

Investigation of pH Effect on Optical Membrane Bioreactor Performance in Biomass Growth and Nutrient Removal from Municipal Wastewater

E. Movahed¹, K. Saeb², F. Pajoum Shariati³, A. Rahnavard⁴

1. PhD. Student, Dept. of Environment, Faculty of Environment, Tonekabon Branch, Islamic Azad University, Tonekabon, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Environment, Faculty of Environment, Tonekabon Branch, Islamic Azad University, Tonekabon, Iran
(Corresponding Author) keivansaeb@gmail.com
3. Assist. Prof., Dept. of Chemical Engineering, Faculty of Petroleum and Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4. Assist. Prof., Dept. of Environment, Faculty of Environment, Tonekabon Branch, Islamic Azad University, Tonekabon, Iran

(Received Dec. 5, 2021 Accepted March 7, 2022)

To cite this article:

Movahed, E., Saeb, K., Pajoum Shariati, F., Rahnavard, A. 2022. "Investigation of pH effect on optical membrane bioreactor performance in biomass growth and nutrient removal from municipal wastewater" Journal of Water and Wastewater, 33(2), 107-118. Doi: 10.22093/wwj.2021.318376.3204. (In Persian)

Abstract

Municipal wastewater treatment and algal biomass production are simultaneously new and efficient methods in the treatment industry. Using artificial culture medium, urban wastewater is used as a food source for microalgae. Cultivation of microalgae in wastewater is an important step in wastewater treatment that, in addition to wastewater treatment, simultaneous production of biomass is done which can be used for many purposes and is of great value. Method: in the present study, the effect of initial pH on the performance of membrane photobioreactor in biomass growth and nutrient removal from municipal wastewater was investigated. In this study, first *Chlorella vulgaris* microalgae in a membrane optical bioreactor with a light intensity of $300 \mu\text{mol photons m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in the 24-hour light cycle and an initial concentration of 1 g/L dry weight of microalgae in the initial three pH (4, 7 and 10) were cultivated. Then, due to the direct relationship between microalgae growth and nutrient removal, the best initial pH in nitrate and phosphate removal from municipal wastewater was investigated. According to the results, microalgae were adapted to municipal effluent after 9 days and at the initial pH of 7, the highest growth rate of microalgae equal to 2.37 g dry weight per liter, and removal of nitrate and



phosphate were 88 and 87%, respectively. Also, on the 15th day at the same initial pH, the highest amount of nitrate and phosphate removal from municipal effluent was 92% and 91%, respectively. The results show that the regulation of the initial pH of microalgae can have an undeniable effect on the growth of microalgae. It also has a significant effect on the removal of nitrate and phosphate from municipal wastewater through the cultivation of microalgae. By optimizing the initial pH, this removal percentage has increased.

Keywords: Microalgae, Municipal Wastewater, Membrane Photobioreactor, pH, Nitrate and Phosphate.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۳، شماره ۲، صفحه: ۱۱۸-۱۰۷

بررسی تأثیر pH بر عملکرد زیست راکتور غشایی نوری در رشد زیست توده و حذف مواد مغذی از پساب شهری

الهام موحد^۱، کیوان صائب^۲، فرشید پژوم شریعتی^۳، آبتین راهنورد^۴

۱- دانشجوی دکترا، گروه محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست،

واحد تنکابن، دانشگاه آزاد اسلامی، تنکابن، ایران

۲- دانشیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست،

واحد تنکابن، دانشگاه آزاد اسلامی، تنکابن، ایران

keivansaeb@gmail.com (نویسنده مسئول)

۳- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی،

واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- استادیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست،

واحد تنکابن، دانشگاه آزاد اسلامی، تنکابن، ایران

(دریافت ۱۴۰۰/۹/۱۴ پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۱۶)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

موحد، ا.، صائب، ک.، پژوم شریعتی، ف.، راهنورد، آ.، ۱۴۰۱، "بررسی تأثیر pH بر عملکرد زیست راکتور غشایی نوری در رشد زیست توده و حذف مواد مغذی از پساب شهری" مجله آب و فاضلاب، ۳۳(۲)، ۱۱۸-۱۰۷. Doi: 10.22093/wwj.2021.318376.3204

چکیده

تصفیه پساب شهری و تولید، به طور هم‌زمان یک روش نوین و کارآمد در صنعت تصفیه است، با به‌کارگیری محیط کشت مصنوعی، پساب شهری به‌عنوان منبع غذایی ریزجلبک به‌کار می‌رود. کشت ریزجلبک در پساب، مرحله‌ای بااهمیت در تصفیه فاضلاب محسوب می‌شود که افزون بر تصفیه پساب، تولید هم‌زمان زیست‌توده نیز انجام می‌شود که می‌تواند برای مصارف متعدد به‌کار رود و ارزش زیادی دارد. در این پژوهش تأثیر pH اولیه بر عملکرد زیست راکتور غشایی نوری در رشد زیست‌توده و حذف مواد مغذی از پساب شهری بررسی شد. در این پژوهش ابتدا ریزجلبک کلرلا ولگاریس در یک زیست راکتور نوری غشایی با شدت نور ۳۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع در ثانیه در سیکل نوری ۲۴ ساعت روشنایی و غلظت اولیه ۱ گرم در لیتر وزن خشک ریزجلبک در سه pH اولیه ۴، ۷ و ۱۰ کشت داده شد. سپس با توجه به رابطه مستقیم رشد ریزجلبک و حذف مواد مغذی بهترین pH اولیه در حذف نیترات و فسفات از پساب شهری بررسی شد. با توجه به نتایج، ریزجلبک پس از ۹ روز با پساب شهری سازگار شده و در pH اولیه برابر ۷ بیشترین نرخ رشد ریزجلبک برابر با ۲/۳۷ گرم وزن خشک در لیتر و حذف نیترات و فسفات به ترتیب ۸۸ و ۸۷ درصد به‌دست آمد و همچنین در روز پانزدهم در همان pH اولیه بیشترین مقدار حذف نیترات و فسفات از پساب شهری به ترتیب ۹۲ و ۹۱ درصد به‌دست آمد. نتایج نشان داد که تنظیم pH اولیه ریزجلبکی می‌تواند تأثیر انکارناپذیری بر رشد ریزجلبک‌ها داشته باشد و همچنین تأثیر قابل‌توجهی در حذف نیترات و فسفات از پساب شهری از طریق کشت ریزجلبک‌ها داشته باشد که با بهینه کردن pH اولیه این درصد حذف افزایش پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی: ریزجلبک، پساب شهری، زیست راکتور غشایی نوری، pH، نیترات و فسفات



۱- مقدمه

ورود یون‌های نیترات و فسفات به محیط‌های آبی می‌تواند منجر به غنی شدن و بروز پدیده پر غذایی (یوتروفیکاسیون^۱) محیط آبی شود. این غنی شدن، موجب تأثیر روی ساختار و عملکرد اکوسیستم و در نتیجه بهم خوردن پایداری، تنوع زیستی و تعادل اکوسیستم می‌شود (Gürevin et al., 2017).

