مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۱ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۰
صفحه‌های ۲۹۰-۲۷۵
DOI: 10.22059/jwim.2021.325110.880

مقاله پژوهشی:

عملکرد سیستم وتیور در تصفیه تکمیلی پساب شهری

جهانگیر عابدی کوپایی[۱*]، محمد حسین حکیمیان[۲]، آرمیتا معتمدی[۲]، امیر قدس مطهری[۲]
۱. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶

چکیده

با توجه به کمبود شدید منابع آب در ایران، استفاده از پساب تصفیه‌شده شهری در بخش کشاورزی و آبیاری، روشی مؤثر در برطرف‌نمودن نیاز آبی گیاهان می‌باشد. یکی از روش‌های تصفیه، گیاه‌پالایی ست. گیاه وتیورگراس در این زمینه، توجهات بسیاری را معطوف خود کرده است. پژوهش حاضر به‌منظور بهبود کیفیت فاضلاب شهری توسط گیاه وتیورگراس به‌صورت هیدروپونیک، با هدف استفاده در آبیاری انجام گرفته است. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، انجام شد. مخازنی فایبرگلاسی به حجم ۱۰۰۰ لیتر تهیه و سپس از دو نوع فاضلاب خام و تصفیه شده به‌طور مجزا پر شد. تیمارها شامل دو تراکم چهار و هشت‌تایی، شاهد، هوادهی و بدون هوادهی بودند. در این پژوهش از سه زمان ماند ۳، ۷ و ۱٤ روزه استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بهترین تراکم در انجام پالایش فاضلاب شهری توسط گیاه وتیورگراس، تراکم چهار تایی بوده به‌علاوه روند هوادهی و عدم هوادهی تیمارها تأثیر زیادی بر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده ندارد. در اکثر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده (به‌غیر از BOD_5) مشاهده شد که زمان‌ماند هفت روزه با زمان‌ماند ١٤ روزه تفاوت معناداری ندارد، از همین‌رو بهترین زمان‌ماند نیز هفت‌روزه در نظر گرفته شد. طبق انجام آزمایش‌ها، کارآمدی حذف ترکیبات BOD_5، COD، آمونیوم، نیترات، فسفات و پتاسیم در فاضلاب تصفیه شده و در طی دوره به‌ترتیب ٤٢، ٥٥، ٩١، ٦٦، ٨٩ ٩٧ درصد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: حذف آلاینده‌ها، کشت هیدروپونیک، گیاه‌پالایی، وتیورگراس.

Performance of Vetiver system in complementary municipal wastewater treatment

Jahangir Abedi-Koupai[1*], Mohammad Hossein Hakimian[2], Armita Motamedi[3], Amir Qods-Motahari[4]
1. Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
Received: June, 16, 2021 Accepted: August, 07, 2021

Abstract

Due to the severe water scarcity in Iran, using treated wastewater for irrigation purposes is an effective method to meet the water requirement of plants. One of the methods is phytoremediation. In this field, Vetiver Grass has received growing attention. The aim of the present study is to improve the quality of municipal wastewater by hydroponic Vetiver grass, for applying in irrigation. This research was conducted in a completely randomized design with three replications. Fiberglass tanks with a volume of 1000 liters were prepared, and then filled separately with two types of raw and treated wastewater. Treatments included 4 and 8 plant densities, control, aerated and non-aerated wastewater. Retention times of 3, 7 and 14 days were used. The results showed that the optimal density in the treatment of municipal wastewater by Vetiver grass is a density of 4. Moreover, the aeration and non-aeration process of the treatments does not have much effect on the measured parameters. It should be noted the retention time of 7 days (except for BOD_5) had the best performance with no significant difference with 14 days. The results indicated that BOD_5, COD, ammonia, nitrate, phosphate and potassium were reduced by 42, 55, 91, 66, 89 and 97 per cent, respectively.

Keywords: Hydroponic cultivation, Phytoremediation, Removal of pollutants, Vetiver Grass.

* نویسنده مسئول
Email: koupai@iut.ac.ir

مقدمه

موقعیت، رژیم بارش، میزان بارش دریافتی و شرایط دما موجب حاکمیت اقلیم خشک و نیمه‌خشک در ایران شده است. در کشورهایی با این اقلیم، کمبود و محدودیت منابع آب امری طبیعی است، اما به آن معنی نیست که شرایط فعلی بحران آب فقط زاییده شرایط طبیعی است، بلکه حکایت از نقش مهم و پررنگ عوامل انسانی، دست‌اندازی، زیاده‌خواهی، بی‌برنامگی و اجرای برنامه‌های غلط در ایجاد و عمق این بحران دارد (Alizade, 2004).

در اکثر کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان مانند ایران، منابع آبی روزبه‌روز کمیاب‌تر می‌شود، لذا استفاده از آب‌های نامتعارف ضروری به‌نظر می‌رسد (Keshtkar *et al.*, 2016). منابع آبی نامتعارف به آن دسته از آب‌هایی گفته می‌شود که از آن‌ها به‌صورت معمول نمی‌توان استفاده کرد و برای به‌کارگیری آن‌ها نیاز به اِعمال سیاست‌های مدیریتی و حفاظتی ویژه می‌باشد. تکنولوژی استفاده از گیاه برای کاهش بار آلودگی، تصفیه، تثبیت و کنترل کردن محیط‌های آلوده، دانشی جدید و تا حدی ناشناخته است. به‌طور اختصاصی منظور از تکنولوژی گیاهی، جذب آلودگی یا کنترل آن با استفاده از گیاهان می‌باشد. بعضی از این تکنیک‌ها به‌دلیل هزینه‌های کم و ایجاد محیط طبیعی زیبا، مورد توجه قرار گرفته‌اند (Musavi *et al.*, 2014).

سیستم وتیور (VS) براساس کاربرد گیاه وتیور *Vetiver zizanioides* L. Nash می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعات چند دهه گذشته این موضوع را روشن می‌کند که این سیستم نه‌تنها نقشی حیاتی در مدیریت زمین‌های کشاورزی ایفا می‌کند، بلکه در چند سال اخیر استفاده از آن در حوضه حفاظت از محیط زیست، به‌ویژه در زمینه تصفیه فاضلاب و محل‌های دفن زباله‌های جامد، افزایش یافته است. امروزه این سیستم به‌عنوان یک تکنیک مهندسی زیستی برای پایدارسازی شیب‌های تند، احیای اراضی، جلوگیری از فرسایش خاک، تصفیه آب‌های آلوده و هرزآب‌ها و سایر اهداف حفاظتی به‌طور وسیعی به‌کار می‌رود.

نتایج پژوهشی توسط Akbarzadeh *et al.* (2015) مبنی بر بررسی عملکرد گیاه وتیور در حذف مواد مغذی از فاضلاب، نشان داد به‌طور متوسط کارآمدی حذف ترکیبات نیتروژن‌کل، فسفرکل و میزان اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در زمان ماند چهارروزه به‌ترتیب ۹۱، ۹۷ و ۷۵ درصد بود. در این دوره مطالعاتی، میزان جذب نیتروژن و فسفرکل در برگ‌ها به‌ترتیب ۱۷ و ۲/۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک و در ریشه‌های گیاه به‌ترتیب ۱۳ و ۱/۸ میلی‌گرم در گرم وزن خشک بود (Akbarzadeh *et al.*, 2015).

Pngthornpruek (2017)، از گیاه وتیور را به‌صورت شناور روی آب در عمق‌های ۱۰، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری جای داده تا عمق مناسب برای کاهش پارامترهای COD و BOD را بررسی کند. در نهایت این نتیجه به‌دست آمد که پارامترهای ذکرشده به‌ترتیب تا ۸۷ و ۸٤ درصد، در عمق ۳۰ سانتی‌متری کاهش یافته‌اند و گیاه در این عمق بیش‌ترین میزان حذف را داشته است (Pngthornpruek, 2017).

Kusin *et al.* (2018) نیز از سیستم جزیره شناور تشکیل‌شده از گیاه وتیور به‌مدت دو ماه استفاده کرده و میزان بهبود پارامترهای کیفی پساب را موردبررسی قرار دادند. در نهایت به این مهم دست یافتند که استفاده از این سیستم توانایی افزایش اکسیژن محلول آب را تا ۹۲ درصد، حذف COD تا ۷۷ درصد و نیترات را تا ۷۳ درصد ممکن می‌سازد (Kusin *et al.*, 2018).

