

کاهش BOD_5 از آب‌های آلوده با استفاده از گیاه وتیور در تالاب مصنوعی جریان سطحی

صائب خوش نواز^{۱*}

(۱) استادیار؛ گروه علوم آب؛ واحد شوشتر؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ شوشتر؛ ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: Saeb.khoshnavaz@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۶

چکیده

در تالاب‌های مصنوعی از نوع جریان سطحی، حجم گسترده میکروارگانیسم‌های اطراف ریشه گیاه، محیط مناسبی برای تصفیه فاضلاب فراهم می‌نمایند. به منظور بررسی اثر گیاه وتیور و زمان ماند فاضلاب، در کارایی تصفیه این نوع سامانه‌ها، نه حوضچه در شرکت کشت و صنعت نیشکر کارون واقع در شهرستان شوشتر ساخته شد. واحدها، به صورت موازی در کنار هم قرار گرفته و طول هر واحد ۳ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر بود. جریان پیوسته فاضلاب کشاورزی حاصل از شستشوی نی، از اواسط آذرماه ۱۳۹۲ تا خردادماه سال ۱۳۹۳ برقرار شد. سه سامانه، با کشت ریشه گیاه در خاک (S)، سه سامانه با کشت گیاه روی صفحات شناور (F) و سه سامانه بدون گیاه و بستر متخلخل به عنوان شاهد (C) در نظر گرفته شدند. متوسط غلظت BOD_5 فاضلاب ورودی به هر واحد $115 \pm 15/69$ میلی‌گرم بر لیتر و زمان‌های ماند مورد آزمایش ۳، ۵ و ۷ روز بودند. در طی دوره آزمایش، غلظت BOD_5 ورودی و خروجی هر واحد، اندازه‌گیری و با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS آنالیز شد. نتایج حاصل از آنالیز نشان داد، اختلاف معنی‌داری بین سامانه‌های حاوی گیاه و فاقد گیاه (شاهد) در زمان‌های ماند وجود دارد. سامانه حاوی گیاه و زمان ماند ۷ روز در ماه خرداد، دارای بیش‌ترین مقدار بازده حذف، با میانگین $68/48$ درصد بود. به عبارت دیگر، شرایط بهینه برای حصول حداکثر بازده حذف BOD_5 از فاضلاب کشت و صنعت نیشکر کارون، در سامانه تالاب مصنوعی شناور با کشت گیاه وتیور و در زمان ماند ۷ روز به دست آمد.

کلید واژه‌ها: تالاب مصنوعی؛ کاهش BOD_5 ؛ وتیور

مقدمه

امروزه، در بسیاری از کشورهای پیشرفته، کاربرد سیستم‌های تالابی و استفاده از ظرفیت گیاهان در تصفیه فاضلاب (گیاه‌پالایی^۱) رواج یافته است. در تالاب‌های مصنوعی^۲ همانند تالاب‌های طبیعی، عمل تصفیه با قرارگیری فاضلاب در معرض نور خورشید، هوا و گیاهان آبی انجام می‌شود. پساب خروجی از این سیستم

فاضلاب‌ها، خسارت قابل ملاحظه‌ای به محیط‌زیست، کشاورزی، شیلات، گردشگری و منابع آب شرب وارد می‌کنند. ممانعت از آلودگی منابع آب سطحی به عنوان عمده‌ترین منابع آب آشامیدنی مورد استفاده انسان، سهم عمده‌ای در توسعه بهداشت ملی و منطقه‌ای دارد. در نتیجه، تصفیه فاضلاب‌ها امری اجتناب‌ناپذیر قلمداد می‌گردد.

¹ Phytoremediation

² Constructed Wetlands

ترویج قرارگرفت و در طول پنجاه سال گذشته، با توجه به داشتن ریشه عمیق، در راستای اهداف آبخیزداری و حفظ آب و خاک در دنیا به آن توجه خاصی شد. از سوی دیگر، خصوصیات منحصر به فرد این گیاه، در سازگاری با شرایط نامساعد طبیعی و تحمل آب و خاک حاوی غلظت بالای فلزات سنگین و مواد سمی به آن اجازه داد که حجم فوق العاده‌ای از مواد غذایی و فلزات سنگین را از منابع آب و اراضی آلوده پاک‌کند، و نظیر یک فوق انباشتگر عمل نماید (Greenfield, 1988).

از سال ۱۹۹۴، نمونه‌ای از تالاب‌های مصنوعی جریان‌سطحی، حاوی گیاه نی، با هدف کاهش آلودگی رواناب فرودگاه هیترووی لندن مورد استفاده قرار گرفته است. در بررسی‌هایی که توسط Revitt و همکاران (۲۰۰۱) روی داده‌های این آزمایش انجام گرفت، مشخص شد، کارایی این سیستم مناسب و بازده کاهش آلودگی BOD₅ در حدود ۴۳ درصد بود. Katsenovicha و همکاران (۲۰۰۹)، کارایی پنج گونه گیاهی مختلف را در سه نوع تالاب مصنوعی از لحاظ نحوه بارگذاری جریان، در نواحی گرمسیری کشور السالوادر، مورد بررسی قرار دادند. هدف از این تحقیق، کاهش چند مورد از آلودگی‌های رایج فاضلاب‌های خانگی از جمله BOD بود. ارزیابی سیستم، با استفاده از پایش روزانه غلظت آلودگی ورودی به سیستم و خروجی از آن، انجام شد. نتایج از این تحقیق نشان داد بعضی از گونه‌های گیاهی در نوع خاصی از سامانه‌های تالاب مصنوعی از لحاظ نحوه بارگذاری جریان، کارایی بالاتری در کاهش بار آلودگی فاضلاب دارند. به‌طور نمونه، کارایی گیاه تیفا^۶ در سامانه تالابی با جریان سطحی برای کاهش آلودگی BOD₅ با میانگین ۸۰/۷۹ درصد، از بقیه گونه‌های گیاهی بیشتر بود. Kotti و همکاران (۲۰۱۰) تاثیر پارامترهای طراحی و