از سوی دیگر غلظت بیش از حد مجاز نیترات در محیط‌های آبی به‌ویژه آب آشامیدنی، اثرات منفی کوتاه و بلندمدت بر انسان دارد (Ward et al., 2018)، به‌همین دلیل کنترل مقدار این مواد مغذی در منابع آبی، اهمیت زیادی دارد.

روش‌های بسیاری برای تصفیه فاضلاب از انواع مواد تشکیل‌دهنده آن وجود دارد. بیشتر فاضلاب‌ها در مقیاس صنعتی، در فاضلاب تصفیه می‌شوند که شامل مراحل تصفیه فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند. با توجه به کاربرد و هزینه‌بر بودن سیستم‌های فیزیکی و شیمیایی در مقایسه با روش‌های بیولوژیکی و همچنین نگهداری بسیار مشکل از آنها، استفاده از روش‌های بیولوژیکی در فرایند نیتروژن و فسفرزدایی ترجیح داده می‌شود (Hoffmann, 1998, Kesaano and Sims, 2014).

راکتورهای غشایی زیستی^۲ شامل یک راکتور بیولوژیکی با زیست‌توده معلق و یک جداکننده جامد با فیلترهای غشایی از نوع میکروفیلتراسیون^۳ و اولترافیلتراسیون^۴ است که به اختصار زیست راکتور غشایی نامیده می‌شود. این سیستم زیست راکتورها ممکن است با رشد هوازای یا بی‌هوازی معلق برای تصفیه از زیست‌توده‌های فعال استفاده شوند. هدف از چنین سیستم‌هایی برای ترکیب یک راکتور و سیستم فیلتراسیون است که در یک مجموعه فرایندی واحد برای تصفیه فاضلاب ایجاد شوند (Bornare et al., 2014).

در این سیستم‌ها، فیلتراسیون غشایی جایگزین فرایندهای ته‌نشینی، فیلترشنی و گندزدایی به‌کار رفته در روش‌های مرسوم لجن فعال شده است. این سیستم‌ها به‌طور گسترده، آزمایش شده‌اند و نتایج گویای مؤثر بودن آنها در حذف آلاینده‌های آلی و معدنی بوده است. سهولت کنترل فعالیت‌های بیولوژیکی، پساب خروجی با کیفیت زیاد و عاری از باکتری و پاتوژن‌ها، نیاز به فضای کم و

با توجه به کمبود منابع آب و لزوم استفاده مجدد از آب‌های غیرمتعارف، بهره‌گیری بهینه و مطلوب از پساب فاضلاب شهری یکی از مباحث مهم پژوهش‌ها است. استفاده مجدد از فاضلاب شهری تصفیه شده و فرستادن آن در شبکه شهری به‌خصوص برای آبیاری فضای سبز و مصارف صنعتی در کشورهایی که با کمبود منابع آب همراه هستند رو به افزایش است (Hashemi et al., 2019, Valdes Ramos et al., 2020a).

فاضلاب شهری، آب مصرف شده به‌همراه مقدار مواد ناخالص و آلودگی است که از دست‌شویی، حمام، ماشین لباس‌شویی، ظرف‌شویی منازل، رستوران‌ها، هتل‌ها، مراکز تجاری، مراکز درمانی، زندان‌ها، آب‌های سطحی و باران تولید می‌شود. در موارد بیان شده نزدیک به ۸۰ درصد آب مصرف شده تبدیل به فاضلاب می‌شود. از کل فاضلاب نیز ۹۹/۹ درصد آن شامل آب است و تنها ۰/۱ درصد از فاضلاب را ناخالصی‌های جامد تشکیل می‌دهد اما همین درصد کوچک قدرت آلودگی بسیار زیادی دارد (Jetten et al., 1997).

از میان آلاینده‌های مختلف موجود در پساب‌های شهری و کشاورزی، حذف آلاینده‌های نیتروژن و فسفر به دلیل اثرات سوئی که بر محیط‌زیست بر جای می‌گذارد، اهمیت قابل‌ملاحظه‌ای دارد (Rashed, 2013).

نیتروژن آلی، متشکل از مقدار نیتروژن موجود در ترکیبات آلی مانند پروتئین‌ها، اوره و مواد ناشی از تجزیه باکتریایی است. نیتروژن موجود مانند یون آمونیم و یون نیترات در فاضلاب شهری ظاهر می‌شوند. فسفر آلی از میزان فسفر موجود در ترکیباتی مانند پروتئین‌ها و محصولات جانبی تجزیه شده تشکیل شده است. فسفر غیر آلی نیز از تجزیه باکتریایی فسفر آلی تشکیل می‌شود (Griffiths et al., 2020).

فاضلاب شهری معمولاً حاوی ۵ تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر فسفر کل است که از این مقدار، ۱ تا ۵ میلی‌گرم در لیتر فسفر آلی است. سهم افراد در تولید فسفر رو به افزایش است. سهم تولید فسفر توسط افراد در روز، متغیر و در حدود ۰/۶۵ تا ۴/۸ گرم به‌ازای هر نفر است (Parsons and Smith, 2008).

¹ Eutrophication
² Membrane Bioreactor
³ Microfiltration
⁴ Ultrafiltration



فاضلاب شهری و انتخاب پارامترهای مناسب نوری بیان شده است. در پژوهشی با نوآوری در یک سیستم زیست راکتور غشایی نوری و با کشت گونه کلرولا ولگاریس در یک دوره کشت مقدار نیترا و فسفات را به ترتیب ۸۷/۷ و ۷۶/۷ درصد کاهش دادند (Gao et al., 2016).

