بررسی عملکرد گیاه وتیور در حذف مواد مغذی از فاضلاب

عباس اکبرزاده [۱] مریم وخشوری [۲] شروین جمشیدی [۳] مرتضی خالصی دوست [۴]

(دریافت ۹۲/۷/۱ پذیرش ۹۲/۱۲/٤)

چکیده

هدف از این پژوهش، امکان‌سنجی رشد گونه گیاهی وتیور به‌صورت هیدروپونیک در محیط پساب و ارزیابی میزان حذف و پالایش ترکیبات مغذی (نیتروژن و فسفر) در این شرایط بود. به این منظور، پایلوتی با حجم مفید ٦٠ لیتر ساخته شد و به‌مدت سه ماه به‌طور هفتگی و ناپیوسته از پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب تهران تغذیه شد. نتایج حاصل نشان داد که گیاه وتیور می‌تواند در این شرایط، رشد قابل ملاحظه‌ای (تا ۱۳۰ سانتی‌متر) داشته باشد. همچنین به‌طور متوسط کارآمدی حذف ترکیبات نیتروژن کل، فسفر کل و میزان اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در زمان ماند ٤ روزه به‌ترتیب ۹۱، ۹۷ و ۷۵ درصد بود. در صورت استفاده از وتیور به‌عنوان واحد تصفیه تکمیلی، زمان ماند باید حداقل ٤٨ ساعت باشد زیرا ترکیبات آمونیوم، نیتریت و فسفات که عوامل محدودکننده استانداردهای تخلیه پساب و استفاده مجدد از آنها هستند، در این مدت با کارایی بیش از ۹۵ درصد حذف می‌شوند. در این دوره مطالعاتی، میزان جذب نیتروژن و فسفر کل 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.

واژه‌های کلیدی: گیاه‌پالایی، فاضلاب، علف وتیور، مواد مغذی

Evaluation of the Performance of Vetiveria zizanioides in Removing Nutrients from Wastewater

A. Akbarzadeh [1] *M. Vakhshouri [2]* *Sh. Jamshidi [3]* *M. Khalesidoost [4]*

(Received Sep. 23, 2013 Accepted Feb. 23, 2014)

Abstract

The aim of this study was to evaluate the growth of Vetiveria zizanioides under hydroponic conditions and its efficiency in removing nitrogen and phosphorus compounds from wastewaters. For this purpose, a pilot plant was constructed with a net volume of 60 liters which was intermittently fed for three months with the effluent from a domestic wastewater treatment plant. It was found that Vetiver exhibited a significant capability for living in polluted waters under hydroponic condition as evidenced by the growth of its leaves to 130 cm. Moreover, the average values of total nitrogen, total phosphorus, and biochemical oxidation demand (BOD) removal efficiencies over four days of retention time were 91%, 97%, and 75%, respectively. If used as a tertiary treatment unit, the plant needs a minimum retention time of two days to allow adequate time for the removal of such vital compounds as Ammonia and Phosphate by 95%, which is the typical standard limit for wastewater reuse or free discharge. Finally, it was observed that the total values of nitrogen and phosphorus absorbed in the leaves were 17 and 2.3 (mg/gr dry weight) while the same elements absorbed in the roots were measured as 13 and 1.8 (mg/gr dry weight), respectively.

Keywords: Phytoremediation, Wastewater, Vetiver Grass, Nutrients.

۱- استادیار، عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات آب، مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، تهران
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات بوشهر
۳- دانشجوی دکترا، کارشناس پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، تهران (نویسنده مسئول) ۷۷۰۰۰۹۱۹ (۰۲۱) sh.jamshidi@ut.ac.ir
۴- کارشناس پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، تهران

1. Assist. Prof., Water Research Institute, Water and Wastewater Research Center, Tehran
2. MSc in Environmental Engineering, Azad Islamic University, Bushehr Science and Research Branch, Bushehr
3. PhD Student and Researcher at Water Research Institute, Water and Wastewater Research Center, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 7700919 sh.jamshidi@ut.ac.ir
4. Research Staff Member, Water Research Institute, Water and Wastewater Research Center, Tehran

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

یکی از راهکارهای کارآمد در پالایش آب‌های آلوده همچون پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی استفاده از فرایند گیاه‌پالایی است. گیاه‌پالایی یا تصفیه بیولوژیک توسط گیاهان به‌عنوان یک روش مفید برای بهبود وضعیت خاک و آب‌های آلوده به سرعت در حال گسترش است و این به‌دلیل کارایی بالقوه آن در کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از واحدهای تصفیه، کاهش میزان اثرات نامطلوب محیط زیستی، کاهش مشکلات ناشی از مدیریت پسماندها و عدم نیاز به دانش بالا در زمینه راه‌اندازی و بهره‌برداری از آنها است [۱ و ۲].

در سال‌های اخیر، استفاده از علف وتیور به‌دلیل قابلیت‌های این گیاه در زمینه‌های مختلف افزایش یافته است. وتیور گیاه مناطق حاره و بومی هندوستان است که از سازگاری بالایی در شرایط مختلف محیطی برخوردار است [۲ و ۳]. گونه غالبی از آن که عموماً برای کاشت بر سایر موارد برتری دارد، وتیور زیزانیودز[1] نامیده می‌شود که از سرعت رشد خوبی برخوردار است و بوته متراکمی را به‌وجود می‌آورد، به‌طوری‌که قطر پایه هر بوته گیاه حدود ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن به ۵۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر می‌رسد. به‌طور کلی اهمیت و قابلیت علف وتیور در ریشه‌های متراکم و عمیق آن است که می‌تواند ذرات خاک را به‌طور پیوسته کنار یکدیگر نگه داشته و موجب افزایش مقاومت کششی آن شود [۳]. نتایج تحقیقات در دهه گذشته نشان می‌دهد که وتیور قادر است در تثبیت خاک سواحل رودخانه‌ها و مهار سیلاب‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۴]. مطابق نتایج تجربی، میانگین مقاومت کششی آزمایش شده ریشه‌های گیاه وتیور برابر ۷۵ مگاپاسکال، معادل یک ششم مقاومت فولاد نرم است. بنابراین نشان داده شده است که کاشت وتیور در خاک می‌تواند در محدوده ۵۰ سانتی‌متری خود تا ۹۰ درصد بر مقاومت برشی آن بیفزاید [۳]. در همین زمینه، بنا به نتایج تجربی میکوفسکی و همکاران در سال ۲۰۰۵ مشخص شد که حداکثر نیروی کششی مورد نیاز به‌ازای ۱۰ سانتی‌متر جابجایی گیاه صورت می‌پذیرد و مقاومت کششی با ارتفاع گیاه و رشد برگ‌ها رابطه‌ای مستقیم دارد. به‌عنوان مثال، علف وتیور به طول ۱۲۰ سانتی‌متر نیازمند ۶۰۰ نیوتن نیرو است. با این وجود، تأکید شده است که شرایط آب و هوایی می‌تواند بر رشد اولیه گیاه و مقاومت نهایی آن تأثیر داشته باشد [۵].