می‌تواند بدون مشکل وارد محیط‌زیست شده و یا در آبیاری و پرورش ماهی مورد استفاده قرارگیرد. تالاب‌های مصنوعی را بر اساس نحوه جریان فاضلاب به دو گروه اصلی شامل تالاب‌های مصنوعی جریان‌سطحی^۱ و تالاب‌های مصنوعی جریان زیرسطحی^۲ تقسیم‌بندی می‌نمایند. در تالاب‌های با جریان سطحی، ابتدا جریان آب از بالای سطح زمین عبور نموده و در معرض هوای آزاد قرار می‌گیرد و تامین اکسیژن از تداوم هوادهی در سطح اتفاق می‌افتد (Tanner and Headlby, 2011, Vymazal, 2010). قسمت‌های تحتانی سیستم، شامل ریشه گیاهان واقع در بستر متخلخل یا معلق درون آب، سطح گسترده‌ای جهت رشد بیوفیلم^۳ و به‌دام انداختن املاح معلق فراهم می‌سازند (Tanner and Headlby, 2011). اخیراً، یکی از گیاهانی که جهت کشت در سامانه‌های تالابی مورد توجه واقع شده، گیاه وتیور^۴ است. وتیور، گیاهی حاره‌ای، علفی، چندساله، از خانواده گرامینه با سازگاری بوم‌شناختی بالا و تولید ماده خشک زیاد است که قابلیت سازگاری با شرایط مختلف محیطی را دارد. گیاه وتیور عموماً دارای منشأ هندی است اما به‌طور وسیعی در سراسر کشور تایلند رشد می‌کند. گونه غالبی از آن که عموماً جهت کاشت بر سایر گونه‌ها ارجحیت دارد وتیور یازیزانیویدیس (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) نامیده می‌شود که دارای سرعت رشد خوبی در مرحله پنجه‌زنی بوده و بوته مترامی را به‌وجود می‌آورد به‌طوری‌که قطر پایه هر بوته گیاه به حدود ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع آن به ۵۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر می‌رسد (Truong, 2000). این گیاه، از سال ۱۹۸۰، توسط بانک جهانی برای حفاظت از محیط زیست در دنیا، تحت عنوان VGT^۵ مورد

¹ Surface-flow constructed wetlands

² Subsurface-flow constructed wetlands

³ Biofilm

⁴ Vetiveria Grass

⁵ Vetiver Grass Technology

⁶ Typha

دراستان خوزستان، مشخص شد، اکثر مطالعات انجام شده، بر روی تصفیه فلزات سنگین و نوع تالاب به کارگرفته شده از نوع جریان زیرسطحی بود و گیاهانی که در تالاب کشت شدند، گونه های بومی استان بودند. در تحقیق حاضر، پتانسیل جذب آلودگی فاضلاب صنایع جانبی نیشکر، در سامانه های تالاب مصنوعی جریان سطحی با گیاه وتیور در منطقه گرم و خشک خوزستان مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

محل انجام مطالعه، محوطه کارخانه تولید شکر شرکت کشت و صنعت نیشکر کارون بود. این کارخانه در حدود ۲۰ کیلومتری غرب شهرستان شوشتر و در شمال استان خوزستان قرار دارد. برداشت داده از هیجدهم آذرماه ۱۳۹۲ آغاز و در چهارم خرداد خردادماه ۱۳۹۳ به پایان رسید. بر مبنای حذف بعضی از آلودگی ها، محققین روابط مختلفی را برای تعیین مساحت مورد نیاز تالاب مصنوعی ارائه نمودند. Crites و Tchobanoglous (۱۹۹۸) بر مبنای حذف BOD₅ در تالاب های جریان سطحی رابطه ۱ را پیشنهاد نمودند که مبنای محاسبه مساحت هر حوضچه در این تحقیق می باشد.

$$A_s = \frac{Q_{ave} \times t}{d_w \times \eta} \quad (1)$$

که t زمان ماند برای حذف BOD₅ بر حسب روز، Q_{ave} دبی متوسط جریان بر حسب متر مکعب، d_w عمق جریان بر حسب متر و η ضریب ثابت بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ است. زمان ماند نیز خود تابعی از BOD₅ فاضلاب ورودی و BOD₅ پساب خروجی و نرخ ثابت حذف BOD₅ در دمای متوسط دوره بوده و از رابطه ۲ مطابق زیر به دست می آید.

عملیاتی را بر بازده تصفیه تالاب های جریان سطحی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد، به طور قابل ملاحظه ای، کارائی حذف BOD این سامانه ها به دما وابسته است. Weragoda و همکاران (۲۰۱۲)، کارآیی سامانه تالاب مصنوعی در مقیاس آزمایشگاهی در مناطق گرمسیری سریلانکا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد، بازده حذف BOD₅ فاضلاب ورودی به تالاب، ۸۰ درصد بود. Klomjek و Nitorisavut (۲۰۰۵) در کشور تایلند، سامانه تالاب مصنوعی حاوی هشت گونه گیاهی از جمله گیاه وتیور را برای حذف آلودگی های موجود در یک فاضلاب شهری بررسی نمودند. در این تحقیق، شوری های متفاوت (۱۴ تا ۱۶ میلی زیمنس بر سانتیمتر) با افزودن کلرید سدیم به فاضلاب، اعمال شد. نتایج این تحقیق نشان داد، بازده حذف BOD₅ در سامانه های حاوی گیاهان با شوری های ذکر شده، ۷۲/۴ درصد بود. اگرچه، محققین زیادی، کارآیی انواع تالاب های حاوی گیاهان مختلف را ارزیابی کرده اند (Tanner and Headlby, 2011; Allen et al., 2010). اما آگاهی از تاثیر گونه های مختلف گیاهی روی کارآیی تصفیه در تالاب هایی از نوع جریان سطحی و اثر وجود یا عدم وجود گیاه و بستر در آنها محدود است (Kansiime and Bruggen, 2001; Prabu and Udayasoorian, 2007).

Prabu و Udayasoorian (۲۰۰۷) بازده حذف BOD جریان ورودی از فاضلاب کارخانه تولید شکر و کاغذ، توسط سامانه های حاوی سه گونه گیاهی فراگمیت، تیفا و سی پانگوری^۱ را به ترتیب ۷۴، ۷۴ و ۶۴ درصد بیان داشتند در حالی که غلظت BOD ورودی ۶۸ تا ۱۳۸ میلی گرم در لیتر بود. با بررسی تحقیقات گذشته در زمینه استفاده از فن آوری تالاب ها برای تصفیه فاضلاب،

¹ C pangorei

انتخاب شد. به منظور بررسی اثر زمان‌های ماند دیگر، با اختلاف ± 2 روز، زمان‌های ۳ و ۷ روز نیز مدنظر قرار گرفت. با توجه به اینکه، حجم هر حوضچه ثابت بود، تغییر زمان ماند هر سامانه با تغییر دبی جریان امکان‌پذیر شد پس، در نتیجه، با تغییر دبی ورودی، زمان‌های ماند دیگر اعمال گردید. با استفاده از این مقادیر، مجاور کانال انتقال فاضلاب شرکت، با استفاده از مصالح بنایی، دو نوع تالاب مصنوعی به همراه سامانه شاهد با سه تکرار و در مجموع نه حوضچه مستطیلی با شبیه‌سازی جریان سطحی در فضای باز ساخته شد.