در پژوهش عزیز و همکاران، تغییرات نوری اعم از سیکل تاریکی-روشنایی و شدت نوری در رشد ریزجلبک، بررسی شد و با شدت نوری ۳۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع در ثانیه و سیکل نوری صفر تا ۲۴ ساعت روشنایی بهترین نتیجه رشد زیست توده و حذف مواد مغذی در ریزجلبک کلرلا ولگاریس را اعلام کردند (Azizi et al., 2021a).

چن و همکاران با استفاده از خروجی فاضلاب هضم شده بی‌هوازی به عنوان محیط کشت و با استفاده از گونه کلرلا ولگاریس آمونیاک و فسفات را به ترتیب ۴۳/۹ و ۶۴/۹ درصد کاهش و مقدار پروتئین در ریزجلبک را ۴۵/۶ درصد افزایش دادند (Chen et al., 2018).

کرامتی و همکاران در پژوهشی به بررسی تصفیه کارخانه آب پنییر پرداختند. در این پژوهش با استفاده از گونه کلرلا ولگاریس و مقایسه شدت نور چشمک‌زن در یک دوره کشت به حذف نیترا و فسفات به ترتیب به ۹۷ و ۷۰ درصد دست پیدا کردند (Keramati et al., 2021).

همچنین لنگ و همکاران در مطالعه مروری به بررسی پتانسیل استفاده از تکنولوژی و قابلیت ریزجلبک‌ها در حذف آنتی‌بیوتیک‌ها از فاضلاب پرداخته‌اند و مکانیسم‌های زیستی این روش تصفیه را بررسی کرده‌اند (Leng et al., 2020).

در این پژوهش با توجه به وجود مقدار زیاد نیترا و فسفات در پساب خروجی از فاضلاب شهری و استفاده از محیط کشت ارزان‌قیمت از مزیت ریزجلبک به عنوان مصرف‌کننده مواد مغذی درون زیست راکتور غشایی استفاده شد و تأثیر pH اولیه (۴، ۷ و ۱۰) در رشد زیست توده و حذف نیترا و فسفات از پساب فاضلاب شهری بررسی شد.

۲- مواد و روش کار

در این کار پژوهشی در یک دوره ۱۵ روزه کشت گونه کلرلا ولگاریس در سیکل نوری روشنایی ۲۴ ساعته و غلظت اولیه ۱ گرم

تحمیل نرخ بارگذاری زیاد از جمله مزایای راکتورهای غشایی هستند (Bolzonella et al., 2010).

کارایی حذف نیترا در سیستم‌های معمول لجن فعال و همچنین زیست راکتورهای غشایی بین ۲۰ تا ۷۰ درصد گزارش شده است.

ریزجلبک‌ها به دلیل توانایی بالا در مصرف مواد مغذی مانند نیترا و فسفات، گزینه مناسبی برای استفاده در سیستم‌های تصفیه پساب هستند، همچنین به دلیل داشتن پروتئین، مواد معدنی، ویتامین و اسیدهای چرب امگا ۳، امروزه بهره‌برداری از آنها در ابعاد صنعتی، کشاورزی، دارویی و غذایی بسیار گسترش یافته و تکنولوژی‌های مدرن برای تولید و بهره‌برداری از آنها در کشورهای صنعتی و پیشرفته جهان، استفاده می‌شود (Azizi et al., 2021b, Luo et al., 2017).

مهمترین مزایای ریزجلبک‌ها برای تصفیه پساب عدم ایجاد خطرات محیط‌زیستی با تکیه بر اصول اکوسیستم‌های طبیعی، فناوری ساده، کارایی بالا، عدم ایجاد آلودگی ثانویه در صورت استفاده از توده زیستی تولیدی و توانایی ریزجلبک‌ها در بازچرخش مؤثر مواد مغذی (نیتروژن، فسفر و سایر آلاینده‌ها) موجود در پساب ثانویه اشاره کرد (Molinuevo-Salces et al., 2019).

تصفیه فاضلاب توسط ریزجلبک نیازمند رشد زیاد ریزجلبک است و دانستن فاکتورهایی که بر روی رشد جلبک‌ها تأثیر دارند، مهم است. نرخ رشد ریزجلبک‌ها وابسته به عوامل بهینه برای کشت ریزجلبک‌ها است که شامل دما، شوری، مواد مغذی، شدت نوردهی، دوره نوری و pH هستند (Hashemi et al., 2020b).

pH یکی از مهم‌ترین عوامل برای رشد میکروجلبک است، بازه pH برای اغلب محیط‌های کشت بین ۷ تا ۹ است که بازه بهینه آن ۸/۲ تا ۸/۷ است. با رشد جلبک pH افزایش می‌یابد. مقدار pH بیش از ۱۰ وقتی دی‌اکسید کربن تزریق نمی‌شود غیرمعمول نیست. جذب یون نیترا منجر به افزایش pH می‌شود، اما اگر آمونیاک به عنوان منبع نیتروژن استفاده شود، pH محیط کشت ممکن است به مقدار ۳ نیز کاهش یابد که برای محیط رشد بسیار اسیدی است (Luo et al., 2017).

با توجه به نتایج منتشر شده در پژوهش‌های گذشته توانایی ریزجلبک کلرلا ولگاریس در زیست راکتور غشایی نوری به منظور حذف نیترا و فسفات و سازگاری این گونه در پساب خروجی، از



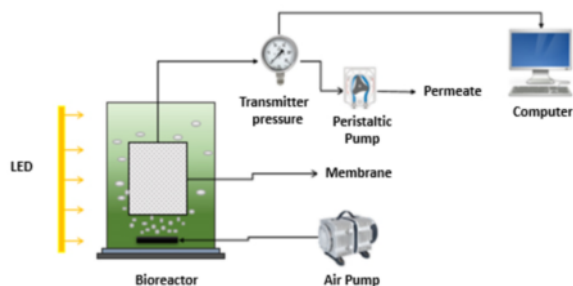


Fig. 1. Schematic of a membrane optical bioreactor containing microalgae

شکل ۱- شماتیک زیست راکتور نوری غشایی حاوی ریز جلبک

با شدت ۳۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع در ثانیه در فاصله ۲۰ سانتی متری از زیست راکتور قرار گرفت.