به‌منظور شناسایی جنبه‌های کشت و پرورش گیاه در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک (غیر معتدل و مرطوب) و خاک‌های شور، ادلشتاین و همکاران در سال ۲۰۰۹ پژوهشی را در شرایط گلخانه‌ای انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که علف وتیور به غلظت‌های بیش از ۵۹ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و ۳۶ میلی‌گرم در لیتر پتاسیم برای رشد نیازی ندارد. همچنین در شرایط مختلف شوری خاک، غلظت بهینه فسفر به‌عنوان کود شیمیایی در حدود ۱۵ میلی‌گرم در لیتر عنوان شده است. در این شرایط، آستانه تحمل گیاه نسبت به شوری خاک در حدود ۳ تا ۶ دسی‌زیمنس بر متر عنوان شده است [۶]. در پژوهشی دیگر مشاهده شده است که گیاه نمی‌تواند بیش از ۱۴ دسی‌زیمنس بر متر شوری را تحمل کند و عملکرد آن در حذف مواد مغذی متوقف می‌شود، درحالی‌که گیاه نی گونه تیفا آنگوستیفولیا[2] در این محدوده قادر به فعالیت است [۷].

ترانگ و هارت در سال ۲۰۰۱ در یک گزارش، کلیه کاربردها و عملکردهای علف وتیور را در تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی در کشور تایلند و استرالیا مورد بررسی قرار دادند. به‌عنوان مثال، عنوان شده است که غلظت فسفر کل[3] بین ۶۸ تا ۹۹ درصد و نیتروژن کل[4] بین ۳۴ تا ۷۴ درصد می‌تواند از آب رودخانه حذف شود [۸]. همچنین گیاه قادر است علف‌کش‌ها را به دام انداخته و ترکیبات فسفر، نیتروژن کل، کلیفرم گوارشی[5] و *اشرشیاکلی*[6] را به‌ترتیب به میزان ۹۰، ۹۴، ۴۴ و ۹۱ درصد از فاضلاب خام حذف نماید. به‌علاوه می‌توان انتظار داشت که مقدار اکسیژن محلول بیش از ۷ برابر شود. در این شرایط، میزان مصرف آب توسط گیاه در حدود ۱/۱ لیتر در روز گزارش شده است [۸]. همچنین در تصفیه فاضلاب صنعتی کشتارگاه دام، در مدت زمان ۴ روز، میزان حذف فسفر، آمونیاک و اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی[7] به ۱۸، ۲۰ و ۶۸ درصد می‌رسد [۸ و ۹]. به‌علاوه، در زمینه پالایش خاک و شیرابه محل‌های دفن زباله، مشاهده شده است که در مدت زمان حدود ۶۵ روز، غلظت فسفر کل، نیتروژن کل و اکسیژن‌خواهی شیمیایی[8] به‌ترتیب تا ۷۰، ۸۰ و ۷۰ درصد کاهش می‌یابد [۸]. همچنین نتایج حاصل از این روش در تصفیه پساب خروجی از سپتیک تانک‌ها نشان می‌دهد که دو ردیف کاشت وتیور می‌تواند بالغ بر ۸۰ درصد از غلظت نیتروژن کل معادل ۳۷ تا ۴۰ کیلوگرم در هکتار در هفته از بار آلی ورودی بکاهد که در ۵ ردیف این میزان به ۹۹ درصد نیز می‌رسد. در این حالت میزان حذف فسفر کل محدودتر بوده و حداکثر به ۶۰ درصد معادل یک دهم تا یک سوم بار نیتروژن ورودی می‌رسد [۸]. در یک بررسی در کشور ویتنام نشان داده شده

[1] Vetiveria Zizanioides

[2] Typha Angustifolia
[3] Total Phosphorus (TP)
[4] Total Nitrogen (TN)
[5] Fecal Coliforms
[6] *E. Coli*
[7] Biochemical Oxidation Demand (BOD)
[8] Chemical Oxidation Demand (COD)

www.SID.ir
Archive of SID

است که گیاه وتیور کاشته شده در خاک می‌تواند فلزاتی نظیر روی و مس را با کارایی بیش از ۹۵ درصد و آرسنیک و سرب را تا ۷۰ درصد حذف نماید. این در حالی است که در این بررسی میزان حذف نیتروژن و فسفر به ترتیب به ۷۵ و ۵۵ درصد رسیده است [۳].

همچنین در یک پژوهش، عملکرد میزان رشد علف وتیور در شرایط تغذیه از ترکیبات نیتروژنی غیرآلی در مقایسه با سه گونه گیاهی آبزی پیرامون حذف مواد مغذی و قابلیت جذب مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس مشاهدات تجربی و آزمایشگاهی چنین نتیجه می‌شود که میزان نرخ رشد نسبی در حدود ۰/۰۲ در واحد روز بوده و گیاه درخصوص جذب یون آمونیوم تمایل بیشتری نسبت به نیترات از خود نشان می‌دهد [۱۰]. به‌علاوه مطابق نتایج تحقیق انجام شده در کشور چین، پیشنهاد شده است از این گیاه در کنار سایر گونه‌ها در نیزارهای مصنوعی به‌منظور پالایش پساب واحدهای پرورش ماهی استفاده شود [۱۱].

با این وجود، تحقیقات صورت گرفته پیرامون عملکرد گیاه وتیور به‌صورت آبزی (هیدروپونیک) بسیار محدود است. در یک بررسی در محیط گلخانه‌ای و در مقیاس پایلوت پیرامون عملکرد گونه‌های بومی علف وتیور در کشور تایلند و در پالایش فاضلاب با غلظت پایین مواد آلی و به‌صورت سکوهای شناور نشان داده شده است که میزان حذف اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن و فسفر کل به ترتیب در زمان ماند ۷ روز به‌طور متوسط به ۹۰، ۶۲ و ۲۷درصد می‌رسد که البته در زمان‌های ماند کوتاه‌تر نظیر سه روز، به نصف کاهش می‌یابد [۱۲]. این در حالی است که پیش از این، فلاحی و همکاران در سال ۲۰۱۲ در مدت زمان ۲ روز به ۹۵ درصد حذف نیترات از محیط آبی در مقیاس گلدان برای گیاه نی دست یافته‌اند [۱۳].

در کشور سنگاپور، عملکرد علف وتیور به‌صورت آبزی و به‌منظور ارزیابی میزان کارایی آن در حذف مواد مغذی در منابع آب سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج آزمایشگاهی و میدانی مشاهده می‌شود که میزان حذف نیتروژن و فسفر کل توسط گونه وتیور به ترتیب ۴۱ درصد و ۱۹درصد است که نسبت به گونه تیفا آنگوستیفولیا کمتر است (۶۸ و ۱۹درصد). همچنین ضریب واکنش حذف ترکیبات نیتروژن و فسفر برای علف وتیور به‌ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۶۶ در واحد روز تعیین شده است که این میزان برای گیاه نی به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۸۷ در واحد روز است. هرچند گونه وتیور در مقایسه با نی از عملکرد کندتری در جذب مواد مغذی برخوردار است، اما نشان داده شده است که در زمینه رشد برگ و به‌ویژه ریشه نسبت به گیاه نی پیشتاز بوده به‌طوری که در یک دوره سه ماهه، می‌تواند میزان وزن خشک به‌ازای طول برگ‌ها را به کمتر از ۰/۳۸ گرم بر متر کاهش دهد درحالی که این رقم برای نی در حدود ۱/۳۳ است. به‌علاوه مشاهده شده است که میزان جذب نیتروژن در برگ‌ها به ۳/۲ درصد می‌رسد که نسبت به نی ۱/۱درصد بیشتر است. اما میزان جذب فسفر در برگ‌ها ۰/۲درصد گزارش شده که به میزان ۰/۱درصد کمتر از نی است. بنابراین در کل از نظر عملکردی، گیاه نی مناسب‌تر گزارش شده و مساحت کمتری را برای ساخت سکوهای شناور به خود اختصاص می‌دهد. با این وجود، کارایی علف وتیور نقض نشده و حتی برای پالایش منابع آب سطحی نیز پیشنهاد شده است؛ زیرا وجود ریشه‌های متراکم و سرعت رشد نسبی بالای آن می‌تواند مصارف دیگر آن نظیر تأمین علوفه دام، مسائل زیباشناختی و افزایش اکسیژن محلول آب را به‌خوبی فراهم آورد [۱۴].