پژوهشی دیگر توسط Abedi-Koupai *et al.* (2018)، با هدف بررسی رفتار گیاه وتیور به‌عنوان یک گیاه مقاوم به شوری، در شوری‌های مختلف و هم‌چنین بررسی میزان هدایت الکتریکی زه‌آب، مطالعه‌ای در قالب یک طرح آزمایش کاملاً تصادفی به شکل چندعاملی با مشاهدات تکراری طی زمان انجام شد. تیمارهای آزمایش در سه

سطح شوری (۱، ۱۰ و ۱٤ دسی‌زیمنس برمتر) و دو سطح تراکم کشت گیاه (۱۰ بوته و ۲۰ بوته وتیور) در نظر گرفته شدند. تغییرات پارامترهای هدایت الکتریکی و میزان رشد گیاه در زمان‌ماندهای ۳، ۷ و ۱٤ روز اندازه-گیری شد. نتایج نشان داد گیاه وتیور به‌خوبی در شوری ۱٤ دسی‌زیمنس برمتر رشد نمود. تراکم‌های ۱۰ و ۲۰ بوته گیاه به‌دلیل رشد زیاد گیاه با هم تفاوت معناداری از نظر جذب آلاینده‌ها نشان ندادند. هم‌چنین گیاه وتیور قادر است در مدت ۱٤ روز هدایت الکتریکی زه‌آب را به میزان ۱۵ درصد کاهش دهد (Abedi-Koupai *et al.*, 2018).

در یکی از جدیدترین پژوهش‌ها، Abedi-Koupai *et al.* (2020) مطالعه‌ای در راستای بهبود کیفیت شیرابه زباله با استفاده از کشت هیدروپونیک گیاهان وتیور گراس و نی انجام دادند. در تیمارها از دو تراکم گیاهی (دو تایی و چهارتایی بر ۹٦۰ سانتی‌متر مربع) و تیمار شاهد (بدون گیاه) و چهار زمان ماند (۳، ۷، ۱٤ و ۲۱ روز)، در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان کاهش COD، BOD، فسفات و نیترات پس از مدت ۲۱ روز برای مخزن حاوی گیاه وتیور به‌ترتیب ٦۸، ٦۰، ۸۲ و ۸۳ درصده بوده است که این نتایج تأییدکننده پتانسیل خوب این گیاه در بهبود کیفیت شیرابه محل دفن پسماند است (Abedi-Koupai *et al.*, 2020).

با توجه به نتایج پژوهش‌ها و مطالعات صورت‌گرفته می‌توان چنین بیان کرد که تصفیه انواع فاضلاب‌های شهری و صنعتی توسط گیاه وتیور در بسیاری از کشورها انجام شده است، اما اکثر آن‌ها در محیط خاک و با جریان زیرسطحی بوده‌اند. لذا کاربری گیاه با هدف بهبود کیفی منابع آبی و پالایش پساب به‌عنوان واحد تکمیلی و یا شناور در دریاچه‌ها برای حذف آلاینده‌ها در کشور ما، از نوآوری برخوردار بوده و کم‌تر موردتوجه قرار گرفته است.

با توجه به مطالب بیان‌شده و عملکرد مناسب گیاه وتیور در تصفیه پساب شهری، این پژوهش در راستای بررسی امکان کشت گیاه وتیورگراس در محیط پساب شهری به‌صورت هیدروپونیک و هم‌چنین ارزیابی کارایی آن در حذف و پالایش ترکیبات مغذی و آلاینده‌ها، به منظور استفاده در مصارف کشاورزی و آبیاری، انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تصفیه پساب با استفاده از تکنولوژی گیاه‌پالایی انجام شد. بدین منظور از دو نوع فاضلاب خانگی تصفیه‌شده و خام استفاده شد. فاضلاب تصفیه‌شده از خروجی واحد ته‌نشینی و زلال‌ساز ثانویه، بعد از واحد هوادهی لاگون‌های فاضلاب دانشگاه صنعتی اصفهان، انتخاب شد. وجود بار بیش‌تر آلاینده‌ها و مواد معلق در فاضلاب ورودی باعث شد تا از فاضلاب خام نیز استفاده شود. انتخاب گونه علف وتیور محدود به نتایج مطالعات نظری و گونه تحت کشت در ایران است. علف وتیور از نوع *Vetiver zizanioides* L. Nash که عملکرد اثبات‌شده‌ای در تصفیه پساب داشته و راندمان بالاتری نسبت به گونه‌های دیگر دارد، به‌عنوان گونه موردمطالعه استفاده شد (Darajeh *et al.*, 2016). بنابراین گیاه مورد نیاز به تعداد ۸۰ گلدان (۳۲۰ بوته وتیور) از استان خوزستان تهیه و به دانشگاه صنعتی اصفهان منتقل شد. قابل ذکر است که گیاهان تهیه شده بعد از شسته‌شدن ریشه‌ها و جدایی آن‌ها از خاک به‌منظور مستقرکردن آن‌ها در محیط هیدروپونیک، به‌مدت دو ماه درون فاضلاب تهیه‌شده از واحد تصفیه‌خانه دانشگاه صنعتی اصفهان به سبب سازگاری با محیط و جداشدن گل و لای محصور بین ریشه‌ها، نگه‌داری و پرورش داده شدند. به‌دلیل استقرار گیاهان، یونولیت‌هایی به قطر دهانه مخازن فراهم شد و آن‌ها به تعداد تراکم‌های موجود در طرح سوراخ و

گیاهان به‌منظور شناوربودن در پساب مربوطه جای‌گذاری شد. این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، اجرا شد. دلیل استفاده از آزمایش فاکتوریل بررسی دو عامل جداگانه گیاه و فاضلاب بود. هم‌چنین دو تراکم چهار (۱۶ گیاه وتیور) و هشت‌تایی (۳۲ گیاه وتیور)، شاهد، هوادهی و بدون هوادهی برای تیمارها در نظر گرفته شد. هوادهی مخازن توسط کمپرسور هوا و با استفاده از تایمر و شیر برقی انجام می‌گرفت که در هر ۱۰ دقیقه به‌مدت یک دقیقه مخازن را هوادهی می‌کرد. شکل (۱) نحوه چیدمان مخازن حاوی گیاهان وتیور را نشان می‌دهد.

به‌منظور بررسی روند تغییرات پارامترهای کیفی آب اعم از BOD، COD، آمونیوم، نیترات، فسفات، کدورت، پتاسیم، سدیم، کلسیم+ منیزیم و pH، نمونه گیری از تیمارهای آزمایشی در زمان‌های ۳، ۷ و ۱٤ روز انجام شد. سطوح متغیرها در جدول (۱) ارائه شده است. هم‌چنین در جدول (۲) طرح فاکتوریل تیمارها برای مطالعه حذف و پالایش آلاینده‌ها در محیط پساب به‌صورت هیدروپونیک، معرفی شده است. لازم به ذکر است که جدول (۲) برای هر دو نوع فاضلاب تصفیه شده و خام اجرا شد.

به‌منظور استقرار گیاهان و انجام مطالعات، گیاهان در مخازنی به‌صورت استوانه‌ای به حجم کلی ۱۰۰۰ لیتر (۱ مترمکعب) از جنس فایبرگلاس مستقر شدند. بدین منظور یونولیت‌هایی به قطر دهانه مخازن فراهم شد و آن‌ها به تعداد تراکم‌های موجود در طرح سوراخ و گیاهان به‌منظور شناوربودن در پساب در آن‌ها جایگذاری شد. لازم به ذکر است که تمامی روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای ذکرشده براساس استاندارد APHA انجام شد (APHA, 2013). برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای Excel و SAS، استفاده شد. طرح آزمایش استفاده‌شده، کاملاً تصادفی چند عاملی با نمونه‌گیری در یک عمق خاص بود. پس از تعیین وجود یا عدم وجود اختلاف بین گروه‌های آزمون (بررسی معنی‌داربودن آزمون در جدول آنالیز واریانس)، مقایسه میانگین بین گروه‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)، در سطح اطمینان ۵ درصد پرداخته شد.