جهت خروج جریان فاضلاب از سامانه، با فاصله ۰/۶۵ متر از کف هر حوضچه، یک عدد مجرا تعبیه شد. برای جلوگیری از نشت آب، دیواره داخلی حوضچه‌ها با استفاده از ملات ماسه و سیمان نرم پوشش‌شد. با فاصله کوتاهی از سامانه‌ها، یک عدد مخزن پنج هزار لیتری، با اختلاف ارتفاع حدود ۴ متر نصب شد. جهت برقراری جریان فاضلاب از کانال انتقال به مخزن، از یک عدد پمپ سانتریفوژ و خط لوله فولادی یک اینچ استفاده گردید. برای هر سامانه یک عدد مخزن ۲۲۰ لیتری (بشکه) منظور و با استفاده از نیروی ثقل و خط لوله پلی اتیلن، جریان از مخزن پنج هزار لیتری به درون بشکه‌ها انتقال یافت. برای برقراری جریان از هر بشکه به حوضچه، از شیرهای کشویی استفاده و برای تنظیم سطح آب درون آن، شناور کولر آبی نصب شد. شکل ۱ پلان و شکل ۲ مقطع سامانه‌های شناور (F)، ریشه در خاک (S) و سامانه شاهد (C) را نشان می‌دهد. سامانه شاهد مشابه سامانه شناور بوده اما فاقد گیاه می‌باشد. شکل ۳ تصویر این سامانه‌ها و استقرار گیاه و تیور را در آن نشان می‌دهد.

فاضلاب مورد استفاده در تحقیق، توسط یک عدد پمپ سانتریفوژ به مخزن ۵۰۰۰ لیتری منتقل و توسط لوله پلی اتیلن به مخزن‌های ۲۲۰ لیتری روی هر سامانه منتقل شد. جهت تنظیم ارتفاع آب واقع در مخزن ۲۲۰

$$t = \frac{V}{Q_{ave}} = \left[\frac{1}{\left(\frac{C_n}{C_0}\right)^{\frac{1}{n}} - 1} \right] \times \frac{n}{k_0} \quad (2)$$

که V حجم تالاب بر حسب مترمکعب، C_n غلظت BOD_5 خروجی بر حسب میلی گرم بر لیتر، C_0 غلظت BOD_5 ورودی بر حسب میلی گرم بر لیتر، n تعداد واحدهای سری شده و K_0 نرخ ثابت حذف BOD_5 در دمای متوسط دوره بر حسب درجه سانتی گراد است. با منظور نمودن K_0 به مقدار $1/0.1$ در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، مقدار K_0 با رابطه ۳ در دمای مورد نظر قابل محاسبه می‌باشد.

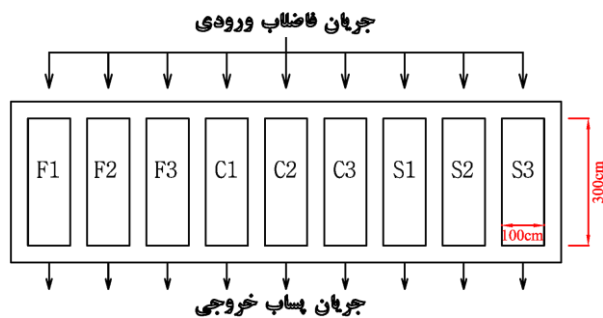
$$\frac{K_{02}}{K_{01}} = \theta^{(T_2 - T_1)} \quad (3)$$

که در این رابطه K_{02} ثابت نرخ حذف BOD_5 در دمای T_2 و K_{01} ثابت نرخ حذف BOD_5 در دمای T_1 و θ فاکتور اصلاح دما (مقدار $1/2$ تا $1/0.6$) است. با بررسی نتایج گذشته آنالیز فاضلاب مورد بررسی، حداکثر غلظت BOD_5 مقدار ۱۴۰ میلی‌گرم بر لیتر و مقدار مجاز BOD_5 خروجی به آب‌های سطحی طبق استاندارد سازمان محیط‌زیست ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. با فرض میانگین حداقل درجه حرارت ۱۵ درجه سانتی‌گراد در طی دوره تحقیق، ثابت نرخ حذف BOD_5 ، 0.74 محاسبه و زمان ماند مورد نیاز پنج روز به دست آمد. با احتساب زمان ماند پنج روز و دبی متوسط ۳۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و عمق حوضچه ۶۵ سانتی متر، مساحت مورد نیاز هر حوضچه ۳ مترمربع محاسبه شد. Crites و همکاران (۲۰۰۶) پیشنهاد نمودند، در تالاب‌های مصنوعی از نوع جریان سطحی برای ایجاد جریان نه‌رگونه^۱، نسبت طول به عرض باید بین ۲:۱ تا ۴:۱ باشد. با فرض نسبت طول به عرض ۳:۱، طول هر حوضچه ۳ متر و عرض آن ۱ متر

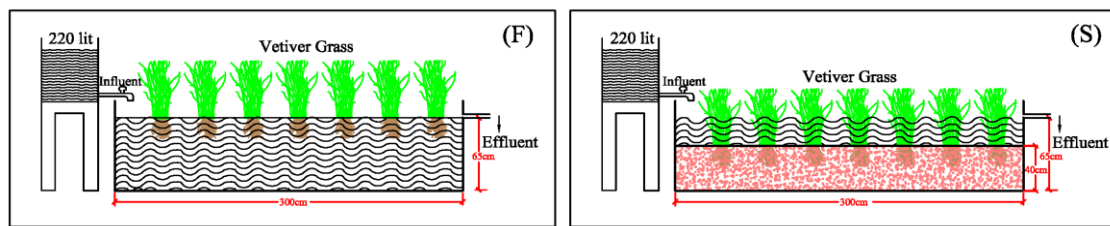
¹ Plug flow

بر بازده حذف BOD₅ در فاضلاب کشاورزی مورد تحقیق، سه زمان ماند ۳، ۵ و ۷ روز در نظر گرفته و دوره انجام تحقیق، شش ماه و از اواسط آذرماه سال ۱۳۹۲ تا خردادماه سال ۱۳۹۳ بود. میزان BOD₅ نمونه‌ها، بوسیله دستگاه BOD سنج الکترونیکی^۱ شرکت وِلپ^۲ و بر اساس روش‌های استاندارد آزمایشات آب و فاضلاب^۳ اندازه‌گیری شد.

لیتری، از شناورهای کولر آبی استفاده شد. با توجه به ثابت بودن حجم سامانه‌ها، می‌توان با تغییر مقدار دبی، زمان‌های ماند متفاوتی را اعمال نمود. مقدار دبی ورودی به هر حوضچه، برای هر زمان ماند، به وسیله شیرهای گازی نصب شده روی هر مخزن ۲۲۰ لیتری تنظیم شد. مقدار غلظت BOD₅ ورودی به حوضچه‌ها در ابتدای زمان ماند و غلظت BOD₅ خروجی نیز در انتهای زماند محاسبه شد. به منظور بررسی تاثیر زمان ماندهای مختلف



شکل ۱. پلان سامانه‌های تالاب مصنوعی مورد استفاده در تحقیق



شکل ۲. مقطع سامانه‌های تالاب مصنوعی مورد استفاده در تحقیق



شکل ۳. نمایی از سامانه‌های تالاب مصنوعی مورد استفاده در تحقیق

¹ BOD sensor

² Velp

³ Standard Methods for Examination of Water & Wastewater

⁴ Statistical Analysis System

⁵ Excel

همانطور که از شکل ۳ مشخص می‌باشد، متوسط درجه حرارت محیط در طی دوره آزمایش از ۱۰ درجه سانتی‌گراد در ماه آذر تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد در نوسان بود. در نتیجه، روند تغییرات دمای هوا از شروع تا پایان به نحوی بود که با انجام تکرار آزمایش در ماه‌های متوالی، امکان بررسی تاثیر افزایش دما بر بازده حذف BOD₅ فاضلاب وجود داشت.