با توجه به نتایج مطالعات نظری می‌توان چنین بیان کرد که تصفیه انواع فاضلاب شهری و صنعتی توسط گیاه وتیور در دنیا انجام شده است اما اکثر آنها در محیط خاک و با جریان زیرسطحی بوده‌اند. مطالعات انجام گرفته به‌صورت آبزی نیز در شرایط آب و هوایی استوایی و معتدل و مرطوب (مانند کشور سنگاپور) انجام شده است. لذا کاربری گیاه با هدف بهبود کیفی منابع آبی و پالایش پساب به‌عنوان واحد تکمیلی و یا شناور در دریاچه‌ها برای حذف مواد مغذی به‌ویژه در کشور از نوآوری برخوردار بوده و کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین هدف از این پژوهش، امکان‌سنجی رشد گیاه وتیور به‌صورت آبزی در محیط پساب و ارزیابی کارایی آن در حذف و پالایش ترکیبات مغذی (نیتروژن و فسفر) در این شرایط در مقیاس پایلوت بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- انتخاب گونه گیاهی

انتخاب گونه علف وتیور محدود به نتایج مطالعات نظری و گونه تحت کشت در ایران است. به‌منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی و پایلوتی، علف وتیور از نوع وتیور زیزانیودز که مطابق مطالعات نظری، کارآمد، سازگار با محیط و بدون اثرات ثانویه محیط زیستی است به‌عنوان گونه مورد مطالعه استفاده شد. همچنین این گونه در ایران کشت شده و برای کنترل فرسایش سواحل رودخانه در منطقه خوزستان و البته ایجاد فضای سبز و حفاظت از تپه‌ها و جنگل‌ها در شهر تهران در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱ و ۲].

بنابراین گیاه مورد نیاز از مرکز آموزش گل و گیاه شهرداری تهران (منطقه ۴) به‌صورت جوان و بالغ برای انجام مطالعات در پاییز و زمستان ۱۳۹۱ تهیه شد. قابل ذکر است که نمونه‌های مذکور پس از تکثیر به مدت یک‌سال در محیط خاک باغبانی و در گلدان و

www.SID.ir
Archive of SID

در فضای آزاد نگهداری شده‌اند. تصویر گیاهان مذکور در روزهای آغازین مطالعات آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱- نمونه‌ای از گونه اخذ شده در زمستان ۱۳۹۱ پیش از انجام مطالعات

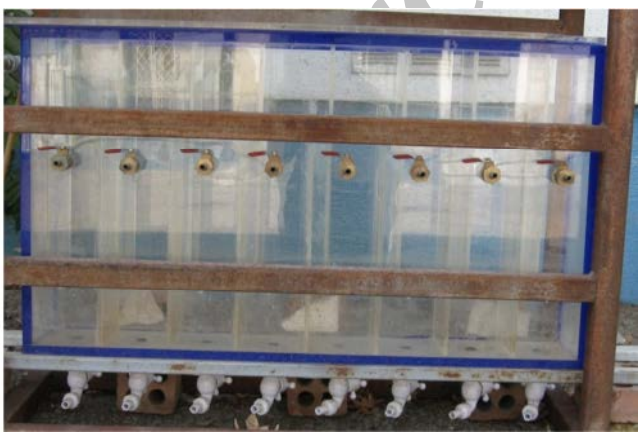
۲-۲- مشخصات پایلوت

به‌منظور انجام مطالعات مورد نظر، گیاهان در پایلوت جایگذاری شده و با تغذیه به‌صورت جریان ناپیوسته راهبری شدند. پایلوت نیمه‌صنعتی به حجم کلی ۶۰ لیتر به‌صورت مکعب مستطیل و از جنس پلکسی‌گلاس در سال ۱۳۹۱ مطابق شکل ۲ ساخته و در محل مؤسسه تحقیقات آب تهران نصب و راه‌اندازی شد. با در نظر گرفتن ضخامت تیغه‌های قائم پلکسی‌گلاس جداکننده ۶ میلی‌متری و دیواره‌های ۱۰ میلی‌متری نگهدارنده سیستم، ابعاد کلی پایلوت شامل طول، عرض و ارتفاع به ترتیب برابر ۹۱، ۱۷ و ۵۲ سانتی‌متر بود. این پایلوت‌ها هرکدام شامل دیواره‌های داخلی بودند تا حجم مشخصی معادل ۱۲ لیتر را برای هر کدام از گیاهان (۵ مورد) فراهم نمایند و البته مانع از تماس ریشه‌های گیاهان به یکدیگر و کاهش دقت آزمایش‌ها شوند. ارتفاع دیواره‌ها ۴۰ سانتی‌متر و از جنس پلکسی‌گلاس بودند و ۱۰ سانتی‌متر از آن به‌صورت سرریز بود تا پساب، قابلیت انتقال به واحدهای مجاور را داشته باشد و تعادل نسبی تراز آب برقرار شود. همچنین در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری از بستر پایلوت، برای بررسی کیفیت پساب در دوره‌های مختلف، شیر نمونه‌گیری در نظر گرفته شد. به‌علاوه در بستر هر اتاقک، شیر تخلیه تعبیه شد تا تخلیه و شستشوی آن میسر شود.

۲-۳- مشخصات پساب

یکی دیگر از اهداف این پژوهش، ارزیابی میزان کارایی حذف نیتروژن و فسفر از آب با استفاده از علف وتیور در شرایط تغذیه از پساب واقعی بود. به این منظور، از خروجی واحد زلال‌ساز ثانویه و پیش از واحد کلرزنی تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران برای تغذیه پایلوت استفاده شد. علت اینکه از فاضلاب خام برای تغذیه گیاهان استفاده نشد، وجود بار کربنی آلی و COD بالاتر و دیگر ترکیبات مانند مواد معلق در فاضلاب ورودی بود، درحالی که تمرکز این پژوهش بر حذف ترکیبات مغذی نیتروژن و فسفر بود. به‌عنوان نمونه، مطابق جدول ۱، کیفیت فاضلاب ورودی و پساب خروجی تصفیه‌خانه شهرک غرب مورد مقایسه قرار گرفت. بر این اساس مشاهده می‌شود که ترکیبات ازته موجود در پساب خام بیشتر از نوع آلی بوده و با پارامتر نیتروژن کلدال کل[1] نشان داده می‌شود، اما پساب خروجی به‌دلیل وجود فرایند هوادهی متعارف لجن فعال، بیشتر از نوع ترکیبات نیتراته بوده و به‌صورت معدنی است. از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش نیز کاهش ترکیبات مواد مغذی از آب‌های آلوده (مانند آب‌های سطحی و پساب‌های خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب) است، لذا انتخاب نمونه‌گیری از پساب تصفیه‌شده و کلرزنی نشده می‌تواند سایر عوامل مزاحم و تأثیرگذار را به‌طور نسبی از فرایند آزمایش و نتیجه‌گیری حذف نماید.