۲-۳- تهیه پساب

پساب خروجی از فاضلاب شهری سنتزی استفاده شده در این پژوهش با توجه به میزان مواد مغذی استخراج شده از جدول ۱ موجود در خروجی فاضلاب تصفیه شده از زیست راکتور غشایی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تهران تهیه شد. غلظت نیترات، فسفات در این فاضلاب شهری به ترتیب ۳۴ و ۸ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد و به منظور تهیه پساب موردنظر به میزان ۰/۰۴۶ گرم سدیم نیترات و ۰/۰۱۴ گرم دی‌پتاسیم فسفات به‌ازای هر لیتر آب مقطر افزوده شد.

۲-۴- روش‌های آنالیز

اندازه‌گیری وزن خشک سلولی (گرم در لیتر) از طریق سانتریفیوژ ۱۰ میلی‌لیتر ریزجلبک به مدت ۳۰ دقیقه و با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شد و پس از آن در آن در دمای ۱۰۵ درجه به مدت ۴۰ دقیقه خشک شد و سپس به وسیله ترازو وزن خشک محاسبه شد (Wef, 2005). آنالیز pH در هر یک روز در میان یک نمونه‌گیری از شیر نمونه‌گیری انجام شد. به این منظور از یک پروب pH سنج (Metrohm 827, swiss) استفاده شد. هر بار پروب pH سنج حدود ۱ دقیقه داخل محلول جلبک قرار گرفت و پس از تثبیت، عدد گزارش شد. (Wef, 2005). نیترات و فسفات نیز با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری نوری توسط دستگاه اسپکتروفتومتر HACH(DR5000) در فواصل زمانی ۲ روز به دست آمد. لازم به ذکر است که روش اندازه‌گیری نیترات و فسفات از کتاب روش‌های

وزن خشک ریزجلبک در لیتر و در دمای محیط 25 ± 2 درجه سلسیوس در سه pH اولیه مختلف ۷، ۴ و ۱۰ در زیست راکتور نوری غشایی ناپیوسته به منظور بررسی رشد زیست توده در محیط کشت پساب خروجی از فاضلاب شهری و هم‌زمان حذف نیترات و فسفات از پساب فاضلاب شهری به روش تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج رشد و حذف نیترات و فسفات هر یک روز در میان به مدت ۱۵ روز اندازه‌گیری شد و تمامی آزمایش‌ها ۳ مرتبه تکرار شد (pH اولیه به وسیله NaOH و HCl تنظیم شد).

۲-۱- گونه ریزجلبک

در این پژوهش از گونه کلرلا ولگاریس تهیه شده از بانک جلبکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران استفاده شد.

۲-۲- زیست راکتور نوری غشایی

سیستم موجود که در شکل ۱ نشان داده شده است، به حجم ۵ لیتر شامل یک محفظه به طول ۱۴، عرض ۶ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بود.

چرخش مایع توسط توزیع‌کننده هوا انجام شد. روی بدنه ۳ شیر با قطر ۱/۲ اینچ برای نمونه‌گیری ریزجلبک و به منظور بررسی پارامترهای مختلف در محلول تعبیه شد. این سیستم از پلکسی گلس به ضخامت ۸ میلی‌متر ساخته شد. غشای صفحه تخت میکروفیلتراسیون با سایز منافذ ۰/۴ میکرومتر از جنس پلی‌اتیلن ترفتالات به طول ۲۵ سانتی‌متر در عرض ۱۳/۵ سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر در داخل محفظه‌ای متحرک از جنس پلکسی گلس تیره قرار گرفت. برای سیستم هوادهی با فاصله ۵ سانتی‌متر در قسمت پایین غشا استفاده شد. سیستم هوادهی، ثابت و با قطر منافذ ۱ میلی‌متر بود. در این سیستم محدوده فلاکس جریان روی سطح غشا ۱۶ تا ۲۲ لیتر بر مترمربع بر ساعت و زمان ماند هیدرولیکی ۲۴ ساعت و زمان ماند جامد ۱۵ روز بود که با توجه به نوع غشا قابل کنترل بود.

برای کنترل گرفتگی به وسیله فشارسنج، اختلاف فشار دوسر غشا اندازه‌گیری شد و با پمپ پرستالتیک مقدار دبی موردنظر از داخل غشا تنظیم شد. در این سیستم از لامپ LED استفاده شد که



جدول ۱- نتایج سنجش پساب خروجی از فاضلاب شهری شهر تهران

Table 1. Results of measuring effluent from municipal wastewater in Tehran

Total suspended solids(TSS)	Chemical oxygen demand (COD)	Biological oxygen demand (BOD)	Phosphate (PO ₄ ⁻³)	Nitrate (NO ₃)	Turbidity NTU	pH
11.6 (mg/L)	40 (mg/L)	14 (mg/L)	8 (mg/L)	34 (mg/L)	14.7	7.15

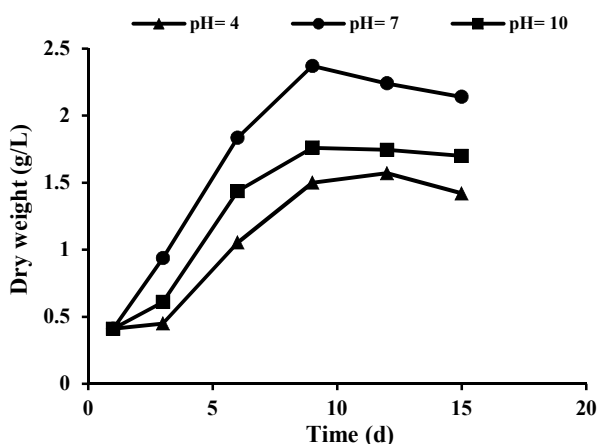


Fig. 2. Dry weight changes of Chlorella vulgaris at different pH

شکل ۲- تغییرات وزن خشک کلرلا ولگاریس در pH مختلف

مغذی ضروری را تعیین می‌کند و همچنین می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر متابولیسم جلبک داشته باشد (Juneja et al., 2013).

فعالیت‌های فتوسنتزی ریزجلبک‌ها می‌تواند منجر به افزایش قابل‌توجه pH شود (Yoo et al., 2015). pH مطلوب برای کشت ریزجلبک‌ها به نوع گونه بستگی دارد.