با هدف بررسی تاثیر نوع کشت گیاه در تالاب، زمان ماند و دما بر حذف BOD₅ فاضلاب کشاورزی کشت و صنعت کارون، غلظت BOD₅ فاضلاب ورودی و پساب خروجی از سه نوع سامانه در هر مرحله استخراج شد. جدول ۱ نتایج حاصل از آزمایشات پایلوت تالاب مصنوعی شامل میانگین BOD₅ فاضلاب ورودی، میانگین BOD₅ پساب خروجی و بازده حذف BOD₅ هر سامانه در هر دوره را ارائه می‌دهد.

نتایج حاصل از تعیین غلظت BOD₅ فاضلاب ورودی (جدول ۱) نشان داد، میانگین، حد بالا، حد پایین و انحراف معیار آن به ترتیب ۱۱۵، ۱۳۵، ۸۱ و ۱۵/۶۹ میلی‌گرم بر لیتر بود.

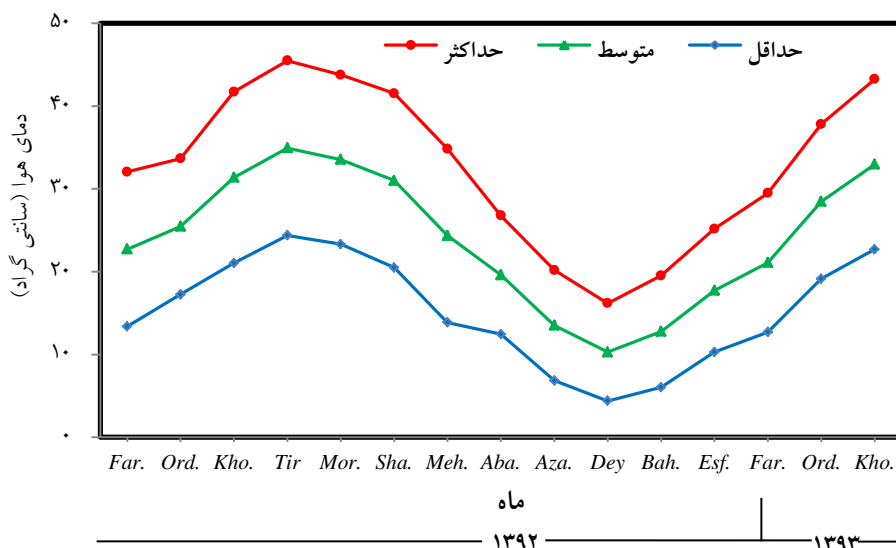
محاسبه بازده حذف مواد مغذی فاضلاب توسط رابطه ۴ تعیین شد (Beutel et al., 2009).

$$R = \left(1 - \frac{C_o}{C_i}\right) \times 100 \quad (4)$$

در این رابطه، C_o غلظت BOD₅ خروجی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و C_i غلظت BOD₅ ورودی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر است. جهت تجزیه واریانس از نرم‌افزار آماری SAS[®] و جهت ترسیم نمودارها از نرم‌افزار اکسل[®] استفاده شد.

نتایج و بحث

مطالعات Kadlec و Reddy (۲۰۰۱) نشان داد، در مناطق گرمسیری، میانگین دمای روزانه آب تقریباً معادل میانگین دمای روزانه هوا می‌باشد. به‌منظور بررسی تاثیر دما در کارایی حذف BOD₅ فاضلاب در سامانه تالابی از مقادیر روزانه دمای هوای محیط استفاده شد. شکل ۴ تغییرات متوسط حداکثر، میانگین و حداقل دمای هوا در سال ۱۳۹۲ و فصل بهار ۱۳۹۳ (دوره آزمایش) را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تغییرات متوسط حداکثر، میانگین و حداقل دمای محیط از شروع تا پایان آزمایش

شکل ۴ مقایسه میانگین اثر دوره انجام آزمایش (ماه) بر درصد حذف BOD₅ را نشان می‌دهد.

علت کاهش بیشتر BOD₅ فاضلاب ورودی در سامانه‌های حاوی گیاه به انتقال اکسیژن از طریق سیستم برگ، ساقه و ریشه به درون سیستم تالاب می‌باشد. عمل موثر دیگر در کاهش BOD₅ جریان خروجی، تجمع میکروارگانیسم‌ها در مجاورت ریشه و فعالیت بهتر در تجزیه مواد آلی و کاهش BOD₅ است. طبق اظهارات محققین، بازده حذف مواد آلی در اکثر موارد در نتیجه فعالیت میکروبی باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی می‌باشد (Greenway and Woolley, 1999; Steer et al., 2002; Vymazal, 2002).

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین تیمارهای آزمایش توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام و نمودارهای مربوطه رسم شد. جدول ۲، تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر درصد حذف BOD₅ فاضلاب مورد تحقیق را نشان می‌دهد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۲)، درصد حذف BOD₅ تحت تاثیر تیمارهای آزمایش شامل ماه انجام آزمایش با تغییرات دمای محیط (عامل فرعی) نوع کشت گیاه در تالاب یا نوع سامانه (عامل اصلی)، زمان ماند (عامل اصلی) و اثر متقابل آنها قرار گرفته و اختلاف میانگین‌ها از لحاظ آماری معنی‌دار بوده است ($p < 0.05$).