همچنین مطابق مطالعات نظری، گیاه وتیور مشابه سایر گونه‌های گیاهی مورد استفاده در نیزارهای مصنوعی، نیازمند زمان ماند بالا و جریان هیدرولیکی نسبتاً آرام است و انتظار می‌رود از قابلیت هوادهی و حذف مواد مغذی برخوردار باشد [۲]. لذا پیشنهاد شده است پیش از ورود به منابع آب پذیرنده و در خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌عنوان واحد تصفیه تکمیلی مورد استفاده قرار گیرد [۱۵]. بنابراین ارزیابی قابلیت کاهش بار نیتروژن و فسفر از پساب خروجی اهمیت و توجیه بیشتری نسبت به فاضلاب خام دارد. شکل ۳ میزان نوسانات متوسط غلظت ماهانه پارامترهای نیتروژن کل، فسفات، BOD و دما را در پساب خروجی تصفیه‌خانه شهرک غرب نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایی از پایلوت جهت جانمایی گیاهان وتیور به‌صورت شناور

[1] Total Kjeldal Nitrogen

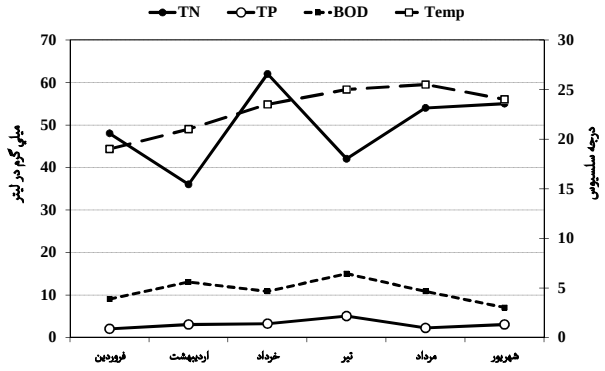
www.SID.ir
Archive of SID

جدول ۱- مشخصات متوسط فاضلاب خام، پساب خروجی از تصفیه‌خانه و پساب اولیه مورد آزمایش

پارامتر	مقدار		
	فاضلاب خام	پساب تصفیه‌شده	پساب اولیه مورد آزمایش
دمای فاضلاب (درجه سلسیوس)	۲۲/۱	۲۰/۷	۲۱
اکسیژن محلول (میلی‌گرم در لیتر)	< ۲	< ۲	< ۲
pH	۸	۷/۷	۷/۷
جامدات محلول (میلی‌گرم در لیتر)	۵۰۲/۳	۴۶۲/۵	۴۵۷
جامدات معلق (میلی‌گرم در لیتر)	۲۱۹/۸	۱۰/۲	۱۱
هدایت الکتریکی (میکروزیمنس در سانتی‌متر)	۸۰۴	۷۵۰	۷۳۶
اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (میلی‌گرم در لیتر)	۱۸۷/۵	۱۲/۱	۱۲
اکسیژن‌خواهی شیمیایی (میلی‌گرم در لیتر)	۲۲۵/۸	۲۴/۵	-
نیتروژن کلدال کل (میلی‌گرم در لیتر)	۳۲/۹	-	-
نیتروژن آمونیاکی (میلی‌گرم در لیتر)	-	۰/۶	۰/۵۳
نیتریت (میلی‌گرم در لیتر)	-	۱	۰/۹۸
نیترات (میلی‌گرم در لیتر)	-	۴۶/۶	۴۶/۸
فسفات (میلی‌گرم در لیتر)	۷/۸	۲/۹	۲/۹

۲-۴- نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌ها

مطابق با رویکرد پژوهش، اندازه‌گیری غلظت ترکیبات نیتروژن شامل نیترات، نیتریت و آمونیوم و ترکیبات فسفر (فسفات) در اولویت قرار داشت و به‌طور مداوم و هفتگی اندازه‌گیری می‌شد. نمونه‌گیری نیز به‌طور یکنواخت از تمامی شیرهای موجود صورت گرفت و مخلوط آنها آزمایش شد. سایر پارامترهای کیفی از جمله میزان BOD، میزان هدایت الکتریکی[1]، اکسیژن محلول در آب[2]، pH، کربنات و بیکربنات، غلظت یون‌های فلوئوراید و سولفات نیز آزمایش شد. به‌علاوه، در ارزیابی پساب خروجی از تصفیه‌خانه شهرک غرب، مؤلفه‌های جامدات معلق کل[3] و COD نیز اندازه‌گیری شد. همچنین در این پایلوت، تمامی بررسی‌های آزمایشگاهی در دمای محیط انجام شد و کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه معتمد محیط زیست مؤسسه تحقیقات آب و بلافاصله پس از نمونه‌گیری مطابق با روش استاندارد انجام شد [۱۶]. در کنار پارامترهای مذکور، اندازه‌گیری‌های طول ریشه و برگ گیاه برای ارزیابی میزان رشد به‌صورت دستی انجام شد. همچنین تعیین میزان غلظت جذب شده ترکیبات مواد مغذی نیتروژنی در برگ و ریشه‌های گیاه مطابق روش استاندارد و پس از خشک کردن و توزین بخش‌های جدا شده صورت گرفت [۱۰].



شکل ۳- نوسانات کیفی پساب تصفیه‌شده تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران در دوره مطالعه

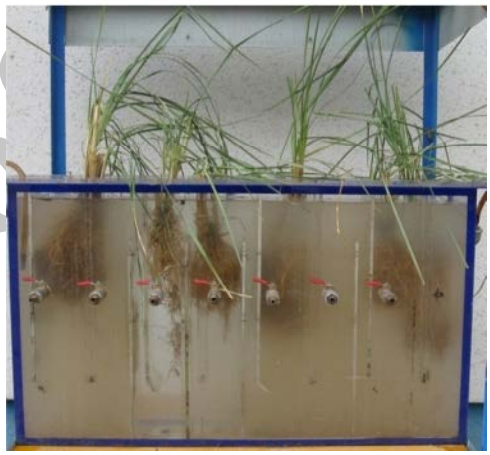
۲-۵- مراحل انجام مطالعات

پیش از انجام مطالعات پایلوتی به‌صورت شناور در آب، در فروردین‌ماه، گیاهان مورد آزمایش پس از هرس کامل از محیط

[1] Electrical Conductivity (EC)
[2] Dissolved Oxygen (DO)
[3] Total Suspended Solids (TSS)

www.SID.ir

خاک گلدان خارج و در ظرف حاوی آب قرار داده شدند تا به مرور با این محیط تطابق یافته و گل و لای محصور بین ریشه‌ها خارج شود. پس از سه هفته، جوانه‌های ساقه تمامی گیاهان رشد قابل ملاحظه‌ای نموده و ریشه‌های جدید گسترش یافتند. بنابراین بررسی‌های پایلوتی از اوایل اردیبهشت ۱۳۹۲ آغاز شد و تا مرداد برای دوره‌ای سه ماهه ادامه یافت. در این مرحله، هر هفته و پیش از افزودن فاضلاب، کل پایلوت تخلیه و شستشو شده و سپس فاضلاب به پایلوت اضافه شد. میانگین مشخصات کیفی فاضلاب ورودی در جدول ۱ و نتایج آزمایش‌ها و نمونه‌های حاصل از پایلوت در بخش نتایج آمده است. شایان ذکر است به‌طور موازی، تعدادی از گیاهان در محیط خاک ماسه و رس گلدان و در دمای اتاق به‌عنوان نمونه شاهد نگهداری شدند تا میزان رشد آنها در مقایسه با گونه‌های مورد استفاده در شرایط آبی قابل اندازه‌گیری و مقایسه باشد. این گیاهان نیز در این مدت، هفته‌ای یک مرتبه به‌طور مشابه از پساب تصفیه‌خانه آبیاری شدند (شکل ۴).