در پژوهشی دیگر بیشترین بهره‌وری از کلرلا ولگاریس در زیست راکتور نوری تشکیل شده با فاضلاب لبنیات در محدوده pH معادل ۳، ۵، ۶ و ۷ به دست آمد که مانند نتایج بهینه این پژوهش در pH معادل ۷ در رشد و حذف مواد مغذی از پساب شهری است (Hu et al., 2008).

به‌طور مشابه، بهره‌وری گونه دیگر در pH های مختلف در زیست راکتور نوری متفاوت بود و با بهره‌وری مطلوب ۰/۹۷ گرم در لیتر در pH معادل ۸ بیشترین بهره‌وری مشاهده شد (Posadas et al., 2015). در طول تصفیه فاضلاب به کمک ریزجلبک، pH را می‌توان با افزودن CO₂ به سیستم‌ها تنظیم کرد (Arbib et al.,

استاندارد آب و فاضلاب (روش ۱-۳۵۲ برای نیترات و روش ۳-۳۵۲ برای فسفات) اقتباس شد (Wef, 2005).

۳- نتایج و بحث

زیست راکتور غشایی نوری به‌عنوان یک محفظه کشت و رشد ریزجلبک به‌وسیله نور و مواد آلی و معدنی موجود در پساب است که به‌وسیله غشای محیط آلوده حاوی پساب و ریزجلبک را از محیط آبی تصفیه شده جدا می‌کند. همچنین هوای ورودی به سیستم باعث اختلاط و تماس ریزجلبک با مواد مغذی شده و باعث پیوند یونی سلول‌های ریزجلبک با یون‌های موجود در محلول می‌شود (Luo et al., 2017).

در پژوهشی مقایسه بین زیست راکتور غشایی نوری و زیست راکتور نوری بدون غشا نشان داد که زیست راکتور غشایی نوری بدون غشا pH کمتری نسبت به زیست راکتور نوری همراه با غشا داشت. در این پژوهش پیشنهاد شد که زیست راکتور غشایی نوری برای رشد ریزجلبک مفیدتر است (Munoz and Guieysse, 2006).

۳-۱- رشد ریزجلبک

با توجه به شکل ۲ تغییرات وزن خشک ریزجلبک برحسب تغییرات روز مشاهده شد که در روز نهم pH اولیه ۷ و ۱۰ بیشترین وزن خشک ریزجلبک را به ترتیب با مقدار ۲/۳۷ و ۱/۷۶ گرم در لیتر به خود اختصاص داد و pH اولیه ۴ در روز دوازدهم به مقدار ۱/۵۷ گرم بر لیتر رسید. همچنین روند تغییرات وزن خشک در pH اولیه ۷ سیر صعودی تری به ترتیب نسبت pH اولیه ۱۰ و pH اولیه ۴ را نشان داد.

در طول عملیات زیست راکتور غشایی نوری، pH یک پارامتر کلیدی و قابل کنترل برای رشد زیست‌توده ریزجلبکی است (Yoo et al., 2015). زیرا حلالیت و در دسترس بودن CO₂ و مواد



(2013)

به‌عنوان مثال، هنگام پرورش *Desmodesmus sp.* در زیست راکتور نوری، pH در کشت‌های هوادهی شده با CO₂ بسیار کمتر در مقایسه با هوادهی با هوا بوده است (Huang et al., 2012). علاوه بر CO₂، اسید استیک نیز می‌تواند برای تغییر pH استفاده شود. به‌عنوان مثال، در *Chlorella zofingiensis* هنگامی که اسید استیک برای تنظیم pH استفاده شد، مقدار چربی به میزان قابل توجهی افزایش یافت (Huo et al., 2012). همچنین مشخص شد که افزودن اسید استیک منجر به کاهش کارایی حذف مواد مغذی نیترات و فسفات به ترتیب ۷۹٫۶ و ۴۲ درصد در مقایسه با زمانی که CO₂ در سیستم اضافه می‌شود، درصد حذف نیترات و فسفات به ترتیب به ۹۷/۵ و ۵۱/۷ افزایش یافت، زیرا CO₂ در دسترس بودن منبع کربن را برای ریزجلبک‌ها افزایش می‌دهد (Huo et al., 2012).

۳-۲- حذف نیترات در pHهای اولیه متفاوت

شکل ۳ تغییرات نیترات برحسب تغییرات زمان در یک دوره ۱۵ روز کشت در سه pH اولیه متفاوت ۴، ۷ و ۱۰ برای انتخاب بهینه‌ترین pHهای اولیه در این آزمایش در حذف نیترات و فسفات موجود در پساب فاضلاب شهری سنتزی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده شد، pH معادل ۷ بیشترین مقدار کاهش از نیترات ۳۴ میلی‌گرم در لیتر به ۲/۵۴ میلی‌گرم بر لیتر را داشت.

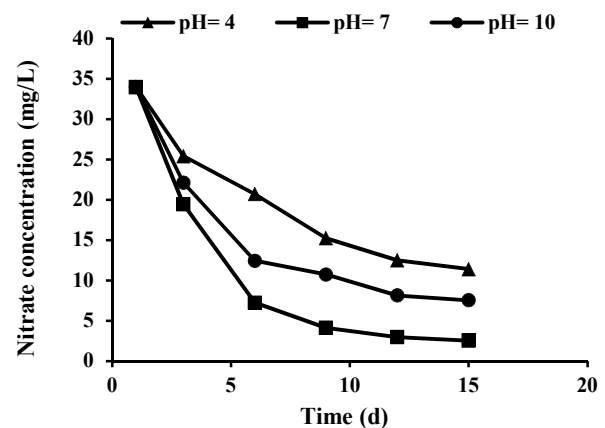


Fig. 3. Nitrate change curve at different pHs in municipal wastewater effluent over time

شکل ۳- منحنی تغییرات نیترات در pHهای متفاوت در پساب فاضلاب شهری برحسب زمان

در تمام pHهای اولیه تا روز نهم با کاهش مقدار نیترات همراه بود و این زمان به دلیل سازگاری ریزجلبک با پساب خروجی از فاضلاب بوده است و در روز نهم در pH اولیه ۸۸٫۷ درصد در نیترات، حذف داشت و سپس تا روز پانزدهم روند کاهش، شیب کندتری به خود گرفت و بیشترین مقدار حذف نیترات معادل ۹۲ درصد در pH اولیه ۷ به دست آمد.