جدول ۱. مقادیر غلظت BOD₅ فاضلاب ورودی و پساب خروجی و درصد حذف آن در سه زمان ماند

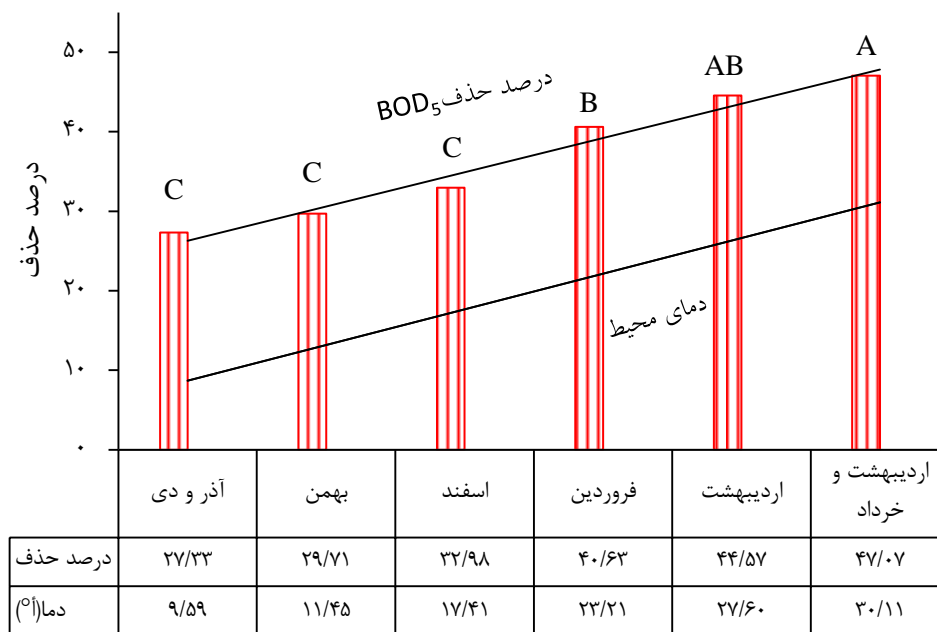
زمان ماند	دوره آزمایش	BOD ₅ in (mg/L)	نوع سامانه			
			سامانه ریشه در خاک (S)	سامانه شناور (F)	سامانه شاهد (C)	درصد حذف
			BOD ₅ out (mg/L)	BOD ₅ out (mg/L)	BOD ₅ out (mg/L)	BOD ₅ out (mg/L)
روز ۳	۱۸/۰۹/۱۳۹۲-۲۰/۰۹/۱۳۹۲	۹۱	۷۲	۲۰/۸۸	۵۸/۳۳	۷۷/۳۳
	۰۲/۱۱/۱۳۹۲-۰۴/۱۱/۱۳۹۲	۱۱۲	۸۰	۲۸/۵۷	۷۰/۶۷	۹۲/۰۰
	۰۲/۱۲/۱۳۹۲-۰۴/۱۲/۱۳۹۲	۱۲۰	۸۳	۳۰/۵۶	۷۲/۰۰	۹۸/۶۷
	۱۵/۰۱/۱۳۹۳-۱۷/۰۱/۱۳۹۳	۱۲۴	۸۱	۳۴/۶۸	۶۲/۳۳	۱۰۰/۳۳
	۰۲/۰۲/۱۳۹۳-۰۴/۰۲/۱۳۹۳	۱۳۱	۷۵	۴۲/۴۹	۶۵/۳۳	۱۰۰/۳۳
	۱۹/۰۲/۱۳۹۳-۲۱/۰۲/۱۳۹۳	۱۳۵	۷۷	۴۳/۲۱	۵۳/۳۳	۱۰۴/۳۳
روز ۵	۰۲/۱۰/۱۳۹۲-۲۸/۰۹/۱۳۹۲	۹۶	۶۷	۳۰/۵۶	۵۸/۳۳	۸۰/۶۷
	۲۰/۱۱/۱۳۹۲-۱۶/۱۱/۱۳۹۲	۸۱	۵۵	۳۲/۱۰	۴۸/۳۳	۶۶/۶۷
	۱۱/۱۲/۱۳۹۲-۷/۱۲/۱۳۹۲	۱۱۲	۷۲	۳۵/۴۲	۵۹/۳۳	۸۹/۶۷
	۲۴/۰۱/۱۳۹۳-۲۰/۰۱/۱۳۹۳	۱۲۷	۷۶	۴۰/۴۲	۵۰/۳۳	۹۱/۳۳
	۱۱/۰۲/۱۳۹۳-۷/۰۲/۱۳۹۳	۱۲۹	۶۸	۴۷/۵۵	۴۷/۳۳	۹۲/۰۰
	۲۸/۰۲/۱۳۹۳-۲۴/۰۲/۱۳۹۳	۱۲۱	۶۳	۴۷/۶۶	۳۸/۳۳	۶۸/۳۲
روز ۷	۰۹/۱۰/۱۳۹۲-۰۳/۱۰/۱۳۹۲	۹۸	۶۶	۳۲/۶۵	۵۹/۰۰	۸۲/۳۳
	۲۷/۱۱/۱۳۹۲-۲۱/۱۱/۱۳۹۲	۹۹	۶۶	۳۳/۶۷	۵۸/۰۰	۸۰/۳۳
	۱۸/۱۲/۱۳۹۲-۱۲/۱۲/۱۳۹۲	۱۱۸	۷۴	۳۶/۹۹	۶۱/۱۷	۹۳/۳۲
	۳۱/۰۱/۱۳۹۳-۲۵/۰۱/۱۳۹۳	۱۲۶	۷۳	۴۱/۷۶	۴۷/۵۳	۸۹/۱۵
	۱۸/۰۲/۱۳۹۳-۱۲/۰۲/۱۳۹۳	۱۲۳	۶۳	۴۸/۵۴	۴۰/۷۰	۸۵/۹۵
	۰۴/۰۳/۱۳۹۳-۲۹/۰۲/۱۳۹۳	۱۲۹	۶۶	۴۹/۱۰	۴۰/۶۷	۸۷/۰۰

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر درصد حذف BOD₅

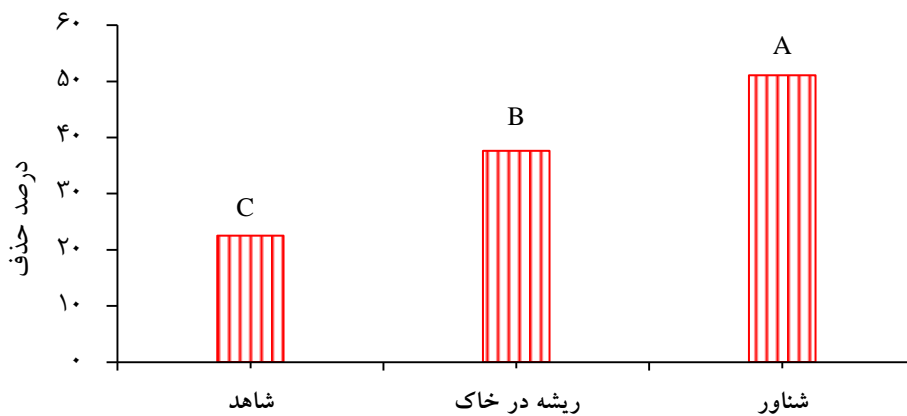
منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	احتمال
ماه (A)	۵	۹۰۳۸/۱۴	۱۸۰۷/۶۳	۹۹/۵۴	۰/۰۰۰۱ <
نوع سامانه (B)	۲	۲۲۰۱۵/۷۷	۱۱۰۰۷/۸۸	۶۰۶/۱۷	۰/۰۰۰۱ <
ماه × نوع سامانه (A×B)	۱۰	۹۹۹/۴۵	۹۹/۹۴	۵/۵۰	۰/۰۰۰۱ <
زمان ماند (C)	۲	۱۵۴۶/۹۱	۷۷۳/۴۵	۴۲/۵۹	۰/۰۰۰۱ <
ماه × زمان ماند (A×C)	۱۰	۱۸۳/۰۳	۱۸/۳۰	۱/۰۱	۰/۴۴
نوع سامانه × زمان ماند (B×C)	۴	۷۴/۴۷	۱۸/۶۲	۱/۰۳	۰/۴۰
ماه × نوع سامانه × زمان ماند (A×B×C)	۲۰	۲۳۹/۶۵	۱۱/۹۸	۰/۶۶	۰/۸۶

