک بود. افزایش غلظت TDS، پایان مرحله رشد را احتمالاً به دلیل افزایش ناگهانی تعداد سلول‌های مرده و تغییر رنگ نمونه مشخص کرد. به عبارت دیگر، رشد ریز جلبک‌ها و مصرف TDS به طور مستقیم به یکدیگر وابسته بودند (Polat et al., 2020; Tejada-Ruiz et al., 2020).

است.

نتیجه گیری کلی

در این تحقیق از ریز جلبک اسپیرولینا ماکزیمما جهت کاهش TDS، pH، و سایر پارامترهای کیفی آب صنعتی استفاده شد. روش‌های مختلف کشت و شرایط محیطی در این مطالعه بررسی شد. نتایج نشان داد که در شرایط کشت در محیط باز (BBD) با استفاده از RSM بر اساس BBD استفاده شد. مشخص شد که TDS و مدت زمان روشنایی - تاریکی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر سرعت رشد داشتند. مقادیر تقریبی بهینه، TDS (۲۰۰ mg/l)، pH (۹/۳۶)، شدت روشنایی ۴۰۱۰ lux و مدت زمان روشنایی - تاریکی ۱۵ ساعت بود. در این شرایط بهینه بازدهی کاهش TDS ۷۶ درصد پیش‌بینی گردید. حداکثر بهره‌وری زیست‌توده *S. maxima* در غلظت TDS (۲۰۰ mg/l) و شرایط بهینه سایر پارامترها، به میزان ۱/۸ g/l بود. در نهایت تعداد مشخصی آزمایش، تحت این شرایط بهینه جهت آزمون عملکرد نهایی کاهش TDS انجام شد و میانگین بازدهی ۷۱ درصد به دست آمد که با خطای قابل قبول ۵ درصد، نشان‌دهنده پیش‌بینی معقول مدل است. نکته حائز اهمیت پژوهش حاضر در مقایسه با سایر مطالعات مشابه این بود که توانستیم از ویژگی منحصر به فرد ریز جلبک اسپیرولینا ماکزیمما که دارای ترکیبات غذایی مؤثر و توانایی تحمل شرایط نامساعد محیطی بود در جهت رسیدن به اهداف پژوهش استفاده کنیم. همچنین توانستیم از شرایط محیطی پساب برای رشد و تولید زیست‌توده استفاده کنیم که خود سبب کاهش TDS پساب و به حداقل رساندن هزینه‌ها شد. به‌طور کلی نتایج این پژوهش بیانگر جذب و مصرف موفقیت‌آمیز املاح محلول و عناصر مغذی در پساب‌های صنعتی با استفاده از روش سبز و دوستدار محیط زیست تصفیه زیستی با استفاده از ریز جلبک *S. maxima* است که می‌تواند مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران این زمینه قرار گیرد.

می‌شوند، جذب زیستی است (Gupta and Rastogi, 2008). به‌طور کلی رشد اکثر میکروارگانیسم‌ها و ریز جلبک‌ها مانند *S. maxima* را می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد که شامل مرحله تأخیر، مرحله ورود به رشد لگاریتمی، مرحله ثابت رشد و در نهایت مرحله مرگ است. مرحله تأخیر مرحله اولیه کشت است که در آن ریز جلبک‌ها با محیط اطراف مانند محیط، pH، دما و نور سازگار می‌شوند (Nagi et al., 2020; Japar et al., 2021). منحنی رشد *S. maxima* استفاده شده در این مطالعه نیز شامل این ۴ مرحله است. سه روز اول کشت آن‌ها شامل مرحله تأخیر است. در واقع در سه روز اول، از آنجا که *S. maxima* وارد محیط کشت جدید می‌شود، ابتدا به زمان نیاز دارند تا با محیط تازه سازگار شود. از طرف دیگر، به دلیل اینکه در روزهای اولیه، محیط پساب حاوی تعداد کمی سلول ریز جلبکی است (فقط شامل سلول‌های تلقیح شده است)، آن‌ها به آرامی رشد می‌کنند و در پایان روز سوم وارد مرحله دوم (مرحله رشد لگاریتمی) می‌شوند. به همین دلیل است که در سه روز اول، غلظت زیست‌توده *S. maxima* تقریباً به سختی تغییر می‌کند. زیرا آن‌ها مانند سایر میکروارگانیسم‌هایی که رشد کمی دارند در مرحله تأخیر خود بوده‌اند. سازگاری جلبک‌ها به شوری بالا ممکن است شامل تنظیم جذب و انتقال یون‌ها از طریق غشای سلولی، و تولید املاح نگهدارنده فشار اسمزی از جمله گلیسرول و پروتئین‌های تنش باشد. اگر Na^+ و Cl^- در واکنش یک سلول جلبک افزایش یابد، K^+ و مواد شیمیایی آلی مانند پرولین و گلیسین در سیتوپلاسم جلبک تجمع می‌کنند تا فشار اسمزی را متعادل کنند (Sahle-Demessie et al., 2019). درصد کاهش TDS در غلظت‌های مختلف TDS در شکل ۶ نشان داده شده است. در شوری ۲۰۰ mg/l، کاهش شوری به میزان ۷۶٪ بود و کاهش شوری برای شوری‌های بالاتر از ۴۰۰ mg/l متوقف شد. این نشان‌دهنده پتانسیل *S. maxima* برای نمک‌زدایی پساب شور