۳-۳- حذف فسفات در pHهای اولیه متفاوت

شکل ۳ نشان‌دهنده تغییرات فسفات در سه pH اولیه متفاوت ۴، ۷ و ۱۰ ریزجلبک در سیکل روشنایی ۲۴ ساعته و غلظت اولیه زیست‌توده ریزجلبک ۱ گرم در لیتر در پساب فاضلاب شهری برحسب تغییرات زمان است. همان طور که مشاهده شد، pH معادل ۷ بیشترین مقدار کاهش از فسفات ۸ میلی‌گرم در لیتر به ۰/۷ میلی‌گرم در لیتر را داشت و در تمام pHهای اولیه متفاوت تا روز پانزدهم با کاهش مقدار فسفات همراه بود، تا در روز نهم در pH اولیه ۸۷٫۷ درصد در فسفات، حذف داشت و سپس تا روز پانزدهم روند کاهش، شیب کندتری به خود گرفت و بیشترین مقدار حذف فسفات معادل ۹۱ درصد در pH اولیه ۷ به دست آمد.

در این پژوهش با مقایسه روند تغییرات در شکل ۲ (وزن خشک) و شکل ۳ و ۴ (تغییرات نیترات و فسفات) مشاهده شد با افزایش وزن خشک ریزجلبک در سه pH اولیه متفاوت با کاهش مقدار نیترات و فسفات پساب

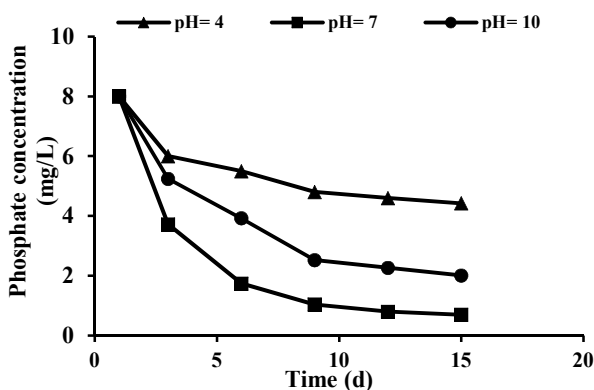


Fig. 4. Phosphate changes curves at different pHs in municipal wastewater effluents over time

شکل ۴- منحنی تغییرات فسفات در pHهای متفاوت در پساب فاضلاب شهری برحسب زمان



را افزایش می‌دهد و باعث کاهش مصرف مواد مغذی می‌شود. در این پژوهش نیز در pH معادل ۱۰ در محیط قلیایی با کاهش رشد و حذف مواد مغذی همراه بود (Hu et al., 2008). مشابه pH قلیایی، شرایط اسیدی می‌تواند جذب مواد مغذی را تغییر داده یا سمیت فلزی ایجاد کند (Markou et al., 2014)، در نتیجه بر رشد جلبک تأثیر می‌گذارد.

در این پژوهش pH معادل ۴ در محیط اسیدی نتایج مناسبی را در رشد زیست‌توده و حذف مواد مغذی نشان نداد. همان طور که قبلاً گفته شد، بیشتر گونه‌های جلبک حداکثر در pH خنثی (۷ تا ۷/۶) رشد می‌کنند. این مورد در پژوهش‌ها بر روی گونه‌های *Ceratium lineatum*، *Heterocapsa triquetra* و *Prorocentrum minimum* و *Chlamydomonas applanata* مشاهده شده است (Markou et al., 2014).

در پژوهشی رشد *Chlamydomonas applanata* در محدوده pH معادل ۱/۴ تا ۸/۴ بررسی شد. هیچ‌گونه رشدی از pH ۱/۴ تا ۳/۴ مشاهده نشد، اما در pH بالاتر رشد در گونه *C. applanata* مشاهده شد و رشد تا ۵ روز در pH معادل ۵/۴ تا ۸/۴ بررسی شد و حداکثر رشد در pH برابر ۷/۴ به دست آمد (Hu et al., 2008).

در پژوهشی دیگر تأثیر pH خارجی بر روی فتوسنتز *Coccochloris peniocyctis* بررسی شد و کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در میزان تکامل کربن و اکسیژن تجمع یافته در pH معادل ۵ و ۶ مشاهده شد که نشان داد در این pH، فتوسنتز در سیانوباکتری‌ها (جلبک سبز-آبی) کاهش می‌یابد (Juneja et al., 2013).

انرژی موردنیاز برای حفظ pH داخلی در این جلبک‌های مقاوم به اسید با کاهش pH داخلی حفظ می‌شود. این ممکن است مکانیسمی برای حفظ متابولیسم سلولی باشد به طوری که رشد جلبک تحت شرایط اسیدی به شدت تحت تأثیر قرار نگیرد (Mata et al., 2010). چنین مکانیسمی جلبک‌های مقاوم به اسید را قادر می‌سازد تا pH داخلی را در پاسخ به نوسانات pH خارجی تنظیم کنند، در نتیجه مزیت انرژی را نسبت به گونه‌های غیرقابل تحمل اسید در pH خارجی کم، حفظ می‌کند.

با توجه به پژوهش‌های بیان شده در زیست راکتور نوری، می‌توان نتیجه گرفت که کنترل pH بین ۷ تا ۸ ممکن است برای رشد اکثر ریزجلبک‌ها در زیست راکتور نوری غشایی بهینه باشد،

فاضلاب شهری همراه بود. در پژوهشی بیان شد که بین فتوسنتز و افزایش وزن خشک جلبک با حذف نیترات و فسفات رابطه مستقیم وجود دارد که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت (Leonardos and Geider, 2004).

جذب نیترات و فسفات توسط سلول‌های ریزجلبکی به برخی از پارامترها مانند غلظت کل فسفر و نیتروژن و ساختارهای شیمیایی آنها، وضعیت فیزیولوژیکی سلول‌ها و یا پارامترهای محیطی مانند تابش نور و pH بستگی دارد (Azizi et al., 2021c).

به طور کلی با جذب کربن معدنی توسط جلبک‌ها، pH می‌تواند به طور قابل‌توجهی در کشت جلبک‌ها افزایش یابد (Hansen, 2002). حداکثر رشد جلبک در اطراف pH خنثی رخ می‌دهد، اگرچه pH مطلوب pH اولیه کشت است که در آن برای رشد جلبک مناسب است. تغییر pH در محیط ممکن است رشد جلبک را از طریق مهار متابولیک محدود کند.