شکل ۴- وضعیت گیاهان پیش از تزریق پساب و انجام مطالعات آزمایشگاهی (اردیبهشت)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- میزان رشد گیاه

گیاهان به‌طور طبیعی در عمل فتوسنتز، نور خورشید را به‌وسیله اندام سبز خود که حاوی کلروفیل است جذب نموده و آب و مواد غذایی لازم را از طریق ریشه‌ها دریافت می‌کنند. به این ترتیب، می‌توانند مواد مورد نیاز را برای رشد در اندام‌های مربوطه مانند ریشه، برگ و یا ساقه ذخیره نمایند. استفاده از این ذخایر به مرور موجب افزایش طول ریشه‌ها و برگ‌ها شده و این اندام را متراکم‌تر و قطورتر می‌سازد. واضح است پس از یک دوره معین، رشد بیش از حد برگ‌ها که مصرف‌کنندگان اصلی این ذخایر غذایی هستند، باعث می‌شود نسبت مصرف به میزان جذب مواد و انرژی افزایش یافته و دیگر گیاه نتواند مقدار مورد نیاز را فراهم آورد. بنابراین بخش‌هایی از گیاه رو به زردی می‌گرایند. هرس گیاهان در این دوره می‌تواند سرعت رشد گیاه را حفظ نماید [۱۷ و ۱۸].

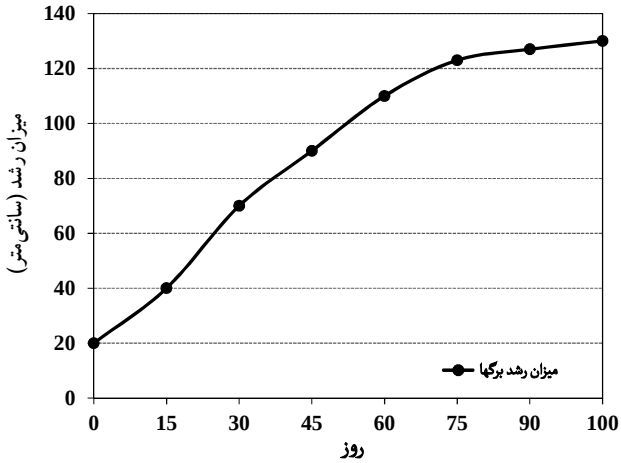
از اهداف اصلی این پژوهش، امکان‌سنجی رشد گیاه وتیور در محیط آبی با تغذیه از فاضلاب بود. در همین راستا و در دوره مطالعه، ارتفاع برگ و ریشه گیاه پس از هرس کردن و از ابتدای مطالعات مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و ثبت شد. این مقدار متوسط ارتفاع بلندترین برگ برای پنج گیاه وتیور مستقر در پایلوت است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، این گیاه در شرایط استقرار در محیط آبی از رشد بالایی برخوردار است و می‌تواند به‌طور متوسط در طی دوره صد روزه تا ۱۳۰ سانتی‌متر از حداکثر ارتفاع برگ برخوردار باشد. به‌عبارت دیگر، در این دوره گیاه به‌طور متوسط در هر روز ۱/۱ سانتی‌متر رشد دارد. این در حالی است که علاوه بر افزایش طول برگ، تراکم ریشه (شامل طول ریشه، تعداد و قطر آنها) و برگ‌ها (شامل تعداد و قطر آنها) نیز افزایش یافته است (شکل ۶).

با بررسی دقیق‌تر نمودار شکل ۵ چنین نتیجه گرفته می‌شود که تغذیه از پساب روند با ثباتی را نشان می‌دهد. شیب نمودار در شرایط آبیاری با پساب در ۷۵ روز اول تقریباً ثابت و در حدود ۱/۳۷ سانتی‌متر در روز بود و پس از این دوره کاهش یافت. علت این پدیده می‌تواند احتمالاً ناشی از این موضوع باشد که مطابق روند متعارف رشد گیاهان، مواد غذایی ابتدا از طریق ریشه‌ها در بخش‌های مربوطه مانند برگ‌ها یا ریشه‌ها ذخیره شده و سپس برای رشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه دارای ترکیبات آلی و معدنی بوده و گیاه می‌تواند از تمامی ترکیبات (مانند آمونیوم، نیتریت و نیترات) بهره‌مند شود، احتمالاً قادر خواهد بود روند ذخیره‌سازی و مصرف را به‌طور پیوسته حفظ نماید. همچنین، حداکثر طول ریشه گیاهان آبیاری شده با پساب در انتهای دوره مطالعه به‌طور متوسط برابر ۴۶/۷ سانتی‌متر بود. همین رشد مناسب ریشه و تراکم آن می‌تواند در روند رشد برگ‌ها اثرگذار باشد. به‌طور مشابه در تحقیقات انجام شده در کشور سنگاپور مشاهده شد که در یک دوره سه ماهه، میزان ارتفاع گیاه وتیور از حدود ۲۵ سانتی‌متر به ۲ متر افزایش یافته است که علت رشد بیشتر گیاه می‌تواند شرایط تغذیه به‌صورت پیوسته از منبع آبی و آب و هوای معتدل و استوایی منطقه باشد. شایان ذکر است در همین شرایط و حوضه آبریز، میزان رشد تیفا آنگوستیفولیا نیز از حدود ۳۰ سانتی‌متر تا ۲ متر در دوره کوتاه‌تر دو ماهه بوده است [۱۴].

همچنین نتایج مقایسه میزان رشد برگ‌های گیاه وتیور در این دوره با نمونه شاهد کاشته شده در محیط خاک نشان می‌دهد که میزان رشد گیاه در نمونه شاهد تفاوت بارزی با نمونه رشد کرده در شرایط

www.SID.ir
Archive of SID

شناور در آب دارد (شکل ۷). در انتهای دوره مطالعه، برگ‌های نمونه شاهد حداکثر به ارتفاع ۱۵۰ تا ۱۶۰ سانتی‌متر رسید که درحدود ۱۶ درصد بیشتر از شرایط آبیاری با پساب در محیط آبی بود. این میزان تفاوت احتمالاً به‌دلیل توانایی بیشتر رشد گیاه و جذب مواد مغذی و شرایط مناسب محیطی است.



شکل ۵- روند متوسط رشد برگ‌ها در دوره تغذیه از پساب

شکل ۶- نمایی از میزان رشد برگ‌ها (بالا) و ریشه‌ها (پایین) در ماه‌های پایانی انجام مطالعات (مرداد) در محیط پایلوت

شکل ۷- نمایی از میزان رشد برگ‌ها در نمونه شاهد در طول دوره مطالعه (از راست به چپ: هفته دوم خرداد، هفته سوم تیر و هفته پایانی مرداد)