Table 1. Variables used in this study

Variable	Level
Untreated wastewater	Raw
Treated wastewater	Purified (Pur)
Plant density (4)	Plant
Plant density (8)	Plant
Aerobic tanks	Aerobic (Ar)
Anaerobic tanks	Anaerobic (An)

Table 2. Factorial design of variables used in this study

Number	Treatment	
1	An 0	Anaerobic control tank
2	Ar 0	Aerobic control tank
3	An 4	Anaerobic tank with density of 4 plants
4	Ar 4	Aerobic tank with density of 4 plants
5	An 8	Anaerobic tank with density of 8 plants
6	Ar 8	Aerobic tank with density of 8 plants

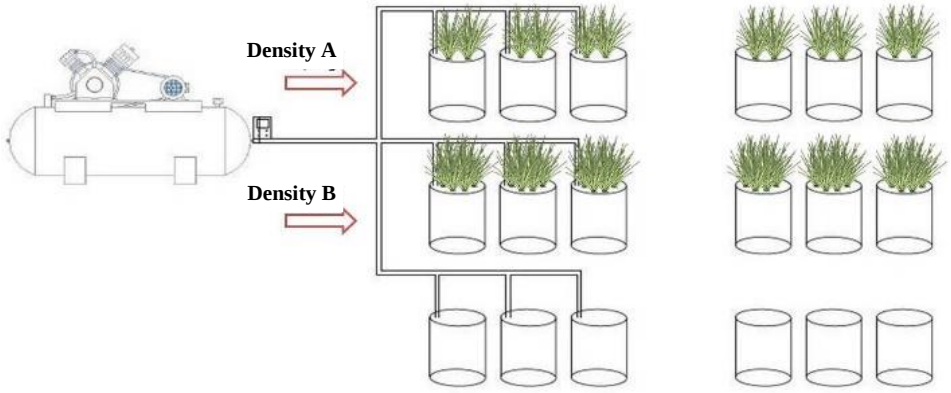

Figure 1. The schematic design of tanks containing Vetiver grass

نتایج و بحث

میزان حذف پارامترهای اندازه‌گیری‌شده از محیط پساب

میزان حذف آلاینده‌ها از محیط پساب در چهار فاکتور نوع فاضلاب، تراکم، تیمار هوادهی و زمان و اثرات متقابل آن‌ها سنجش شد. جدول (۳) آنالیز واریانس کلیه پارامترهای اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل پارامترهای اندازه‌گیری‌شده نشان داد که در اکثر ترکیبات سه فاکتور نوع فاضلاب، تراکم و زمان، دارای اثر معناداری در سطح ۱ درصد می‌باشند، چرا که فاضلاب خام و فاضلاب تصفیه‌شده دارای ترکیبات مختلفی بوده که در نتیجه فاضلاب تصفیه‌شده به‌دلیل وجود لاگون‌های هوادهی و ته‌نشینی دارای کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی بهتری نسبت به فاضلاب خام می‌باشد. تراکم و حجم ریشه‌های بیش‌تر در گاهی موارد، سبب کاهش چشم‌گیر برخی پارامترها شده و کاربرد زمان‌ماند نیز به این مهم افزوده گشته است.

Table 3. Variance analysis of measured parameters

Variables	df	Mean squares				
		BOD_5	COD	NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{3-}
Wastewater	1	6548.91**	45023.73**	5371.42**	131.45**	15.67**
Density	2	5517.96**	39461.30**	1593.31**	488.85**	79.36**
Aerobic treatment	1	18.67^{ns}	3069.16^{ns}	197.87**	0.06^{ns}	5.15^{+}
Wastewater × Density	2	209.95*	4664.09^{ns}	3.81^{ns}	3.69^{ns}	0.49^{ns}
Wastewater × Aerobic treatment	1	1136.24**	709.88^{ns}	0.53^{ns}	1.84^{ns}	0.36^{ns}
Density × Aerobic treatment	2	121.86^{+}	968.10^{ns}	11.34^{ns}	5.05^{ns}	0.52^{ns}
Wastewater × Density × Aerobic	2	198.58*	596.65^{ns}	23.16^{ns}	6.92^{ns}	1.60^{ns}
Main error	24	47.47	2036.05	11.62	4.11	1.25
Time	3	10345.2**	91913.03**	9056.99**	468.15**	114.6**
Wastewater × Time	3	1556.81**	22723.66**	822.18**	18.18**	1.36^{ns}
Density × Time	6	886.03**	4845.27**	260.11**	92.49**	9.65**
Aerobic treatment × Time	3	100.96^{ns}	1472.55^{ns}	25.79**	1.93^{ns}	0.99^{ns}
Wastewater × Density × Time	6	34.75^{ns}	1668.16*	12.24**	9.54*	0.52^{ns}
Wastewater × Aerobic treatment × Time	3	196.57*	942.01^{ns}	8.56^{+}	0.86^{ns}	0.29^{ns}
Density × Aerobic treatment * Time	6	125.76*	176.64^{ns}	13.24**	14.47**	0.55^{ns}
Wastewater × Density × Aerobic × Time	6	284.06**	786.34^{ns}	6.51^{ns}	1.63^{ns}	0.29^{ns}
Total error	72	57.99	683.74	4.52	3.70	1.28
CV (%)		9.96	18.55	9.6	16.74	32.63

ns: Not significant; +: Significant at 10 percent level; *: Significant at 5 percent level ; **: Significant at 1 percent level

Continued table 3. Variance analysis of measured parameters

Variables	df	Mean squares				
		Turbidity	K	Na	Ca + Mg	pH
Wastewater	1	600.37**	167.15**	3680.27*	4.27*	0.54**
Density	2	941.62**	766.99**	7808.48**	12.87**	6.49**
Aerobic treatment	1	39.72^{+}	116.10**	3.36^{ns}	1.60^{ns}	0.27**
Wastewater × Density	2	58.08*	39.28**	1522.32^{ns}	0.55^{ns}	0.34**
Wastewater × Aerobic treatment	1	8.31^{ns}	12.98*	825.40^{ns}	0.36^{ns}	1.07**
Density × Aerobic treatment	2	0.69^{ns}	8.83*	42.72^{ns}	0.58^{ns}	0.03^{ns}
Wastewater × Density × Aerobic	2	33.36^{+}	1.39^{ns}	642.81^{ns}	1.49^{ns}	0.15*
Main error	24	11.98	2.68	916.33	0.97	0.04
Time	3	5236.19**	928.67**	2177.05**	28.02**	1.13**
Wastewater × Time	3	155.94**	16.84**	754.58**	1.85**	0.05^{ns}
Density × Time	6	139.09**	195.68**	1149.79**	1.84**	1.12**
Aerobic treatment × Time	3	5.07^{ns}	17.55**	31.70^{ns}	0.47^{+}	0.04^{ns}
Wastewater × Density × Time	6	21.51**	8.39**	239.10^{ns}	0.25^{ns}	0.06*
Wastewater × Aerobic treatment × Time	3	10.16^{ns}	4.12**	144.96^{ns}	0.24^{ns}	0.13**
Density × Aerobic treatment * Time	6	3.21^{ns}	3.33**	19.42^{ns}	0.53*	0.03^{ns}
Wastewater × Density × Aerobic × Time	6	6.58^{ns}	2.69**	281.72^{ns}	0.72**	0.03^{ns}
Total error	72	6.18	0.93	175.44	0.19	0.03
CV (%)		15.76	6.14	10.34	8.28	2.19

ns: Not significant; +: Significant at 10 percent level; *: Significant at 5 percent level ; **: Significant at 1 percent level

هم‌چنین نتایج حاکی از آن بود که اثرات متقابل فاکتورها در برخی موارد معنادار نشده در حالی‌که خود فاکتور به تنهایی معنادار بوده است که می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که خود فاکتور به تنهایی معنادار است اما روند تغییرات آن با فاکتور دیگر معنادار نیست. به این معنی که شیب نمودارهای حاصله این فاکتورها با همان فاکتور به‌ویژه (که معنادار است) با اثر یا اثرات متقابل آن با فاکتور یا فاکتورهای دیگر متفاوت بوده، اما روند آن‌ها مشابه بوده است. این موضوع نشان‌دهنده کاربری این گیاه به‌عنوان واحد تصفیه تکمیلی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است. هم‌چنین نتایج حاکی از آن بود که اثرات متقابل فاکتورها در برخی موارد معنادار نشده در حالی‌که خود فاکتور به تنهایی معنادار بوده است.

تحلیل غلظت اکسیژن موردنیاز بیوشیمیایی

با توجه به نمودار شکل (۲)، با افزایش زمان‌ماند فعالیت باکتری‌ها در محیط افزایش یافته و در نتیجه تقاضای اکسیژن زیاد می‌شود که این موضوع کاهش BOD5 را در پی دارد. در تیمارهای شاهد به‌جز تیمار Pur-Ar 0 که به‌دلیل انجام هوادهی کاهش محسوسی نسبت به بقیه تیمارهای شاهد داشته، نتایج معناداری مشاهده نشد. در فاضلاب تصفیه‌شده به‌دلیل وجود بار هوادهی در فاصله زمان‌ماند سه روز تغییری نداشته اما در هفت روز بین تیمارهای با تراکم چهار تایی و هشت‌تایی تفاوت معناداری به‌وجود آمده چراکه هر دو هوادهی شدند. این روند برای روز ١٤ افزایش یافته و در این روز تنها بین دو تیمار Pur-An 4 و Pur-Ar 8 تفاوت معناداری مشاهده شد که این موضوع می‌تواند ناشی از جذب بخشی از مواد آلاینده، تجمع باکتری‌ها در ریشه‌های گیاه با تراکم بیش‌تر و هوادهی زیاد آن باشد. در نهایت برای فاکتور فاضلاب تصفیه شده می‌توان کاهش ۵۵ درصدی BOD5 را در روز ١٤ مشاهده کرد.