References

- Abreu, A. P., Fernandes, B., Vicente, A. A., Teixeira, J., Dragone, G., 2012. Mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* using industrial dairy waste as organic carbon source. *Bioresource technology* 118, 61-66.
- Castro, G.F.P.D.S.D., Rizzo, R.F., Passos, T.S., Santos, B. N. C. D., Dias, D.D.S., Domingues, J.R., Araújo, K.G.D.L., 2015. Biomass production by *Arthrospira platensis* under different culture conditions. *Food Science and Technology* 35, 18-24.
- Cardoso, L.G., Duarte, J.H., Costa, J.A.V., de Jesus Assis, D., Lemos, P.V.F., Druzian, J.I., Chinalia, F.A., 2021. *Spirulina* sp. as a bioremediation agent for aquaculture wastewater: production of high added value compounds and estimation of theoretical biodiesel. *BioEnergy Research* 14(1), 254-264.
- El Sergany, F.A.G., El Hosseiny, O.M., El Nadi, M.H., 2019. The optimum algae dose in water desalination by algae ponds. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science* 4(2), 152-154.
- Gupta, V.K., Rastogi, A., 2009. Biosorption of hexavalent chromium by raw and acid-treated green alga *Oedogonium hatei* from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials* 163(1), 396-402.
- Gupta, V. K., Rastogi, A., & Nayak, A., 2010. Biosorption of nickel onto treated alga (*Oedogonium hatei*): application of isotherm and kinetic models. *Journal of colloid and interface science* 342(2), 533-539.
- Herrera-León, S., Cruz, C., Negrete, M., Chacana, J., Cisternas, L.A., Kraslawski, A., 2022. Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. *Science of the Total Environment* 818, 151853.
- Han, P., Lu, Q., Zhong, H., Xie, J., Leng, L., Li, J., Zhou, W., 2021. Recycling nutrients from soy sauce wastewater to culture value-added *Spirulina maxima*. *Algal Research* 53, 102157.
- Igwegbe, C.A., Onukwuli, O.D., 2019. Removal of total dissolved solids (TDS) from aquaculture wastewater by coagulation-flocculation process using *Sesamum indicum* extract: effect of operating parameters and coagulation-flocculation kinetics. *Pharmaceutical Chemistry Journal* 6, 32-45.
- Jones, J.A.A., 2014. *Global hydrology: processes, resources and environmental management*. Routledge.
- Japar, A.S., Takriff, M.S., Yasin, N.H.M., 2021. Microalgae acclimatization in industrial wastewater and its effect on growth and primary metabolite composition. *Algal Research* 53, 102163.
- Kalra, R., Gaur, S., Goel, M., 2021. Microalgae bioremediation: A perspective towards wastewater treatment along with industrial carotenoids production. *Journal of Water Process Engineering* 40, 101794.
- Lafarga, T., Fernández-Sevilla, J.M., González-López, C., Ación-Fernández, F.G., 2020. *Spirulina* for the food and functional food industries. *Food Research International* 137, 109356.
- Lucakova, S., Branyikova, I., Branyik, T., Matoulkova, D., Krausova, G., 2022. Wastewater from the demineralization of cheese whey for cost-efficient cultivation of *spirulina*. *Journal of Applied Phycology* 34(1), 89-99.
- Mirhosseini, N., Davarnejad, R., Hallajisani, A., Cano-Europa, E., Tavakoli, O., Franco-Colín, M., Blas-Valdivia, V., 2021. Cultivations of *Arthrospira maxima* (*Spirulina*) using ammonium sulfate and sodium nitrate as an alternative nitrogen sources. *Iranian Journal of Fisheries Sciences* 20(2), 475-489.
- Mata, S.N., de Souza Santos, T., Cardoso, L.G., Andrade, B.B., Duarte, J.H., Costa, J.A.V., Druzian, J.I., 2020. *Spirulina* sp. LEB 18 cultivation in a raceway-type bioreactor using wastewater from desalination process: Production of carbohydrate-rich biomass. *Bioresource Technology* 311, 123495.
- Anjos, M., Fernandes, B.D., Vicente, A.A., Teixeira, J.A., Dragone, G., 2013. Optimization of CO₂ bio-mitigation by *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology* 139, 149-154.
- Mutale-joan, C., Rachidi, F., Mohamed, H. A., Mernissi, N.E., Aasfar, A., Barakate, M., Arroussi, H.E., 2021. Microalgae-cyanobacteria-based biostimulant effect on salinity tolerance mechanisms, nutrient