در پژوهشی مشاهده شد که سلول‌های *T. pseudonana* در pH کمتر از ۵/۶، سرعت رشد کمتری نسبت به pH بهینه ۸/۸ دارند. پس از کاهش pH با افزودن HCl، سرعت رشد طبیعی بازیابی شد (Singh and Singh, 2014).

نتایج مشابهی توسط چن و همکاران گزارش شد، جایی که سرعت فتوسنتز و رشد جلبک در pH معادل ۹ حداقل بود، اما با کاهش pH به ۸/۳ میزان جذب کربن افزایش یافت و (Chen et al., 2018).

قابل ذکر است که pH، عامل اصلی تعیین‌کننده غلظت نسبی گونه‌های کربنی در آب است (Christenson and Sims, 2011). pH قلیایی در دسترس بودن کربن از CO₂ را محدود می‌کند که به نوبه خود رشد جلبک را سرکوب می‌کند (Minhas et al., 2016). در pH قلیایی، کربن جلبک‌ها به شکل کربنات موجود است (Markou et al., 2014). PH قلیایی همچنین میل جلبک‌ها به CO₂ آزاد را کاهش می‌دهد (Minhas et al., 2016).

در کشت‌های فتوتروفیک، جایگزینی CO₂ که برای فتوسنتز مصرف می‌شود کندتر است و در نتیجه فشار نسبی CO₂ کاهش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش pH می‌شود (Mata et al., 2010).

pH قلیایی انعطاف‌پذیری دیواره سلولی را افزایش می‌دهد که از پارگی آن جلوگیری می‌کند، بنابراین زمان تکمیل چرخه سلولی



معادل ۴ بهینه‌ترین و بیشترین رشد زیست توده در ریزجلبک و درصد حذف نیترات و فسفات از پساب سنتزی قاضلاب شهری را همراه داشت و از طرفی با توجه به حذف مناسب مواد مغذی از پساب فاضلاب شهری و رشد ریزجلبک در پساب سنتزی و ارزش زیست توده جلبکی می‌توان پساب فاضلاب شهری را به‌عنوان یک محیط کشت ارزان قیمت در نظر گرفت.

۵- قدردانی

این پژوهش مستخرج از پایان‌نامه نویسنده اول با کد اخلاق مصوب در پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تنکابن به شماره IRI.IAU.TON.REC.1400.010 است. به‌این وسیله از تمامی افرادی که در اجرای این پژوهش ما را یاری رساندند، قدردانی می‌شود.

اما موارد استثنایی نیز وجود دارد، به‌عنوان مثال اسپیرولینا که در شرایط pH اولیه کم به خوبی رشد می‌کند (Hosseini et al., 2019). (Low et al., 2016) با توجه به پژوهش‌های محدود در این زمینه، قبل از اینکه تأثیر pH بر عملکرد زیست راکتور غشایی به‌طور واضح‌تری مشخص شود، نیاز به پژوهش‌های بیشتری است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کشت ریزجلبک کلرلا ولگاریس در زیست راکتور نوری با پساب سنتزی فاضلاب شهری (پساب خروجی از زیست راکتور غشایی) برای تصفیه تکمیلی فاضلاب‌های شهری که حاوی مقدار زیاد نیترات و فسفات هستند، بررسی شد و پارامتر محیطی pH در رشد ریزجلبک و حذف نیترات و فسفات در زیست راکتور نوری حاوی پساب سنتزی فاضلاب شهری بررسی شد. با توجه به نتایج pH معادل ۷ نسبت به pH معادل ۱۰ و pH

References

- Arbib, Z., Ruiz, J., Álvarez-Díaz, P., Garrido-Pérez, C., Barragan, J. & Perales, J. A. 2013. Effect of pH control by means of flue gas addition on three different photo-bioreactors treating urban wastewater in long-term operation. *Ecological Engineering*, 57, 226-235.
- Azizi, S., Bayat, B., Tayebati, H., Hashemi, A. & Pajoum Shariati, F. 2021a. Nitrate and phosphate removal from treated wastewater by *Chlorella vulgaris* under various light regimes within membrane flat plate photobioreactor. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 40, e13519.
- Azizi, S., Hashemi, A., Pajoum Shariati, F., Bonakdarpour, B. & Safamirzaei, M. 2021b. Fouling identification in reciprocal membrane photobioreactor (RMPBR) containing *Chlorella vulgaris* species: hydraulic resistances assessment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 96, 404-411.
- Azizi, S., Hashemi, A., Shariati, F. P., Tayebati, H., Keramati, A., Bonakdarpour, B., et al. 2021c. Effect of different light-dark cycles on the membrane fouling, EPS and SMP production in a novel reciprocal membrane photobioreactor (RMPBR) by *C. Vulgaris* Species. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102256.
- Bolzonella, D., Fatone, F., Di Fabio, S. & Cecchi, F. 2010. Application of membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse in the Mediterranean region: focusing on removal efficiency of non-conventional pollutants. *Journal of Environmental Management*, 91, 2424-2431.
- Bornare, J., Kalyan Raman, V. & Sonde, R. 2014. Application of anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for low-strength wastewater treatment and energy generation. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*, 399-434.
- Chen, X., Li, Z., He, N., Zheng, Y., Li, H., Wang, H., et al. 2018. Nitrogen and phosphorus removal from anaerobically digested wastewater by microalgae cultured in a novel membrane photobioreactor. *Biotechnology for Biofuels*, 11, 1-11.
- Christenson, L. & Sims, R. 2011. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology Advances*, 29, 686-702.