در فاضلاب خام تقریباً در تیمارهای چهار تایی و هشت‌تایی، تفاوت معناداری از نظر تراکم و هوادهی مشاهده نشد، اما درصد کاهش BOD5 در طی مدت زمان هفت روز به‌طور تقریبی ٣٦ درصد و در ١٤ روز نیز به ٦٩ درصد رسید. اگرچه گیاه به‌خودی‌خود قادر به کاهش BOD5 نیست، اما به‌دلیل حجم زیاد ریشه‌های وتیور و رشد باکتری‌ها در آن و البته اِعمال هوادهی، این پارامتر به‌خوبی کاهش یافته است.

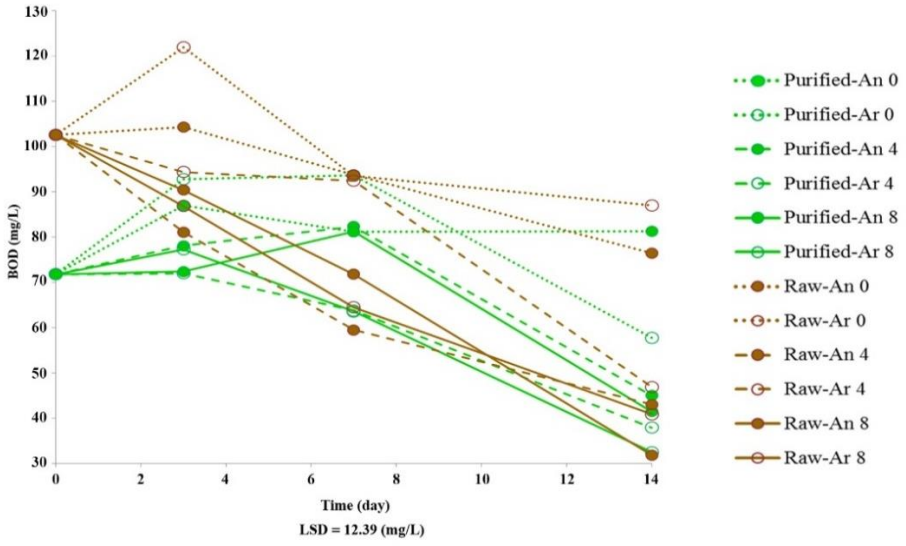

Figure 2. Changes of Biochemical Oxygen Demand (BOD_5) in different treatments through time

میزان کاهش BOD5 در طول زمان در دیگر پژوهش‌ها نیز تأیید شده است. Darajeh *et al.* (2016) با ایجاد یک سیستم شناور از گیاهان وتیور مشاهده کردند که در تراکم ثابت ۳۰ تایی، با افزایش زمان ماند، تغییرات کاهش BOD چشم‌گیر می‌باشد. به‌طوری‌که پس از ۲٤ روز غلظت BOD، از ۱۷۵ به ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت، اما پس از گذشت چهار هفته میزان تصفیه بالغ بر ۹۵ درصد شد (Darajeh *et al.*, 2016). همانند پژوهش انجام‌شده، Angassa *et al.* (2018) نیز از سیستم وتیور برای تصفیه دو نوع پساب با غلظت زیاد و کم استفاده نمود. نکته جالب توجه که مشابه نتیجه این آزمایش است این بود که مقدار تصفیه BOD در پساب با غلظت زیاد در حدود ۲۰ درصد، بیش‌تر از پساب با غلظت کم بود (Angassa *et al.*, 2018).

تحلیل غلظت اکسیژن مورد نیاز شیمیایی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های این پارامتر که در شکل (۳) ارائه شده، به‌طور میانگین کاهش ٤۳ درصدی تیمارهای Pur-Ar 4 و Pur-Ar 8 را در روز سوم نشان می‌دهد. این روند کاهشی در روز چهاردهم افزایش پیدا کرده، به‌طوری‌که در کلیه تیمارهای چهار تایی و هشت‌تایی فاضلاب تصفیه‌شده، به‌طور میانگین به ۵۵ درصد می‌رسد.

قابل ذکر است که تیمارهای شاهد فاکتور فاضلاب تصفیه‌شده، تغییر معناداری در طول دو هفته نداشته‌اند. این در حالی است که تیمارهای شاهد فاضلاب خام نسبت به فاضلاب تصفیه‌شده عملکرد بهتری داشته‌اند. هم‌چنین تیمار Pur-An 0 احتمالاً به‌دلیل رشد جلبک در محیط مخزن مقدار COD آن افزایش پیدا کرده است. درخصوص فاضلاب خام، COD به میزان ۵۰ درصد فقط در روز سوم کاهش پیدا کرده است. اثر حجم بیش‌تر ریشه‌ها در تراکم بیش‌تر در روز هفتم مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که در تیمار Raw-Ar 8 مقدار COD به میزان ۵۳/۷۷ میلی‌گرم بر لیتر از تیمار Raw-Ar 4 کم‌تر شده است. در روز ١٤ تیمارهای حاوی گیاه وتیور فاضلاب خام، بدون تغییر محسوسی نسبت به روز هفتم به‌طور میانگین به میزان ٦۹ درصد کاهش COD را داشته‌اند.

می‌توان نتیجه گرفت، بررسی تغییرات مقادیر حذف BOD_5 و COD، نشان از کارایی بسیار زیاد گونه وتیورگراس در حذف این آلاینده‌ها دارد. بهترین راندمان حذف برای BOD_5 بدون تأثیر نوع فاضلاب، تراکم و تیمار هوادهی، مربوط به زمان‌ماند ١٤ روزه بوده ولی در رابطه با COD فاکتور فاضلاب تصفیه شده و زمان‌ماند هفت‌روزه بدون تأثیر تراکم و تیمار هوادهی، بهترین حالت بود.

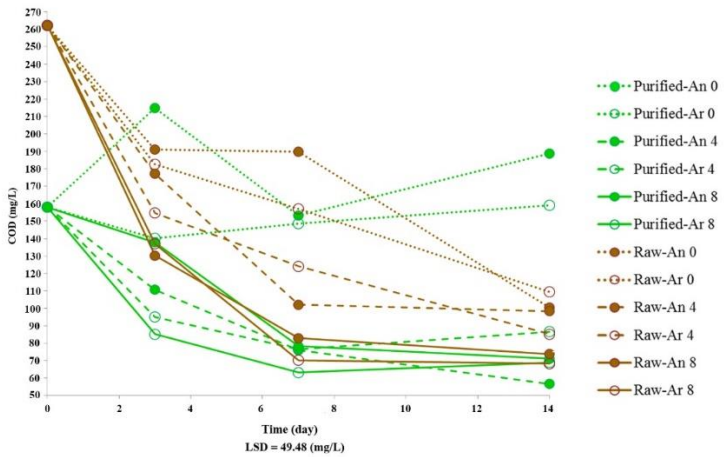

Figure 3. Changes of Chemical Oxygen Demand (COD) in different treatments through time

در غلظت اولیه نسبتاً مشابه با این آزمایش (۱۸۶-۱۶۱ میلی‌گرم بر لیتر)، Giang *et al.* (2020) به حذف ۷۰ درصدی COD پس از یک هفته دست یافتند. Wasita *et al.* (2019) نیز سیستم وتیور را در طرح تصفیه پساب شهری اجرا کرده و نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که غلظت اولیه COD حدود ۳۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، در هفته اول به ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت و تا پایان هفته دوم به ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسید (Wasita *et al.*, 2019). این امر نشان می‌دهد که مطابق با پژوهش انجام‌شده، حذف عمده در هفته اول انجام می‌شود. عملکرد بهتر وتیور در تصفیه COD در پساب با تجمع بیش‌تر آلودگی‌ها در پژوهش‌های دیگری بررسی و اثبات شده است، به‌طوری‌که Darajeh *et al.* (2019) حذف بالای ۷۸ درصدی را در فاضلاب با آلایندگی بیش‌تر و ۷۱ درصدی را در پساب با آلایندگی کم‌تر گزارش نمودند (Darajeh *et al.*, 2019).

بررسی غلظت آمونیوم

از روند موجود در نمودار شکل (٤) چنین نتیجه گرفته می‌شود که وجود گیاه وتیور در روز سوم باعث می‌شود غلظت آمونیوم در هر دو نوع فاضلاب خام و تصفیه‌شده به‌دلیل جذب توسط گیاه و هم‌چنین هوادهی، به میزان قابل‌توجهی کاهش یابد. در تیمارهای شاهد، چه آن‌هایی که هوادهی شده و چه آن‌هایی که بدون هوادهی مصنوعی بوده و تنها با هوای آزاد سطح تماس داشتند، به مرور زمان روند کاهشی در پارامتر آمونیوم مشاهده شد که این شیب کاهشی به مراتب کم‌تر از تیمارهای با گیاه بود. در نهایت در روز ١٤ همه تیمارهای حاوی گیاه اعم از تیمارهای با فاضلاب خام و تصفیه شده توانستند به‌طور میانگین به میزان ۹۲ درصد باعث کاهش آمونیوم شوند. این در حالی است که در تیمارهای شاهد هوادهی شده درهر دو نوع فاضلاب تفاوت معناداری وجود نداشت و به‌طور میانگین به میزان ۸۱ درصد آمونیوم کاهش یافت. پژوهشی از Badejo *et al.* (2018) از پتانسیل مناسب گیاه وتیور در تصفیه آمونیوم گزارش داد. به‌طوری‌که در آزمایشی با غلظت اولیه نسبتاً مشابه با این آزمایش، در روز ۱۲، ۱۸ و ٢٤، پس از شروع آزمایش، غلظت این ماده به‌ترتیب ۸۷، ۹۳ و سپس ۹۸ درصد کاهش یافت (Badejo *et al.*, 2018). در مطالعات دیگری نیز حذف بالای آمونیوم بررسی و گزارش شد (Darajeh *et al.*, 2019; Gholipour *et al.*, 2020).