- uptake, and tomato plant growth under salt stress. *Journal of Applied Phycology* 33(6), 3779-3795.
- Polat, E., Yüksel, E., Altınbaş, M., 2020. Mutual effect of sodium and magnesium on the cultivation of microalgae *Auxenochlorella protothecoides*. *Biomass and Bioenergy* 132, 105441.
- Porika, M., Ranjit, P., Tippani, R., Reddy, K.V., 2021. Advances in the Bioremediation of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs): Polluted Water and Soil. In *Microbial Products for Health, Environment and Agriculture* 12, 323-358.
- Singh, T. S., Rajak, U., Samuel, O.D., Chaurasiya, P.K., Natarajan, K., Verma, T.N., Nashine, P., 2021. Optimization of performance and emission parameters of direct injection diesel engine fuelled with microalgae *Spirulina* (L.)—Response surface methodology and full factorial method approach. *Fuel* 285, 119103.
- Soni, R. A., Sudhakar, K., Rana, R.S., 2017. *Spirulina*—From growth to nutritional product: A review. *Trends in food science & technology* 69, 157-171.
- Soni, R. A., Sudhakar, K., Rana, R.S., 2019. Comparative study on the growth performance of *Spirulina platensis* on modifying culture media. *Energy Reports* 5, 327-336.
- Sahle-Demessie, E., Hassan, A.A., El Badawy, A., 2019. Bio-desalination of brackish and seawater using halophytic algae. *Desalination* 465, 104-113.
- Tian, H., Hui, M., Pan, P., Huang, J., Chen, L., Zhao, J., 2021. Performance and microbial ecology of biofilms adhering on aerated membrane with distinctive conditions for the treatment of domestic sewage. *Environmental Technology* 42(3), 459-467.
- Tejada-Ruiz, S., Gonzalez-Lopez, C., Rojas, E., Jiménez-Becker, S., 2020. Effect of the foliar application of microalgae hydrolysate (*Arthrospira platensis*) and silicon on the growth of *Pelargonium hortorum* LH Bailey under salinity conditions. *Agronomy* 10(11), 1713.
- Volkman, H., Imianovsky, U., Furlong, E.B., Oliveira, J.L.B., Sant'Anna, E.S., 2007. Influence of desalinator wastewater for the cultivation of *Arthrospira platensis*. Fatty acids profile.
- Volkman, H., Imianovsky, U., Oliveira, J.L., Sant'Anna, E.S., 2008. Cultivation of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* in desalinator wastewater and salinated synthetic medium: protein content and amino-acid profile. *Brazilian Journal of Microbiology* 39, 98-101.
- Wei, J., Gao, L., Shen, G., Yang, X., Li, M., 2020. The role of adsorption in microalgae biological desalination: salt removal from brackish water using *Scenedesmus obliquus*. *Desalination* 493, 114616.
- White, D.A., Pagarette, A., Rooks, P., Ali, S.T., 2013. The effect of sodium bicarbonate supplementation on growth and biochemical composition of marine microalgae cultures. *Journal of Applied Phycology* 25(1), 153-165.
- Yang, C., Wei, D., Zhuang, F.Y., 2008. The force induced by organelles' weight in the microfilament is in the range of 0.1–1 pN. *Acta Astronautica* 63(7-10), 923-928.
- Zhou, W., Li, Y., Gao, Y., Zhao, H., 2017. Nutrients removal and recovery from saline wastewater by *Spirulina platensis*. *Bioresource Technology* 245, 10-17.
- Zafar, A.M., Javed, M.A., Hassan, A.A., 2022. Unprecedented biodesalination rates—Shortcomings of electrical conductivity measurements in determining salt removal by algae and cyanobacteria. *Journal of Environmental Management* 302, 113947.