- Gao, B., Yang, J., Lei, X., Xia, S., Li, A. & Zhang, C. 2016. Characterization of cell structural change, growth, lipid accumulation, and pigment profile of a novel oleaginous microalga, *Vischeria stellata* (Eustigmatophyceae), cultured with different initial nitrate supplies. *Journal of Applied Phycology*, 28, 821-830.
- Griffiths, C., Klemick, H., Massey, M., Moore, C., Newbold, S., Simpson, D., et al. 2020. US environmental protection agency valuation of surface water quality improvements. *Review of Environmental Economics and Policy*. 6(1), 130-146.
- Gürevin, C., Erturk, A. & Albay, M. 2017. Predicting the effects of sediment based internal nutrient loads on eutrophication in Küçükçekmece Lagoon for rehabilitation planning. *International Journal of Sediment Research*, 32, 527-554.
- Hansen, P. J. 2002. Effect of high pH on the growth and survival of marine phytoplankton: implications for species succession. *Aquatic Microbial Ecology*, 28, 279-288.
- Hashemi, A., Moslemi, M., Pajoum Shariati, F. & Delavari Amrei, H. 2020a. Beta-carotene production within *Dunaliella salina* cells under salt stress condition in an indoor hybrid helical-tubular photobioreactor. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(1), 69-74.
- Hashemi, A., Pajoum Shariati, F., Sohani, E., Azizi, S., Hosseinifar, S. Z. & Delavari Amrei, H. 2020b. CO₂ biofixation by *Synechococcus elongatus* from the power plant flue gas under various light-dark cycles. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 1735-1743.
- Hoffmann, J. P. 1998. Wastewater treatment with suspended and nonsuspended algae. *Journal of Phycology*, 34, 757-763.
- Hosseini, M. K., Shariati, F. P., Hosseini, P. K., Azizi, S. & Hashemi, A. 2019. The effect of polymeric granule as mechanical cleaning technology on membrane fouling in a hybrid microalgal membrane photobioreactor (HMPBR). *6th MEMTEK International Symposium on Membrane Technologies and Applications*, Istanbul, Turkey. 18-20.
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., et al. 2008. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*, 54, 621-639.
- Huang, C. C., Hung, J. J., Peng, S. H. & Chen, C. N. N. 2012. Cultivation of a thermo-tolerant microalga in an outdoor photobioreactor: influences of CO₂ and nitrogen sources on the accelerated growth. *Bioresource Technology*, 112, 228-233.
- Huo, S., Wang, Z., Zhu, S., Zhou, W., Dong, R. & Yuan, Z. 2012. Cultivation of *Chlorella zofingiensis* in bench-scale outdoor ponds by regulation of pH using dairy wastewater in winter, South China. *Bioresource Technology*, 121, 76-82.
- Jetten, M. S., Horn, S. J. & Van Loosdrecht, M. C. 1997. Towards a more sustainable municipal wastewater treatment system. *Water Science and Technology*, 35, 171-180.
- Juneja, A., Ceballos, R. M. & Murthy, G. S. 2013. Effects of environmental factors and nutrient availability on the biochemical composition of algae for biofuels production: a review. *Energies*, 6, 4607-4638.
- Keramati, A., Azizi, S., Hashemi, A. & Pajoum Shariati, F. 2021. Effects of flashing light-emitting diodes (LEDs) on membrane fouling in a reciprocal membrane photobioreactor (RMPBR) to assess nitrate and phosphate removal from whey wastewater. *Journal of Applied Phycology*, 33, 1513-1524.
- Kesaano, M. & Sims, R. C. 2014. Algal biofilm based technology for wastewater treatment. *Algal Research*, 5, 231-240.
- Leng, L., Wei, L., Xiong, Q., Xu, S., Li, W., Lv, S., et al. 2020. Use of microalgae based technology for the removal of antibiotics from wastewater: a review. *Chemosphere*, 238, 124680.



- Leonardos, N. & Geider, R. J. 2004. Responses of elemental and biochemical composition of *Chaetoceros muelleri* to growth under varying light and nitrate: phosphate supply ratios and their influence on critical N:P. *Limnology and Oceanography*, 49, 2105-2114.
- Low, S. L., Ong, S. L. & Ng, H. Y. 2016. Characterization of membrane fouling in submerged ceramic membrane photobioreactors fed with effluent from membrane bioreactors. *Chemical Engineering Journal*, 290, 91-102.
- Luo, Y., Le-Clech, P. & Henderson, R. K. 2017. Simultaneous microalgae cultivation and wastewater treatment in submerged membrane photobioreactors: a review. *Algal Research*, 24, 425-437.
- Markou, G., Vandamme, D. & Muylaert, K. 2014. Microalgal and cyanobacterial cultivation: the supply of nutrients. *Water Research*, 65, 186-202.
- Mata, T. M., Martins, A. A. & Caetano, N. S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217-232.
- Minhas, A. K., Hodgson, P., Barrow, C. J. & Adholeya, A. 2016. A review on the assessment of stress conditions for simultaneous production of microalgal lipids and carotenoids. *Frontiers in Microbiology*, 7, 546.
- Molinuevo-Salces, B., Riaño, B., Hernández, D. & Cruz García-González, M. 2019. *Microalgae and Wastewater Treatment: Advantages and Disadvantages*. in Alam, A. & Wang, Zh. 2019. *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*. Springer, Singapore.
- Munoz, R. & Guieysse, B. 2006. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Research*, 40, 2799-2815.
- Parsons, S. A. & Smith, J. A. 2008. Phosphorus removal and recovery from municipal wastewaters. *Elements*, 4, 109-112.
- Posadas, E., Del Mar Morales, M., Gomez, C., Acién, F. G. & Muñoz, R. 2015. Influence of pH and CO₂ source on the performance of microalgae-based secondary domestic wastewater treatment in outdoors pilot raceways. *Chemical Engineering Journal*, 265, 239-248.
- Rashed, M. N. 2013. Adsorption technique for the removal of organic pollutants from water and wastewater. *Organic Pollutants-Monitoring, Risk and Treatment*, 7, 167-194.
- Singh, S. & Singh, P. 2014. Effect of CO₂ concentration on algal growth: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 172-179.
- Valdes Ramos, A., Aguilera Gonzalez, E. N., Tobón Echeverri, G., Samaniego Moreno, L., Díaz Jiménez, L. & Carlos Hernández, S. 2019. Potential uses of treated municipal wastewater in a semiarid region of Mexico. *Sustainability*, 11, 2217.
- Ward, M. H., Jones, R. R., Brender, J. D., De Kok, T. M., Weyer, P. J., Nolan, B. T., et al. 2018. Drinking water nitrate and human health: an updated review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 1557.
- Wef, A. A. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21st Edition, Washington DC, USA.
- Yoo, C., La, H. J., Kim, S. C. & Oh, H. M. 2015. Simple processes for optimized growth and harvest of *Ettlia sp.* by pH control using CO₂ and light irradiation. *Biotechnology and Bioengineering*, 112, 288-296.



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