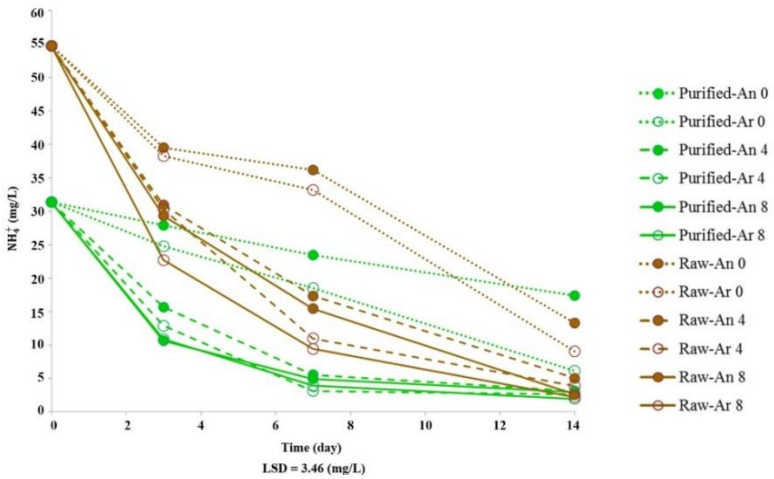

Figure 4. Changes of ammonium (NH4+) in different treatments through time

تحلیل غلظت نیترات

همان‌طورکه در نمودار شکل (۵) مشاهده می‌شود، میزان غلظت نیترات در ورودی فاضلاب خام و خروجی فاضلاب تصفیه شده تفاوت معناداری ندارند. از طرفی مشاهده می‌شود که تیمارهای حاوی گیاه وتیور به‌خوبی سبب کاهش نیترات به‌ویژه در روز هفتم شده‌اند.

در زمان‌ماند سه‌روزه، کارآمدی حذف نیترات در فاضلاب تصفیه‌شده به بیش از ۳۳ درصد و در فاضلاب خام به ۳٦ درصد رسید. این روند در روز هفتم برای تیمارهای با تراکم هشت به اوج خود رسیده و در هر دو نوع فاضلاب به‌طور میانگین به مقدار ٦۹ درصد کاهش نیترات را شاهد بودیم. از علل کاهش این غلظت در مدت زمان هفت‌روزه می‌توان به این موارد اشاره کرد؛ شرایط هوازی، حجم زیاد ریشه‌های وتیور و تراکم بیش‌تر (هشت‌تایی) این گیاه.

همان‌گونه که اشاره شد، تا زمانی که شرایط هوازی غالب باشد، سهم بسیار زیادی از نیتروژن ورودی که به‌صورت آمونیوم است به نیترات تبدیل می‌شود. به‌طورکلی، نیترات حالت پایداری دارد و بدون تبدیل به شکل‌های دیگر نیتروژن به‌راحتی از فاضلاب حذف نمی‌شود. باکتری‌های آتوتروف تحت فرایندهای هوازی، نیتروژن آمونیاکی را به نیترات تبدیل می‌نمایند. فرایند مذکور را نیتریفیکاسیون یا نیترات‌زایی می‌نامند. همه فرایندهای بیولوژیکی حذف نیتروژن دارای یک منطقه هوازی هستند که در آن نیتریفیکاسیون بیولوژیکی اتفاق می‌افتد.

می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت در کاهش آمونیوم و نیترات برای هر دو فاضلاب تصفیه‌شده و خام به‌ترتیب تیمارهای Pur-Ar 4 و Raw-Ar 4 در طول زمان‌ماند هفت‌روزه می‌باشد. تیمارهای بدون گیاه نیز به‌دلیل تبدیل آمونیوم به نیترات، عمل نیترات‌زایی در آن‌ها به وقوع پیوسته، اما چون حاوی گیاه نبوده‌اند و یا به‌دلیل تبخیر از سطح آب و در نتیجه تجمع نیترات، نیترات آن‌ها افزایش پیدا کرده است. در مجموع در مورد روند کاهشی آمونیوم برای همه تیمارها می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که در مرحله اول آمونیوم توسط باکتری نیتروزوموناس به نیتریت اکسید شده و در مرحلهٔ دوم نیتریت توسط نیتروباکتر به نیترات تبدیل می‌شود (Alizade, 2011). به‌دلیل اثرات مخرب نیترات بر سلامت انسان‌ها، پژوهش‌گران بسیاری بر آن شدند تا با استفاده از روش گیاه پالایی و به‌کاربردن گیاه وتیور این پارامتر را حذف کنند که در برخی موارد هم به حذف ۱۰۰ درصدی منجر شد (Badejo *et al.*, 2018).

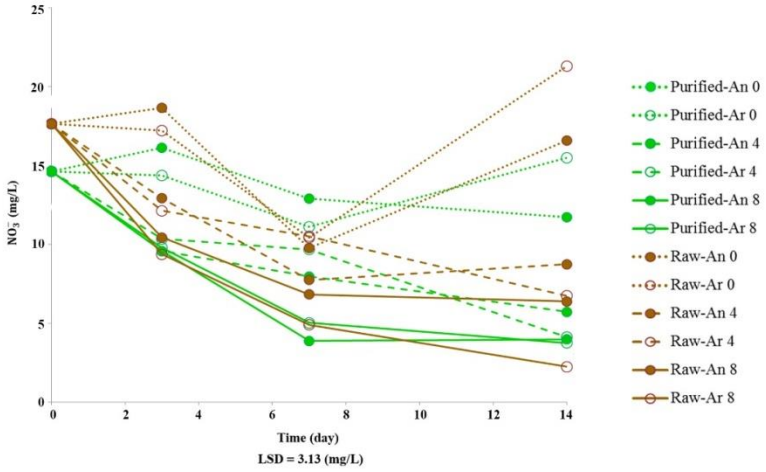

Figure 5. Changes of nitrate (NO3-) in different treatments through time

به‌طورکلی، می‌توان گفت که غلظت آمونیوم به‌واسطه وقوع فرایند نیتریفیکاسیون و تبدیل آن به نیترات به‌طور میانگین در روز سوم ٥٤ درصد، روز هفتم ٨٥ درصد و در روز چهاردهم به ٩١ درصد کاهش رسیده است. هم‌چنین میزان غلظت نیترات به‌دلیل فرایند دی‌نیتریفیکاسیون و هم‌چنین جذب زیاد گیاه وتیور در روز سوم ٣٢ درصد، روز هفتم ٤٠ درصد و در روز چهاردهم به ٦٦ درصد میزان حذف را داشت.

در آزمایش‌های Akbarzadeh *et al.* (2015) نیز میزان حذف این مواد مغذی تقریباً مطابق این پژوهش بوده، چرا که در تحقیقات آن‌ها از پایلوتی با جریان ناپیوسته استفاده شد. هم‌چنین در تحقیقات آن‌ها تراکم پنج‌تایی (پنج بوته) و زمان‌ماند چهارروزه استفاده شد و به‌دلیل این‌که جریان ورودی و خروجی در محیط پایلوت نیمه‌صنعتی (با حجم مفید ٦٠ لیتر) آن‌ها حاکم بود، میزان حذف این ترکیبات در زمان‌ماند چهارروزه مطابق میزان حذف ترکیبات در این پژوهش بوده است (Akbarzadeh *et al.*, 2015). Gholipour *et al.* (2020) با بررسی امکان حذف نیترات از فاضلاب شهری توسط سیستم وتیور با اعمال هوادهی، مشاهده کردند که در ابتدا غلظت این ماده ٥٠ میلی‌گرم بر لیتر بود، با اندازه‌گیری دوباره آن در زمان‌های ماند ٨، ١١ و ١٨ روز، در نهایت حذف ٨٠ درصدی را در روز ١٨، گزارش کردند که مطابق با نتایج این پژوهش می‌باشد (Gholipour *et al.*, 2020).

بررسی غلظت فسفات

میزان حذف فسفات در طی دوره در نمودار شکل (٦) نشان داده شده است.