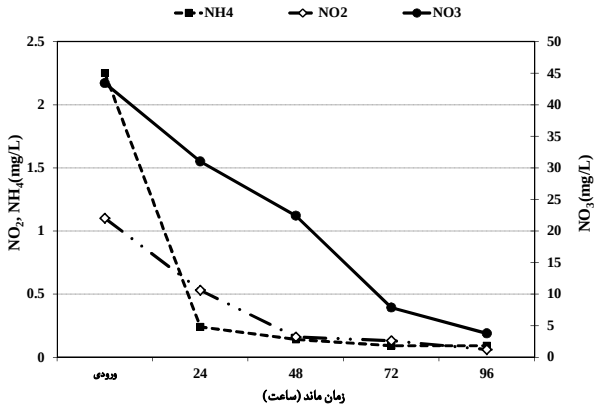
۳-۲- میزان حذف ترکیبات از محیط پساب

از دیگر اهداف این پژوهش، ارزیابی میزان حذف ترکیبات مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) از محیط آبی در شرایط تغذیه از پساب به‌صورت ناپیوسته بود. در این زمینه، حذف مواد مغذی از آنجا اهمیت دارد که اولاً در اکثر تصفیه‌خانه‌های متعارف فاضلاب شهری، فرایند لجن فعال متعارف که بیش از تمامی واحدها مورد استفاده قرار می‌گیرد، نمی‌تواند ترکیبات نیتروژن و فسفر را به‌طور کارآمد حذف نماید و این مورد هزینه‌های زیادی را به‌منظور حفاظت از محیط زیست، رعایت ضوابط استاندارد و بالطبع ارتقای تصفیه‌خانه در پی خواهد داشت [۲]. به‌علاوه زهاب‌های زمین‌های کشاورزی و مراتع که بار آلی ازته بالایی دارند، می‌توانند به‌طور گسترده و غیرنقطه‌ای منابع آب پذیرنده (به‌ویژه منابع آب سطحی) را آلوده نمایند [۲]. همچنین منابع آب سطحی و زیرزمینی در کشور به‌ترتیب با مشکل تغذیه‌گرایی[1] و تجمع نیترات مواجه‌اند که هر دو از انتشار بار نیتروژن و فسفر ناشی می‌شوند [۲]. استفاده از فرایند گیاه‌پالایی به‌صورت آبزی می‌تواند نه تنها از هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری واحدهای تصفیه بکاهد بلکه قادر است این ترکیبات را از محیط نیز حذف نماید. در این پژوهش میزان حذف از محیط آبی در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. همچنین هدف فرعی در این بخش، شناسایی میزان حذف ترکیبات در طول یک هفته (به‌صورت روزانه) بود تا روند فرایند، نحوه مصرف ترکیبات مختلف و از همه مهم‌تر تحلیل زمان ماند هیدرولیکی بهینه میسر باشد؛ زیرا تعیین زمان ماند می‌تواند به‌عنوان نتیجه فنی این پژوهش برای بخش صنعت به‌منظور استفاده از وتیور به‌عنوان واحد فرایندی تکمیلی در تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد.

همانطور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، در طی چهار شبانه‌روز (معادل ۹۶ ساعت)، میزان غلظت نیتروژن کل از مقدار متوسط ۴۷ میلی‌گرم در لیتر به کمتر از ۵ میلی‌گرم در لیتر رسید. در زمان ماند ۴ روزه کارآمدی حذف مجموع ترکیبات نیتروژن به بیش از ۹۱

[1] Eutrophication

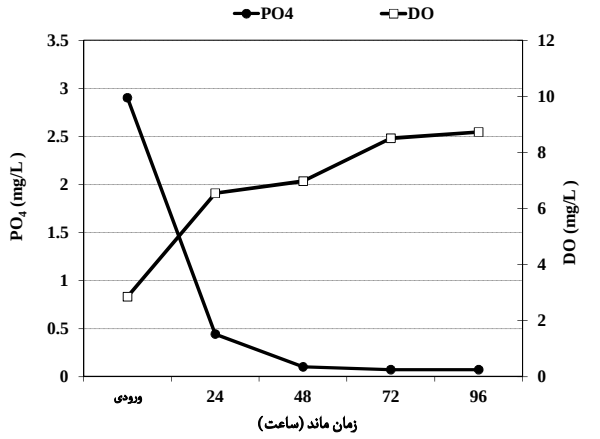
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۸- غلظت ترکیبات نیتروژن محلول در زمان‌های ماند مختلف

درصد رسید. همچنین به‌صورت تخمینی می‌توان چنین برآورد نمود که هر گیاه بالغ در این مطالعه قادر است هر روز معادل ۰/۱۳ گرم از بار نیتروژن پساب بکاهد.

از روند موجود در نمودار شکل ۸ چنین نتیجه گرفته می‌شود که گیاه وتیور در اولین روز (زمان ماند معادل ۲۴ ساعت)، باعث می‌شود غلظت آمونیوم موجود در پساب ناشی از جذب توسط گیاه و هوادهی نسبتاً به‌طور کامل (حدود ۹۶ درصد) کاهش یابد. در مدت ۴۸ ساعت، نیتریت نیز با راندمان بالایی (حدود ۹۵ درصد) حذف شد اما روند مصرف نیترات و شیب کاهش غلظت آن در محیط نسبتاً ثابت بوده و در طی چهار روز، غلظت محلول آن به‌صورت خطی به کمتر از ۵ میلی‌گرم در لیتر رسید.



شکل ۹- غلظت فسفات و اکسیژن محلول در زمان‌های ماند مختلف

میزان حذف فسفات و افزایش اکسیژن محلول در آب در طی روزهای هفته در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است. بر این اساس می‌توان عنوان نمود که غلظت فسفات پس از ۳ روز به زیر ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد که معادل ۹۷ درصد کاهش است. البته روند نزولی غلظت فسفات بیشتر در روز اول قابل مشاهده است. از طرفی، می‌توان چنین برآورد نمود که هر گیاه بالغ در این مطالعه روزانه معادل ۰/۰۱۷ گرم از بار فسفر در محیط آبی کم نماید. همچنین در این نمودار، نشان داده شده است که گیاه پس از یک روز، به‌دلیل انجام عملیات فتوسنتز، با مصرف مواد مورد نیاز مانند آمونیوم و فسفات و تولید اکسیژن، از هوادهی بالایی در محیط آبی اطراف ریشه‌ها برخوردار است و می‌تواند غلظت اکسیژن محلول را حداقل تا سه برابر افزایش دهد. این قابلیت هوادهی برای منابع آب سطحی و استخرهای پرورش ماهی حیاتی بوده و می‌تواند خودپالایی رودخانه‌ها را به میزان چشمگیری افزایش دهد. همچنین این هوادهی از ایجاد لایه‌های بی‌هوازی در مخازن و انتشار بوی نامطبوع جلوگیری می‌کند.

به‌منظور انتخاب زمان ماند بهینه با هدف کاهش بار نیتروژن و فسفر در شرایط ناپیوسته و با هدف بهبود منابع آب پذیرنده، از استانداردهای تخلیه پساب استفاده شد. با توجه به اینکه محدوده تعیین کننده استانداردهای تخلیه پساب و استفاده مجدد از آن، به‌ویژه پیرامون فاضلاب‌های شهری، حداکثر غلظت مجاز آمونیوم، نیتریت و فسفات بوده و محدوده نیترات نامعین است و از آنجایی که گیاه وتیور در شرایط کاشته شده در محیط آبی مطابق این مطالعه می‌تواند تنها در یک روز (۲۴ ساعت) پارامترهای مذکور را با کارایی بالا حذف نماید و اکسیژن محلول را افزایش دهد، چنین پیشنهاد می‌شود که از این گیاه با مدت زمان ماند معادل ۴۸ ساعت و به‌عنوان تصفیه تکمیلی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب استفاده شود. در این شرایط کارایی حذف ترکیبات نیتروژن کل و فسفات به ترتیب حداقل معادل ۵۱ و ۹۶ درصد قابل انتظار است. بررسی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد که در طی دو روز زمان ماند، نسبت غلظت آمونیوم به نیترات محلول از ۰/۰۵ به ۰/۰۰۶ (تقریباً ۱۰ برابر) کاهش می‌یابد. این نکته می‌تواند تنها ناشی از قابلیت بالای گیاه وتیور در جذب آمونیوم و یا پدیده نیترات‌زایی[1] ناشی از هوادهی بالای گیاه باشد [۱۰]. این روند با ساختار حذف فسفات از محیط متفاوت بوده و مشاهده شده است که غلظت نیتروژن کل نسبت به فسفات محلول افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان انتظار داشت رشد جلبک‌ها به‌ویژه سیانوباکترها در محیط آبی کاهش یابد [۲].