بر حذف BOD₅ نشان داد، با افزایش دمای محیط بازده حذف BOD₅ سامانه‌ها افزایش یافته‌است و شیب افزایش درصد حذف BOD₅ با شیب افزایش دمای محیط، متناسب می‌باشد. همچنین حداکثر درصد حذف BOD₅ در اواخر ماه اردیبهشت و اوایل ماه خرداد به مقدار ۴۷/۰۷ درصد حاصل شد. شکل ۵ مقایسه میانگین اثر نوع سامانه بر درصد حذف BOD₅ را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص می‌باشد، اثر دوره آزمایش (عامل دما) بر درصد حذف BOD₅ در بعضی دوره‌ها معنی‌دار بود (p < 0.05). قابل ذکر است، در سطح اعتماد ۹۵٪، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، اختلاف معنی‌دار ندارند و یکسان فرض شده و میانگین‌هایی که دارای حروف متفاوت هستند، دارای اختلاف معنی‌دار اعلام می‌شوند. مقایسه میانگین تاثیر دما



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر دوره انجام آزمایش (ماه) بر درصد حذف BOD₅

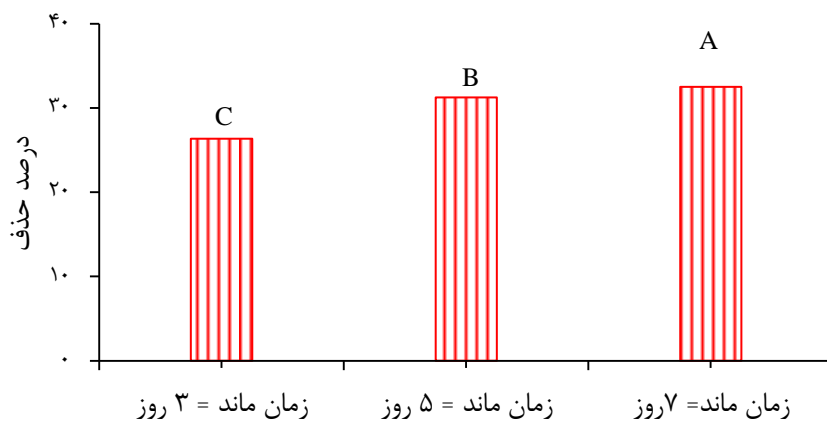


شکل ۶. مقایسه میانگین اثر نوع سامانه بر درصد حذف BOD₅ (حروف متفاوت دارای اختلاف معنی دار)

وجود دارد ($p < 0.05$). نتایج نشان داد اعمال زمان ماند ۷ روز با راندمان حذف $32/53 \pm 11/20$ درصد نسبت به زمان ماند ۵ روز با راندمان حذف $31/27 \pm 10/86$ و زمان ماند ۳ روز با راندمان فسفات $26/35 \pm 9/46$ دارای کارایی بالاتری بود. در این راستا، Picard و همکاران (۲۰۰۵) اظهار نمودند، یکی از مهمترین پارامترهای طراحی که در کارایی سیستم‌های تالابی موثر هستند زمان ماند هیدرولیکی می‌باشد، زیرا این سیستم‌ها، به انرژی‌های طبیعی مثل نورخورشید (فتوسنتز و اکسیژن دهی) و باد (تسهیل انتقال اکسیژن به درون آب) وابستگی شدید دارند و در نتیجه اعمال زمان ماند کافی، استفاده از این انرژی‌ها تسهیل می‌یابد.

همانطور که از شکل ۶ مشخص می‌باشد، از لحاظ آماری، بین سه سامانه تالابی در حذف BOD₅ فاضلاب کشاورزی در سطح اعتماد ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد ($p < 0.05$). مطابق این، سامانه‌های حاوی گیاه وتیور به صورت کشت شناور با بازده $51/04 \pm 4/83$ درصد دارای کارایی بیشتری در حذف BOD₅ نسبت به سامانه‌های ریشه در خاک با بازده $37/60 \pm 3/72$ درصد و سامانه فاقد گیاه (شاهد) با بازده $22/50 \pm 2/81$ درصد بود. شکل ۷ مقایسه میانگین اثر زمان ماند بر حذف BOD₅ فاضلاب کشاورزی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۷ مشخص شد، از لحاظ آماری بین زمان ماند های مختلف در حذف BOD₅ فاضلاب کشاورزی در سطح اطمینان ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری



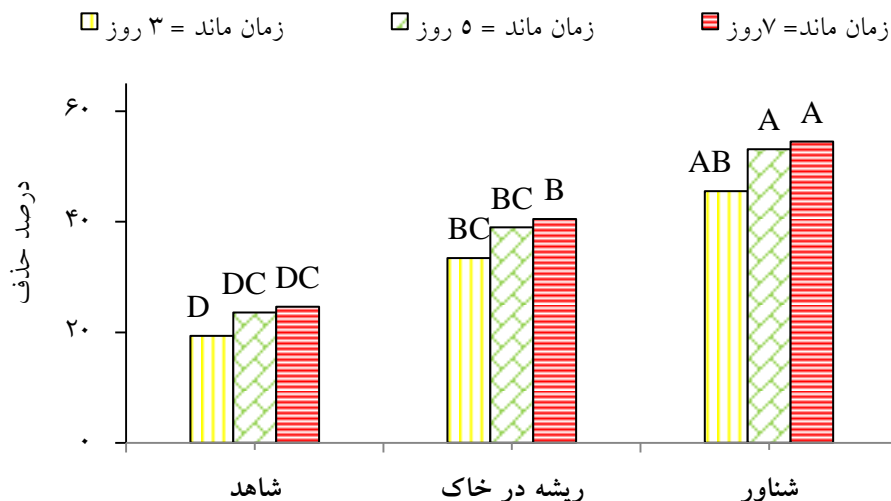
شکل ۷. مقایسه میانگین اثر زمان ماند بر درصد حذف BOD₅ (حروف متفاوت دارای اختلاف معنی دار)

لازم به ذکر است، گیاه وتیور یک گیاه چند ساله بوده و نهال مورد استفاده در تحقیق بسیار جوان بود و به علت محدودیت موجود در پایلوت مورد استفاده، توسعه گیاه با محدودیت مواجه گردید. لذا انتظار می‌رود با مهیا نمودن شرایط مناسب رشد و توسعه گیاه و برطرف نمودن کاستی‌های موجود در تحقیق، بازده تصفیه در حد قابل قبولی ارتقا یافته و استفاده از این سیستم در صنایع کشاورزی و صنعتی مقرون به صرفه گردد.

مشابه این تحقیق، مطالعات Knight و Kadlec (۱۹۹۶) نشان داد، درجه حرارت به واسطه تاثیر روی میزان فرآیندهای فیزیولوژیکی و رشد گیاهان، باعث افزایش بازده جذب مواد آلی می‌شود. همچنین فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی متاثر از دما بوده و با اثرگذاری روی میزان فعل و انفعالات شیمیایی و سوخت ساز ارگانیزم‌های آبزی باعث افزایش جمعیت آنها و ازدیاد اکسیداسیون مواد آلی می‌شود. نتایج تحقیقات Kropfelova (۲۰۰۸) در جمهوری چک نشان داد که در فصل گرما (تابستان) بازده حذف BOD نسبت به فصل سرما (تابستان) بیشتر است.