بر این اساس می‌توان عنوان نمود که غلظت فسفات پس از ١٤ روز به زیر ١ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد که در فاضلاب تصفیه‌شده معادل ٩٢ درصد و در فاضلاب خام برابر ٨٦ درصد کاهش است. البته روند نزولی غلظت فسفات بیش‌تر در روز سوم قابل مشاهده است. هم‌چنین نشان داده شده است که گیاه پس از سه روز، با مصرف مواد مورد نیاز مانند فسفات، باعث حذف آن از محیط شده است.

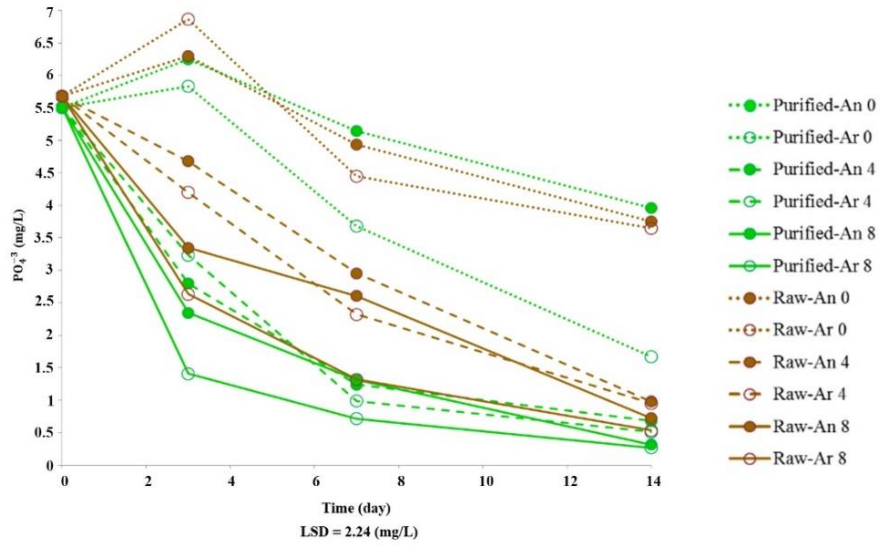

Figure 6. Changes of phosphate (PO43-) in different treatments through time

هم‌چنین در این نمودار می‌توان چنین برداشت کرد که اگرچه گیاه وتیور به‌دلیل مصرف ترکیبات مغذی باعث کاهش فسفات شده ولی اثرات تراکم و هوادهی تیمارهای حاوی گیاه وتیور معنادار نبوده و تنها تفاوت آن‌ها در اختلاف دو نوع فاضلاب است. روند کاهشی در فاضلاب تصفیه‌شده بیش‌تر از فاضلاب خام است. با این‌که تیمار Pur-Ar 0 در طول دوره مقدار غلظت فسفات را کاهش داده اما تفاوت معناداری بین بقیه تیمارهای بدون گیاه نداشته است. پیشنهاد می‌شود که از این گیاه با مدت زمان‌ماند معادل هفت روز (در صورت بسته‌بودن سیستم) به‌عنوان تصفیه تکمیلی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب استفاده شود. در این شرایط کارایی حذف ترکیبات نیترات و فسفات به‌ترتیب حداقل معادل ٦٩ و ٩٢ درصد قابل انتظار است.

در آزمایش‌های Zhang *et al.* (2014) نتایج حاصل از بررسی روند حذف آمونیوم، نیترات و فسفات از فاضلاب شهری در کشور چین، مشابه این پژوهش بوده به‌طوری که در طی دوره به‌صورت میانگین این ترکیبات به‌ترتیب به میزان ٨٧ ٨٠ و ٨٠ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین Akbarzadeh *et al.* (2015) میزان کاهش نیتروژن کل و فسفر کل به‌ترتیب ٩١ و ٩٧ درصد گزارش کردند که با نتایج این پژوهش تطابق دارد (Akbarzadeh *et al.*, 2015).

بررسی غلظت کدورت

تعیین پارامتر کدورت از این جهت اندازه‌گیری شد که تشکیل جلبک در تیمارها در صورت وجود، مشخص شود. زیرا در اثر وجود جلبک، کدورت افزایش پیدا می‌کند. نمودار شکل (٧) تغییرات کدورت در زمان‌ماندهای مختلف را نشان می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین اثرات آلایندگی ناشی از فسفر در فاضلاب یوتریفیکاسیون است. غلظت زیاد فسفر غالباً دسترسی مواد مغذی موجود در آب‌ها را محدود می‌سازد و سبب رشد بی‌رویه جلبک‌ها در محیط آبی می‌شود. در اثر یوتریفیکاسیون، تولید مواد آلی در محیط افزایش یافته و با تجزیه آن‌ها، اکسیژن محلول در آب مصرف می‌شود.

در تیمارهای حاوی گیاه وتیور به‌دلیل فعل و انفعالات موجود در محیط آبی، ته‌نشینی، تجزیه فسفات و هم‌چنین میزان هوادهی مصنوعی و هوادهی خود گیاه وتیور، میزان کدورت در روز سوم در فاضلاب تصفیه شده، ٦٨ درصد و در فاضلاب خام به ٧٩ درصد کاهش یافت.

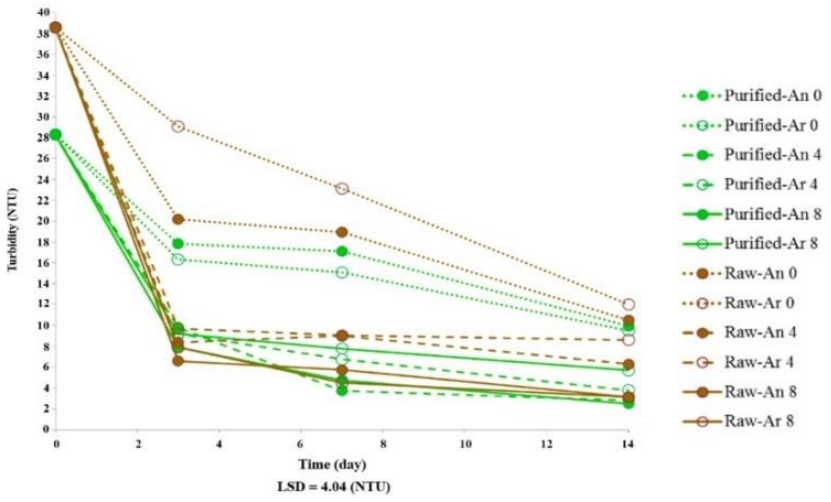

Figure 7. Changes of turbidity in different treatments through time

نکته مهم در این نمودار این است که تیمارهای بدون گیاه از کدورت بیش‌تر و معناداری نسبت به تیمارهای حاوی وتیور برخوردار است که یکی از دلایل موجود، وجود جلبک در مخازن این تیمارها است. به‌عنوان مثال، تیمارهای Raw-An 0 و Raw-Ar 0 میزان کدورت بیش‌تری نسبت به بقیه تیمارها دارند و دلیل آن وجود جلبک در مخازن است. در پایان، پارامتر کدورت با درنظرگرفتن عدم معناداری تیمارهای حاوی گیاه وتیور در هر دو نوع فاضلاب در روز چهاردهم به‌طور میانگین به میزان ۸۷ درصد کاهش یافته است.

نتایج حذف ترکیبات آلاینده و مواد مغذی در این پژوهش با پژوهش‌های انجام‌شده توسط Shyamala *et al.* (2017) مطابقت داشت، به‌طوری‌که در این پژوهش‌ها نیز از سیستم وتیور در جهت بهبود کیفیت فاضلاب شهری استفاده شد و فاضلاب انتخاب شده دارای کدورت بسیار بالایی بود، اما مشاهده شد که گیاه وتیور قابلیت زیادی در بهبود کدورت آب و بهبود آن از ۷۱ به ۳۲ NTU دارد (Shyamala *et al.*, 2017).

بررسی غلظت پتاسیم

به‌طورکلی نیترات، فسفات و پتاسیم (NPK) از جمله عناصر غذایی مهم در گیاهان هستند. همان‌طورکه در نمودار شکل (۸) مشاهده می‌شود، گیاه وتیور به‌خوبی و با روند بسیار زیاد توانسته پتاسیم را مصرف کند. به‌طوری‌که در فاضلاب تصفیه‌شده در روز ۱٤ به‌طور میانگین ۹٤ درصد از پتاسیم محلول را مصرف کرده است.