در کنار اندازه‌گیری غلظت ترکیبات مواد مغذی، در شرایط تغذیه از پساب تصفیه‌شده، پارامترهای دیگر نیز سنجش شد. بر این اساس و همان‌طور که نمودار شکل ۱۰ نشان می‌دهد، پس از چهار روز میزان کاهش BOD محلول به ۷۵ درصد می‌رسد که می‌تواند ناشی از جذب بخشی از مواد آلاینده، تجمع باکتری‌ها در ریشه‌های گیاه و هوادهی بالای آن باشد [۱۹]. شایان ذکر است که در مدت زمان

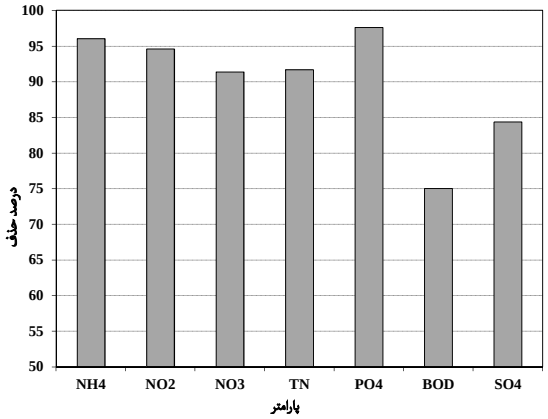
[1] Nitrification

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- مقادیر متوسط اندازه‌گیری شده پارامترهای مختلف در محیط آبی

زمان ماند (روز)	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	DO	BOD	HCO_3^-	SO_4^-	F^-	EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)
	(میلی‌گرم در لیتر)									
ورودی	۲/۳ ± ۰/۵۱	۱/۱ ± ۰/۳۲	۴۳/۴ ± ۷/۴۲	۲/۹ ± ۰/۴۶	۱/۸ ± ۱/۲۵	۱۲ ± ۳/۲	۱۸۹/۷ ± ۱۵/۷	۴/۷ ± ۱/۳	۰/۲۵ ± ۰/۰۸	۷۳۶ ± ۱۴
روز اول	۰/۲۴ ± ۰/۰۶	۰/۵۳ ± ۰/۱۴	۳۱/۸ ± ۵/۵	۰/۴۴ ± ۰/۱۲	۵/۵ ± ۱/۵۸	-	۱۸۷/۴ ± ۱۱/۳	۳/۲ ± ۰/۹	۰/۲۴ ± ۰/۰۸	۹۱۵ ± ۲۳
روز دوم	۰/۱۴ ± ۰/۰۵	۰/۱۶ ± ۰/۰۹	۲۲/۷ ± ۴/۱۷	۰/۱ ± ۰/۰۳	۶ ± ۱/۱	-	۱۷۱/۲ ± ۱۳/۱	۲/۳ ± ۰/۶	۰/۲۱ ± ۰/۰۷	۸۲۲ ± ۱۷
روز سوم	۰/۰۹ ± ۰/۰۳	۰/۱۳ ± ۰/۰۵	۸/۱ ± ۱/۴۶	۰/۰۷ ± ۰/۰۲	۷/۵ ± ۱/۷	-	۶۹/۵ ± ۲۸/۴	۰/۸ ± ۰/۱	۰/۱۹ ± ۰/۰۷	۷۶۶ ± ۸
روز چهارم	۰/۰۹ ± ۰/۰۳	۰/۰۶ ± ۰/۰۲	۳/۹ ± ۰/۷۵	۰/۰۷ ± ۰/۰۲	۷/۷ ± ۰/۷	۳/۱ ± ۱/۵	۶۷/۹ ± ۸/۶	۰/۷ ± ۰/۰۸	۰/۱۷ ± ۰/۰۶	۷۶۰ ± ۱۱



شکل ۱۰- متوسط درصد حذف پارامترهای مختلف از محیط آبی پس از چهار روز

ماند ۴۸ ساعت، افزایش غلظت اکسیژن محلول تا بیش از ۷ میلی‌گرم در لیتر در سیستم مشاهده شده است و همین عامل می‌تواند موجب افزایش حذف ترکیبات نیتریت و آمونیوم از محیط باشد (جدول ۲). مقادیر متوسط و انحراف معیار اندازه‌گیری شده پارامترها در دوره مطالعه به‌صورت هفتگی در جدول ۲ آمده است. بر اساس مقادیر انحراف معیار مندرج در این جدول، چنین نتیجه گرفته می‌شود که کاهش این میزان در پارامترهای مختلف در مدت پالایش، می‌تواند نشانگر قابلیت این روش در تعدیل کیفی پساب و افزایش ظرفیت بهره‌برداری در کنترل نوسانات کیفی باشد. این نکته به‌ویژه از نظر رعایت ضوابط محیط زیستی و یا استفاده مجدد از پساب اهمیت دارد.

همچنین مشاهده شده است که ترکیبات دیگر موجود در محیط آبی همچون بیکربنات، سولفات و حتی فلوئوراید نیز در طی چهار روز به‌طور متوسط به‌ترتیب به میزان ۶۴، ۸۵ و ۳۲ درصد کاهش یافته‌اند که احتمالاً به‌دلیل جذب توسط گیاه است. این نکته قابل توجه است که کاهش غلظت سولفات در شرایط هوازی از محیط آبی می‌تواند احتمال انتشار بو در مخازن سدها و برکه‌ها را کاهش دهد. همچنین میزان هدایت الکتریکی آب در این دوره به‌طور نسبی از نوسان برخوردار بوده است.

به‌علاوه ارزیابی میزان جذب ترکیبات توسط اندام‌های گیاه پس از دوره مطالعه در محیط پایلوت نشان داده است که گیاه وتیور به ترتیب در برگ و ریشه خود به میزان ۱۷ و ۱۳ (میلی‌گرم در گرم وزن خشک) نیتروژن کل و ۲/۳ و ۱/۸ (میلی‌گرم در گرم وزن خشک) فسفر کل ذخیره نموده است. این بدان معنی است که خاصیت مورفولوژی گیاه به گونه‌ای است که مواد غذایی بیشتری را در برگ‌های خود ذخیره می‌کند. بنابراین هرس کردن آن و یا شرایط آب و هوایی سرد مانند فصل زمستان می‌تواند به‌ترتیب به افزایش و کاهش جذب مواد مغذی در گیاه بیانجامد. به همین علت است که وجود سایه در درازمدت باعث ضعف گیاه و کاهش کارآمدی آن می‌شود [۳]. همچنین مقدار ترکیبات نیتروژن و فسفر در اندام برگ نمونه شاهد کاشته شده در خاک از تفاوت اندکی برخوردار بوده و به‌ترتیب به ۱۸ و ۲/۸ میلی‌گرم در گرم وزن خشک می‌رسد. مقادیر محاسبه شده جذب نیتروژن و فسفر در برگ به ترتیب ۱/۷ و ۰/۱۸درصد بود که در مقایسه با نتایج مطالعات کشور سنگاپور کمتر می‌باشد. جذب کمتر نیتروژن در برگ‌های وتیور و پالایش بیشتر آب در مطالعات پایلوتی نسبت به شرایط آزمایش سنگاپور می‌تواند به این علت باشد که شرایط آزمایش به‌صورت ناپیوسته بوده و محیط پایلوت برای تغذیه پنج گیاه وتیور در طی چهار روز از فقر ماده مغذی نسبت به جریان پیوسته آب برخوردار بوده است. همچنین از آنجایی که جریان متلاطم مشابه شرایط رودخانه در محیط پایلوت وجود ندارد، کاهش غلظت نیتروژن و فسفر در شرایط پایلوت می‌تواند ناشی از رشد گونه‌های باکتریایی بیشتر در محیط اطراف ریشه و فعالیت‌های میکربی باشد.