. همچنین با گذشت زمان از شروع آزمایش و افزایش سن تالاب مصنوعی، به علت افزایش جمعیت میکروبی در محیط تالاب، نرخ حذف مواد آلی افزایش می‌یابد. شکل ۸، اثر متقابل نوع سامانه و زمان ماند، بر درصد حذف BOD₅ را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۸، اثر متقابل بین نوع سامانه و زمان ماند در میانگین درصد حذف BOD₅ نشان داد، برای سامانه‌های شناور و شاهد در زمان ماند ۷ و ۵ روز و برای سامانه‌های ریشه در خاک در زمان‌های ماند ۳ و ۵ روز، در سطح اطمینان ۹۵ درصد، اختلاف معنی‌داری وجود ندارد ($p>0.05$). همچنین نتایج نشان داد، در سطح اعتماد ۹۵ درصد، تنها در بین سامانه‌های شناور، در زمان ۷ و ۵ روز با سامانه‌های ریشه در خاک در زمان ماند ۷ روز و سامانه ریشه در خاک در زمان ماند ۷ روز با سامانه شاهد در تمام زمان‌ها اختلاف معنی‌داری مشاهده شده است ($p<0.05$). براین اساس، بیش‌ترین بازده حذف BOD₅ در سامانه شناور و در زمان ماند ۷ روز با مقدار ۵۴/۵۰ درصد و کم‌ترین بازده حذف BOD₅ در سامانه شاهد با زمان ماند ۳ روز به میزان ۱۹/۳۱ حاصل شد.



شکل ۸. مقایسه اثر متقابل نوع سامانه و زمان ماند بر درصد حذف فسفات (حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار)

همکاران (۱۳۸۹)، نشان داد، راندمان حذف BOD₅ با افزایش زمان ماند هیدرولیکی بهبود یافت. همچنین مشخص شد، بازده حذف BOD در سامانه‌های حاوی گیاه بیشتر از سامانه فاقد گیاه (شاهد) بود. مشابه این تحقیق، کلومجک و همکار (۲۰۰۵)، در تحقیقی که برای حذف BOD₅ فاضلاب با استفاده از سامانه‌های تالابی انجام دادند، نتیجه گرفتند، افزایش زمان ماند از ۲ روز به ۵ روز باعث افزایش بازده حذف مواد آلی از ۶۹/۵ درصد به ۷۸/۹ درصد می‌رسد. استنباط می‌شود، در سیستم تالابی حاضر، در صورت وجود محدودیت زمان ماند و پذیرش بازده حذف BOD₅ تا این حد یا استفاده از سامانه دیگری برای جبران کمبود بازده تصفیه (به طور مثال استفاده از سیستم های تصفیه تالابی هیبریدی) اعمال زمان ۵ روز کافی بوده و می‌توان از اعمال زمان ماند ۷ روز صرفنظر نمود. با توجه به اینکه میزان بار آلودگی BOD₅ وارده به سیستم کمتر از ۱۳۵ میلی‌گرم بر لیتر بود لذا تعمیم این نتایج برای مقادیر BOD₅ بالاتر و کفایت زمان ماند ۵ روز برای حصول بازده حذف مطلوب نیاز به بررسی بیشتری دارد.

Calheiros و همکاران (۲۰۰۷) کارایی دو گونه گیاهی فراگمیت و تیفا در حذف آلاینده‌های آلی فاضلاب کارخانه چرم‌سازی را بررسی کردند. در این تحقیق راندمان حذف BOD₅ ۴۱ درصد در زمان ماند ۳/۴ روز و ۵۸ درصد در زمان ماند ۶/۸ روز به دست آمد (۶) با انجام آنالیز آماری داده‌های استخراج شده مشخص شد که انتخاب ترکیب مناسب زمان ماند و نوع سامانه تالاب مصنوعی باعث اختلاف معنی‌دار در بازده این سامانه‌ها خواهد شد. در این تحقیق حالت بهینه برای اخذ بالاترین نرخ حذف BOD₅ در زمان ماند ۷ روز و در سامانه حاوی گیاه وتیور رخ داد. داده‌های حاصل از تعیین درصد حذف BOD₅ سامانه‌ها نشان داد، این مقادیر نسبت به نتایج سایر محققین از مقدار کمتری برخوردار است.

Kadlec (۲۰۰۳) نیز در دو سامانه تالاب‌های مصنوعی از نوع جریان افقی در مینه‌سوتای آمریکا، بازده حذف BOD را در فصول گرم (تابستان و پاییز) بیشتر از فصول سرد (بهار و تابستان) مشاهده نمودند. نتایج نشان داد، سامانه‌های فاقد گیاه به علت عدم انتقال اکسیژن به درون آب و تامین اکسیژن مناسب تجزیه مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها، بازده کمتری در حذف BOD₅ از خود نشان دادند اما سامانه‌های حاوی گیاه، به خصوص سامانه شناور به علت اکسیژن رسانی بهتر به میکروارگانیسم‌ها، عملکرد بیشتری در حذف مواد آلی و کاهش BOD₅ داشتند. نتایج Tanner و همکاران (۱۹۹۵) مشابه نتایج این تحقیق نشان داد، حذف BOD₅ در سامانه‌های کشت شده بیشتر از سامانه‌های کشت نشده (شاهد)، خصوصاً در جریان فاضلاب با بار آلودگی بالا بود. در گزارش‌های دیگر منتشر شده توسط سایر محققین Hammer (۱۹۹۲) و Brix (۲۰۰۷) به خوبی نشان داده شده است که، گیاهان آبی با استفاده از چندین مکانیزم، کارایی تصفیه تالاب‌ها را افزایش می‌دهند. به علاوه، تجمع میکروارگانیسم‌ها در مجاورت ریشه، تجزیه مواد آلی و کاهش BOD را تسریع می‌کند. به طور کلی در سیستم‌های تالابی، حذف BOD به وسیله فعالیت میکروبی و رشد بیوفیلم^۱ (ترکیب پیچیده از موجودات زنده میکروسکوپیکی مثل جلبک و باکتری) بر روی سطوح ریشه و ساقه گیاهان صورت می‌گیرد. علاوه بر این، تالاب‌ها، شرایط سکون برای ترسیب املاح معلق را نیز فراهم می‌نمایند.

نتایج حاصل از بررسی اعمال زمان ماند نشان داد، درصد حذف BOD₅ در زمان ماند ۷ روز بهتر از زمان ماند ۵ روز و زمان ۳ روز بود. مشابه تحقیق حاضر، بررسی‌های تعیین بازده حذف BOD₅ یک نمونه فاضلاب مصنوعی در سامانه‌های نی‌زار مصنوعی توسط افروس و

^۱ Biofilm

نشده است. در این تحقیق به برخی از آنها اشاره و با نتایج سایر محققین مقایسه شد.