در روزهای اول همه تیمارهای حاوی گیاه وتیور در برابر جذب پتاسیم تقریباً اختلاف معناداری ندارند، اما به مرور زمان این اختلاف معنادار می‌شود که احتمالاً به فیزیولوژی گیاهان ارتباط دارد. این موضوع در جدول (۳) مشخص است، به‌طوری‌که تمام اثرات متقابل دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه نوع فاضلاب در تراکم در تیمار هوادهی در زمان، در سطح ۱ درصد معنادار شده‌اند. در نتیجه، میزان غلظت فسفات و پتاسیم به‌دلیل مصرف زیاد گیاه وتیور از این ترکیبات به‌طور میانگین به‌ترتیب در روز سوم ٤۵ و ۱۵ درصد، روز هفتم ۸۰ و ۹۲ درصد و در روز چهاردهم ۸۹ و ۹٦ درصد روند کاهشی داشت.

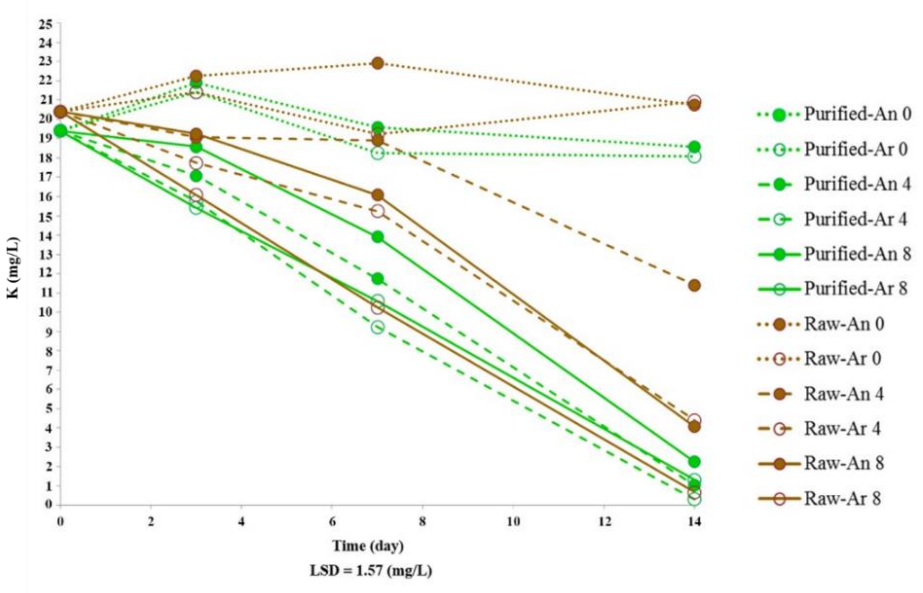

Figure 8. Changes of potassium (K) in different treatments through time

Darajeh *et al.* (2019) طی بررسی خود عملکرد گیاه وتیور در حذف آلاینده‌های مختلف از پساب‌های مختلف را بررسی نمود و آن را با بیش از ۱۵ گیاه مختلف مقایسه کرد. در نهایت دریافت که این گیاه توانایی جذب پتاسیم به مقدار زیاد را دارا می‌باشد که تأییدکننده نتایج این آزمایش است (Darajeh *et al.*, 2019).

تحلیل غلظت سدیم و کلسیم+ منیزیم

از دو نمودار شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که در فاضلاب خام میزان جذب کلسیم+ منیزیم در گیاه تقریباً بیش‌تر از میزان سدیم بوده ولی در فاضلاب تصفیه‌شده عکس این موضوع صادق است. از طرفی در مجموع تیمارها نسبت جذب سدیم در هر دو نوع فاضلاب (SAR) یا تغییری نکرده و یا افزایش نامحسوسی داشته است. بر طبق این دو نمودار و بررسی‌های به‌عمل آمده نسبت جذب سدیم در هر دو نوع فاضلاب و برای همه تیمارها زیر ۱۰ بوده و کیفیت آب آبیاری براساس طبقه‌بندی آزمایشگاه شوری خاک آمریکا در گروه سدیمی ۱ (کم) قرار می‌گیرد.

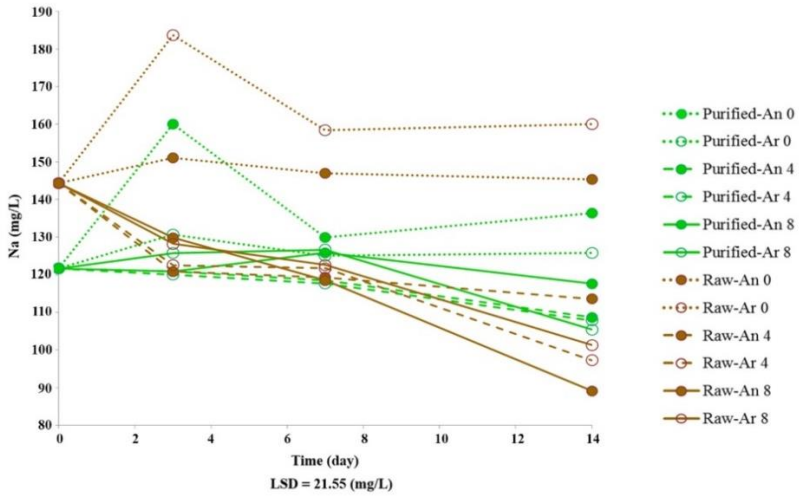

Figure 9. Changes of sodium (Na) in different treatments through time

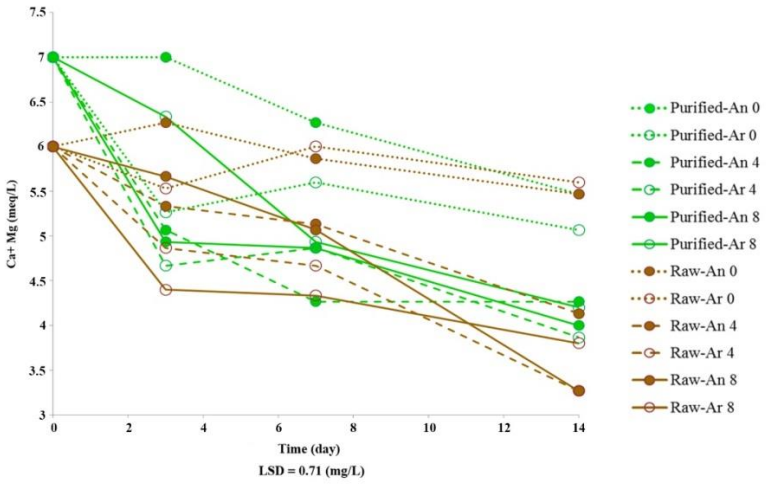

Figure 10. Changes of calcium+mangnesium (Ca+Mg) in different treatments through time

هدف از تعیین پارامترهای سدیم و کلسیم و منیزیم، سنجش کیفیت فاضلاب به‌منظور استفاده در مصارف کشاورزی و آبیاری است. سدیم زیاد پساب می‌تواند تعادل طبیعی خاک را از بین ببرد و سبب جایگزینی آن با کاتیون‌های دیگر به‌ویژه کلسیم و منیزیم بر سطوح تعادلی خاک شود، که به موجب آن مقدار بیش‌تری کاتیون کلسیم و منیزیم وارد بخش محلول خاک شده و بر اثر آب‌شویی از خاک خارج شود. اگرچه کاتیون‌هایی مانند کلسیم و منیزیم به‌طور مستقیم تهدیدی برای سلامتی افراد و یا محیط زیست نیستند، اما آب‌شویی آن‌ها از خاک می‌تواند با توجه به نقش مثبت کاتیون‌های دو ظرفیتی در خاک، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار دهد و نشان‌دهنده خروج عناصر مفید از خاک باشد. سدیم تبادلی تمایل به پراکنش خاک داشته و باعث کاهش سرعت نفوذ آب و هوا در خاک می‌شود. هم‌چنین این پراکنش ذرات باعث تشکیل یک لایه سله روی سطح خاک گشته و مانع از جوانه‌زنی بذر می‌شود. آب آبیاری می‌تواند به‌عنوان یک منبع افزایش سدیم محلول خاک محسوب شود و باید از این لحاظ آب آبیاری مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به اهمیت بررسی این پارامترها Gholipour *et al.* (2020)، پژوهشی صرفاً روی توانایی وتیور در حذف آنیون‌ها و کاتیون‌ها انجام دادند و در نهایت دریافت که با به‌کارگیری سیستم وتیور، می‌توان آنیون‌ها و کاتیون‌ها از جمله پتاسیم، کلسیم و کلر را به حد استاندارد مورد نظر برای خروجی فاضلاب‌ها تصفیه کند (Gholipour *et al.*, 2020).