هرچند نتایج حاصل از حذف ترکیبات مواد مغذی از آب و جذب آنها در اندام‌های گیاه در این تحقیق، به‌دلیل وجود شرایط آب و هوایی مختلف، سن گیاه و تغذیه ناپیوسته، نسبت به مطالعات موجود تفاوت کمی دارد، اما روند تغییرات مشابهی داشته و می‌تواند مبنایی برای مطالعات بیشتر در زمینه گیاه‌پالایی به‌ویژه به‌صورت جریان پیوسته در کشور باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده از گیاه وتیور به‌صورت سکوهای شناور در

Archive of SID

www.SID.ir

سدها و دریاچه‌ها و یا به‌عنوان واحد تکمیلی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در نیزارهای مصنوعی و در چارچوب فرایند گیاه‌پالایی مطابق شرایط آب و هوایی تهران امکان‌پذیر است. در همین راستا، جمشیدی و همکاران در سال ۲۰۱۴ در یک ساختار مدیریتی پیشنهاد نمودند به منظور ارتقای تصفیه‌خانه‌های محلی موجود در شهر تهران، از سکوهای شناور حاوی گیاه وتیور در مسیل‌های شهری استفاده شود تا موجب بهبود کیفیت منابع آب سطحی شود [۲۰].

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این پژوهش، امکان‌سنجی رشد گیاه وتیور در پساب به‌صورت هیدروپونیک و ارزیابی میزان رشد گیاه و حذف مواد مغذی از آن بود. بر اساس اهداف این مطالعه و نتایج حاصل از مطالعات می‌توان چنین نتیجه گرفت که گیاه وتیور می‌تواند به‌صورت هیدروپونیک در محیط حاوی آب‌های آلوده به خوبی رشد نماید و با جذب مواد مغذی، ذخیره‌سازی آنها در ریشه و به‌ویژه برگ‌های خود و هوادهی محیط آبی، مقدار مواد مغذی موجود را کاهش دهد. این توانایی، کاربری این گیاه را به‌عنوان واحد تصفیه تکمیلی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و یا واحدهای شناور در مخازن و دریاچه‌های سد در منابع آب سطحی ممکن می‌سازد.

همچنین پیشنهاد می‌شود که گیاه وتیور به‌منظور پالایش نهایی پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و با هدف حذف مواد مغذی پیش از ورود به منابع آب سطحی از حداقل زمان ماند معادل دو روز برخوردار باشد تا الزامات مربوط به تخلیه پساب به منابع آب پذیرنده و استفاده مجدد از آنها به‌ویژه درخصوص پارامترهای آمونیوم، نیتریت و فسفات رعایت شود. از طرفی انجام مطالعات پایلوتی نشان داد که استفاده از فرایند گیاه‌پالایی با گونه وتیور با شرایط اقلیمی و آب و هوایی ایران سازگار است. به‌علاوه استفاده از این گیاه باعث کاهش هزینه‌های مربوط به ساخت، بهره‌برداری و نگهداری از واحدهای تصفیه می‌شود و به سادگی توسط کارکنان بومی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این روش، روشی کارآمد و مقرون به‌صرفه به‌منظور ارتقای تصفیه‌خانه‌ها با رویکرد حذف مواد مغذی به‌شمار می‌رود.

۵- مراجع

1. Akarzadeh, A., Vakhshouri, M., and Arbabi, M. (2013). “An introduction of Vetiveria zizanioides as a novel approach for sustainable development and efficient water resource management.” *Proc. 2nd National Conference of Environmental Planning and Conservation*, Hamedan, Iran. (In Persian).
2. Vakhshouri, M. (2013). “Feasibility study of treating contaminated waters with excess nutrients using Vetiveria sp.” MSc Thesis, Islamic Azad University of Science and Researches, Bushehr, Iran. (In Persian)
3. Troung, P., Van, T., and Pinners, E. (2008). *Vetiver system application: A technical reference manual*, 2nd Ed., Create Space Independent pub. Platform, UK.
4. Chomchalow, N. (2011). “Vetiver research, development and applications in Thailand.” *AU Journal of Technology*, 14 (4), 268 - 274.
5. Mickovski, S. B., van Beek, L. P. H., and Salin, F. (2005). “Uprooting of vetiver uprooting resistance of vetiver grass (Vetiveria zizanioides).” *Plant and Soil*, 278, 33-41.
6. Edelstein, M., Plaut, Z., Dudai, N., and Ben-Hur, M. (2009). “Vetiver (Vetiveria zizanioides) responses to fertilization and salinity under irrigation conditions.” *J. of Environmental Management*, 91, 215-221.
7. Klomjek, P., and Nitisoravut, S. (2005). “Constructed treatment wetland: A study of eight plant species under saline condition.” *Chemosphere*, 58, 585-593.
8. Truong, P., and Hart, B. (2001). *Vetiver system for wastewater treatment*, Technical Bulletin No. 2001/2. Pacific Rim Vetiver Network, Office of the Royal Development Projects Board, Thailand.
9. Liao, X. (2000). “Studies on plant ecology and system mechanisms of constructed wetland for pig farm in south China.” PhD Thesis, South China Agricultural University, Guangzhou, Gouangdong, China.
10. Jampeetong, A., Brix, H., and Kantawanichkul, S. (2012). “Effects of inorganic nitrogen forms on growth, morphology, nitrogen uptake capacity and nutrient allocation of four tropical aquatic macrophytes, Salvinia culcullata, Ipomoea aquatica, Cyperus involucratus and Vetiveria zizaniodes.” *Aquatic Botany*, 97, 10-16.

Archive of SID

www.SID.ir

11. Minghui, L., Wen, Z., Yu, X., and Yongsheng, G. (2011). “Study on removal efficiencies of pollutant from constructed wetland in aquiculture wastewater around Poyang lake.” *Procedia Environmental Sciences*, 10, 2444-2448.
12. Boonsong, K., and Chansiri, M. (2008). “Domestic wastewater treatment using Vetiver grass cultivated with floating platform technique.” *AU Journal of Technology*, 12 (2), 73-80.
13. Fallahi, F., Ayati, B., and Ganjidoust, H. (2012), “Lab scale study of nitrate removal by phytoremediation". *J. Water and Wastewater*, 81, 57-65. (In Persian).
14. Chua, L., Tan, S.B.K., Sim, C.H., and Kumar Goyal, M. (2012), “Treatment of baseflow from an urban catchment by a floating wetland system.” *Ecological Engineering*, 49, 170-180.
15. Akbarzadeh, A., Jamshidi, S., and Vakhshouri, M. (2013). “Feasibility study of upgrading wastewater treatment plants using Vetiveria sp.” *Proc. 3rd International Conference on Environmental Planning and Management*, Tehran, Iran. (In Persian).
16. APHA. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 24th Ed., American Public Health Association, Washington D.C.
17. Landmeyer, J. E. (2012). *Introduction to phytoremediation of contaminated groundwater*, Springer Pub., New York.
18. Anderson, T. A., Gutherie, E. A., and Walton, B.T.(1993). “Bioremediation in the rhizosphere.” *Environmental Science and Technology*, 27, 2630-2636.
19. Duschenkov, V., Nanda Kumar, P. B. A., Motto, H., and Raskin., I. (1995). “Rhizofilteration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams.” *Environmental Science and Technology*, 30, 1239-1245.
20. Jamshidi, S., Ardestani, M., and Niksokhan, M. H. (2014). “Upgrading wastewater treatment plants based on reuse demand, technical and environmental policies (a case study).” *Environmental Energy and Economics International Research*, (In Press).

Archive of SID

www.SID.ir