نتایج نشان داد، در همه دوره‌ها، BOD_5 فاضلاب مورد استفاده در آزمایش بالاتر از حد استاندارد مجاز سازمان حفاظت محیط‌زیست در تخلیه فاضلاب به آب‌های سطحی (۳۰ میلی‌گرم بر لیتر) قرار داشت و کاربرد سیستم تصفیه فاضلاب به منظور کاهش این آلودگی ضروری بود. با گذشت زمان از انجام تحقیق غلظت BOD_5 جریان فاضلاب ورودی به سامانه‌ها افزایش یافت. علت این پدیده را می‌توان در افزایش دمای محیط و آب و همچنین ازدیاد مواد قندی حاصل از شستشوی ساقه‌های نیشکر دانست. همچنین بازده حذف BOD_5 نیز با گذشت زمان و افزایش دمای محیط و آب افزایش یافت

سیاسگزاری:

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش با توجه به مساعدت‌های فراوان مدیران، کارشناسان و پرسنل شرکت کشت و صنعت کارون بوده است. بدینوسیله کمال تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارم.

استنباط می‌شود، با توجه به سن پایین سامانه و گیاهان واقع در آن، و نیاز به سازگاری بیشتر سیستم با فاضلاب مورد استفاده، نتایج حاصله کارائی بالایی را نشان نمی‌دهد. با مقایسه سامانه حاوی گیاه و شاهد مشخص گردید، گیاه و تیور قادر است غلظت بالای BOD_5 فاضلاب ورودی به سامانه‌های تالابی از این نوع را تحمل نموده و در کاهش آلودگی آن‌ها موثر باشد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، با رسوب ذرات حاوی مواد آلی در سامانه‌های تالاب مصنوعی و تخریب ترکیبات کربن در فرآیند متابولیسم، می‌توان BOD_5 را حذف نمود (Mitsch, 1994). در مورد کارایی حذف BOD_5 از فاضلاب‌های مختلف در دنیا، تحقیقات متعددی صورت گرفته است اما مقایسه بین سامانه تالاب شناور و ریشه در خاک حاوی گیاه و تیور برای کاهش BOD_5 مزارع نیشکر در اقلیم گرمسیری خوزستان انجام

فهرست منابع

افروس، ع. ش.، منشوری، م.، لیاقت، ع. و بشلیده، ح. ۱۳۸۹. بررسی راندمان حذف BOD در سامانه تالاب های مصنوعی حاوی دو گونه گیاه آبزی (*Typha latifolia*) و (*Phragmites australis*) مطالعه موردی: دزفول. فصلنامه علمی پژوهشی

تالاب. ۲ (۵): ۱۳-۱۹

- Allen, W.C., Hook, P.B., Biederman, J.A. and Stein, O.R. 2002. Temperature and wetland plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation. *Journal of Environmental Quality*, 31: 1010-1016.
- Beutel, M.W., Newton, C.D., Brouillard, E.S. and Watts, R.J. 2009. Nitrate removal in surface-flow constructed wetlands treating dilute agricultural runoff in the lower Yakima Basin. *Washington. Ecological Engineering*, 35: 1538-1546
- Brix, H. 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetland *Water Sci. Technol*, 35: 11-17.
- Calheiros, C.S.C., Rangel, A.O.S.S. and Castro, P.M.L. 2007. Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Res*, 41: 1790-1798.
- Crites, R.W., and Tchobanoglous, G. 1998. *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill Book Company, New York 1084 pages
- Crites, R.W., Middlebrooks, J., and Reed, S.C. 2006. *Natural Wastewater Treatment Systems*. CRC press. Boca Raton.
- Greenfield, J.C. 1988. *Vetiver grass (Vetiveria Zizanioides): A method of vegetative soil and moisture conservation*. seminar on the vetiver system presented at the World Bank. Washington D.C.
- Hammer, D.A. 1992. Designing constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint source pollution. *Ecol. Eng.* 1: 49-82.
- Kadlec, R.H. and Knight, R.L. 1996. *Treatment Wetlands*. CRC Press. Boca Raton. Florida. 893 pp.

- Kadlec, R.H. and Reddy, K. R. 2001. Temperature effects in treatment wetlands. *Water Environment Research*, 5(73): 543-557
- Kadlec, R.H. 2003. Status of treatment wetlands in North America. Proc. Conf. The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. Lisbon. Portugal. ICN and INAG. 363-401.
- Kansiime, F. and Bruggen, J.J.A.V. 2001. Distribution and retention of faecal coliforms in the Nakivubo wetland in Kampala, Uganda. *Water Science and Technology*, 12 (44): 199-206.
- Katsenovicha, Y.P., Hummel-Batistab, A., Ravineta, A.J. and Millera. J.F. 2009. Performance evaluation of constructed wetlands in a tropical region. *Ecological Engineering*, 35: 1529-1537.
- Klomjek P. and Nitorisavut S, 2005. Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions. *Chemosphere* 58: 585-593.
- Kotti, P.I., Gikas, D.G. and Tsihrintzis, V.A. 2010. Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems. *Ecol. Eng.*, 36: 862-875.
- Kropfelova, L. 2008. Constructed Wetland Brehov: Three Years of Monitoring, in: *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands*. Springer Science 181-190.
- Greenway, M. and Woolley, A. 1999. Constructed wetlands in Queensland: Performance efficiency and nutrient bioaccumulation. *Ecol. Eng.*, 12: 39-55.
- Mitsch, W.J. 1994. *Global wetlands: old world and new*. Editor (ed.). Elsevier. Philadelphia. 309-324
- Picard, C., Fraser, H.L. and Steer, D. 2005. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms. *Biores. Technol.*, 96 (9): 1039-1047
- Prabu, P.C. and Udayasoorian, C.U. 2007. Treatment of pulp and paper mill effluent using constructed wetland. *EJEAFChe*, 6: 1689-1701.
- Revitt, D.M., Worrall, P. and Brewer, D. 2001. The integration of constructed wetlands into a treatment system for airport runoff. *Water Science and Technology*, 44: 469-476.
- Steer, D., Fraser, L., Boddy, J., and Seibert, B. 2002. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent. *Ecol. Eng.*, 18: 429-440.
- Tanner, C.C., Clayton, J.S. and Upsdell, M.P. 1995. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands—I. Removal of oxygen demand, suspended solids and fecal coliforms. *Water Res.*, 29: 17-26.
- Tanner, C.C. and Headlby, T.R. 2011. Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants. *Ecological Engineering*, 37: 474-486.
- Truong, P.N. 2000. The Global Impact of Vetiver Grass Technology on the Environment. Proceedings of the Second International Conference on Vetiver. Bangkok. Thailand. pp 48-61.
- Vymazal, J. 2002. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecol. Eng.*, 18: 633-646
- Vymazal, J. 2010. *Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands*. Springer. Dordrecht.
- Weragoda, S.K., Jinadasa, K.B.S.N., Zhang, D.Q., Gersberg, R.M., Tan, S.K., Tanaka, N. and Jern, N.W. 2012. Tropical Application of Floating Treatment Wetlands. *Wetlands*, 32: 955-961.