بررسی pH

با توجه به شکل (۱۱) مشخص است که pH ورودی فاضلاب خام برابر ۷/۹۱ و pH فاضلاب تصفیه‌شده برابر ۸/۱۲ است. مرز استاندارد pH پساب، براساس ارقام ارائه‌شده توسط سازمان محیط زیست کشور برای مصارف آبیاری و کشاورزی، که بین ٦ تا ۸/۵ است، قابل‌قبول‌بودن pH را برای این منظور نشان می‌دهد. تمامی تیمارهای حاوی گیاه وتیور تا روز هفتم روند کاهشی داشته و سپس افزایش یافتند. یکی از دلایل این افزایش احتمالاً تولید گاز دی‌اکسیدکربن در خلال تجزیه زیستی مواد آلی است. Gholipour *et al.* (2020) نیز به کاهش تدریجی pH در فاضلاب، طی تصفیه به‌وسیله گیاه وتیور اشاره کرد (Gholipour *et al.*, 2020).

Shyamala *et al.* (2017) مشاهده کردند که در ابتدا فاضلاب شهری مورد استفاده PH ۸/۵ را داشته است، اما گیاه وتیور قادر بوده آن را تا ٦/۷ کاهش دهد (Shyamala *et al.*, 2017).

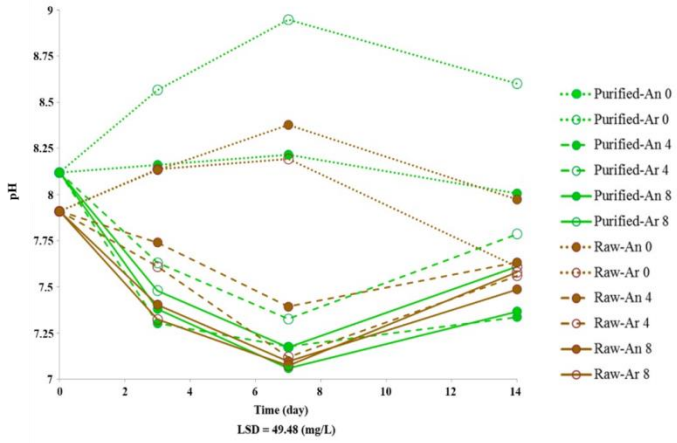

Figure 11. Changes of pH in different treatments through time

نتیجه‌گیری

در انجام پژوهش، زمان از جمله محدودیت‌های موجود بود. چراکه در چنین پژوهش‌هایی، زمانی طولانی برای رشد کامل وتیورها و انجام هرچه بهتر تصفیه آلاینده‌ها نیاز است. با این حال نتایج مطلوبی حاصل شد و انجام مطالعات پایلوتی نشان داد که استفاده از فرایند گیاه‌پالایی با گونه وتیورگراس با شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی ایران سازگار است. به‌علاوه استفاده از این گیاه باعث کاهش هزینه‌های مربوط به ساخت، بهره‌برداری و نگهداری از واحدهای تصفیه می‌شود و به‌سادگی توسط کارکنان بومی مورداستفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین این روش، روشی کارآمد و مقرون‌به‌صرفه به‌منظور ارتقای تصفیه‌خانه‌ها با رویکرد حذف ترکیبات فاضلاب و قابل استفاده برای مصارف کشاورزی و آبیاری به‌شمار می‌رود.

انجام این پژوهش نشان داد که بهترین تراکم در انجام پالایش فاضلاب شهری توسط گیاه وتیور در محیط بسته، تراکم چهارتایی بوده و روند هوادهی و عدم هوادهی تیمارها تأثیر زیادی بر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده، ندارد. هم‌چنین بهترین نوع فاضلاب نیز فاضلاب با غلظت کم‌تر یا فاضلاب تصفیه‌شده شناخته شد، چراکه در این فاضلاب اکثر آلاینده‌ها و عوامل تأثیرگذار برای مصارف کشاورزی و آبیاری تا حدی حذف شده است. در اکثر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده (به‌غیر از BOD) مشاهده شد که زمان‌ماند هفت‌روزه با زمان‌ماند ١٤ روزه تفاوت معناداری ندارد، از همین رو بهترین زمان‌ماند نیز هفت‌روزه در نظر گرفته شد.

در نهایت، پژوهش‌هایی در رابطه با استفاده از گیاه وتیور و میزان عملکرد آن برای پساب‌های بیمارستانی، صنعتی و شرکت‌های دارویی، پیشنهاد می‌گردد. هم‌چنین بررسی امکان حذف هیدروکربن‌های نفتی توسط گیاه وتیور در محیط‌های مختلف آبی یا خاکی نیز توصیه می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Abedi-Koupai, J., Ghods-Motahari, A., & Najafi, N. (2018). The potential of vetiver grass to reduce salinity. In: Proceeding of *the 2nd Iran Water and wWastewater Science Engineering*, 14 Nov, Isfahan University of Technology, Iran.
2. Abedi-Koupai, J., Jamalian, M., & Dorafshan, M. (2020). Improving Isfahan landfill leachate quality by phytoremediation using vetiver and phragmites plants in green space irrigation. *Journal of Water and Wastewater*, 31(3), 101-111. (In Persian).
3. Akbarzadeh, A., Vakhshouri, M., Jamshidi, S., & Khalesidoost, M. (2015). Evaluation of the performance of *vetiveria zizanioides* in removing nutrients from wastewater. *Journal of Water and Wastewater*, 26(1), 57-67. (In Persian).
4. Alizade, A. (2004). *Practical Hydrology Fundamentals*. Mashhad, University of Emam Reza Publications.
5. Alizade, A. (2011). *Soil, Water, Plant Relationship*. Mashhad, University of Emam Reza Publications.
6. Angassa, K., Leta, S., Mulat, W., Kloos, H., & Meers, E. (2018). Organic matter and nutrient removal performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands planted with *Phragmite karka* and *Vetiveria zizanioide* for treating municipal wastewater. *Environmental Processes*, 5(1), 115-130.
7. APHA. (2013). *Standard Method for Examination of Water and Wastewater*. Washington DC: American Public Health Association.
8. Badejo, A. A., Omole, D. O., & Ndambuki, J. M. (2018). Municipal wastewater management using *Vetiveria zizanioides* planted in vertical flow constructed wetland. *Applied Water Science*, 8(8), 1-6.
9. Darajeh, N., Truong, P., Rezania, S., Alizadeh, H., & Leung, D. (2019). Effectiveness of Vetiver grass versus other plants for phytoremediation of contaminated water. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 7(3), 485-500.
10. Darajeh, N., Idris, A., Masoumi, H. R. F., Nourani, A., Truong, P., & Sairi, N. A. (2016). Modeling BOD and COD removal from Palm Oil Mill Secondary Effluent in floating wetland by *Chrysopogon zizanioides* (L.) using response surface methodology. *The Journal of Environmental Management*, 181(2016),343-352.

11. Gholipour, M., Mehrabanjoubani, P., Abdolzadeh, A., Raghimi, M., Seyedkhademi, S., Karimi, E., & Sadeghipour, H. R. (2020). Facilitated decrease of anions and cations in influent and effluent of sewage treatment plant by vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*): the uptake of nitrate, nitrite, ammonium, and phosphate. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(17), 21506-21516.
12. Giang, L., Le, D., Tuong, L., Tan, L., & Tran, T. (2020). Study on organic pollution treatment from Van Thanh canal water by vetiver grass model on gravel and sand in water circulation conditions. In: Proceeding of *the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.*
13. Keshtkar, A.R., Ahmadi, M.R., Atashi, H., Hamidifar, H., Razavi, M., Nasiri, H. R., Yazdanpanah, A., & Moazami, N. (2016). Application of Vetiver system for treatment and improvement of unconventional water quality. *Journal of Natural Environment*, 68(4), 629-640. (In Persian).
14. Kusin, F. M., Hasan, S. N. M. S., Nordin, N. A. Mohamat, F., & Ibrahim, Z. Z. (2018). Floating vetiver island (fvi) and implication for treatment system design of polluted running. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1), 497-510.
15. Musavi, A., Nuri, M. R., & Samadi, H. (2014). Challengies of the application of grey water. In: Proceeding of *the 1st National Conference on Challenges on Water Resources and Agriculture*, 13 Feb, Isfahan, Iran, 1-6.
16. Pngthornpruek, S. (2017). Swine Farm Wastewater Treatment by Constructed Wetland Planted with Vetiver Grass. *Environment and Natural Resources Journal*, 15(2), 13-20.
17. Shyamala, G., Kasiraja, K., Aravind, G., Mahendran, V., & Ragunandhan, V. (2017). Domestic wastewater treatment in used natural materials and stoat software analysis. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Science*, 4(4), 94-98.
18. Wasita, D., Hadisoebroto, R., & Fachrul, M. (2019). Efficiency of constructed wetland using vetiver plant (Vetiveria sp) to reduced BOD and COD Concentration in greywater. In: Proceeding *4th Annual Applied Science and Engineering Conference, Journal of Physics: Conference Series*, 1402(2019).
19. Zhang, D. Q., Jinadasa, K., Gersberg, R. M., Liu, Y., Ng, W. J., & Tan, S. K. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries–a review of recent developments. *Journal of Environmental Management*, 141(2014), 116-131.