

Performance Evaluation of Artificial Wetland Subsurface with Horizontal Flow in Wastewater Treatment

Zabihollah Yousefi¹,
Reza Ali Mohamadpur Tahamtan²,
Mohammad Ali Zazouli¹,
Seyed Mojtaba Hoseini³

¹ Associate Professor, Department of Environmental Health, Faculty of Health, Health Sciences Research Center, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

² Department of Biostatistics, Faculty of Health, Health Sciences Research Center, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

³ M.Sc Student Environmental Health, Faculty of Health, Student Research Committee, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received September 11, 2012 ; Accepted March 16, 2013)

Abstract

Background and purpose: There are limited studies on the natural systems of wastewater treatment by artificial wetlands subsurface in Northern Iran. The goal of this study was determining the efficiency of the artificial wetlands pilot system and the efficiency of horizontal subsurface flow systems for a variety of pollutants.

Materials and methods: This study used artificial wetlands pilot system for removal of BOD, COD, TSS, TKN and TP in wastewater. Dimensions of reactors used in this study were 4 to 6 m length, 1.5m width and 0.8 m depth. Reactor No. 2 was used as a blank (unplanted) reactor. Reactors were located in parallel and *Phragmites Australis* -a commonly found plant in the area- was used in this study. Samples of wastewater were taken from the input and output of constructed wetland's subsurface and tested in laboratory of faculty of health in Mazandaran University of Medical Sciences based on the standard reference method for experiments in water and wastewater.

Results: Average removal using subsurface wetland showed that the unplanted reactor efficiency for removal of BOD, COD, TSS, TKN and TP was 47.11, 70.26, 50.83, 19.69 and 91.69 percent and for reactors with *Phragmites Australis* the percentage was 81.47, 78.5, 87.87, 76.18 and 97.80, respectively. Optimum hydraulic detention time was six days and gravel size 10 mm was better than 20 mm.

Conclusion: This system as an efficient system can reduce the conventional pollutants of wastewater to the standards of secondary wastewater treatment. Furthermore, this system can remove nitrogen and phosphorus from effluent discharges more than conventional systems.

Keywords: Subsurface constructed wetland, pollutant removal

ارزیابی کارآبی و تلند مصنوعی زیر سطحی با جریان افقی در تصفیه فاضلاب

ذبیح الله یوسفی^۱
رضاعلی محمدپور تهمتن^۲
محمدعلی ززولی^۱
سید مجتبی حسینی^۳

چکیده

سابقه و هدف: مطالعات محدودی روی سیستم‌های طبیعی تصفیه فاضلاب توسط وتلندهای مصنوعی زیر سطحی در شمال ایران انجام شده است. هدف کلی این تحقیق، تعیین کارآبی سیستم پایلوت وتلندهای مصنوعی و کارآبی سیستم با جریان افقی زیر سطحی برای انواع آلاینده است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه با استفاده از وتلند مصنوعی جریان افقی برای حذف COD، BOD، TKN و TP فاضلاب انجام شد. ابعاد ۴ حوضچه مورد استفاده عبارت است از: ۶ متر طول، ۱/۵ متر عرض و ۰/۸ متر عمق تراکم نی ۱۶ ریزوم نی در متر مربع بود. جهت ارزیابی عملکرد گیاه نی، یک حوضچه، به عنوان حوضچه شاهد که فاقد نی بود در نظر گرفته شد. حوضچه‌ها به صورت موازی استقرار داشتند. از گیاه متداول منطقه به نام *Phragmites Australis* استفاده گردید. نمونه‌های فاضلاب از ورودی و خروجی وتلند مصنوعی زیر سطحی اخذ و جهت انجام آزمایش به آزمایشگاه دانشکده بهداشت منتقل و آزمایشات لازم براساس مرجع استاندارد متد برای آب و فاضلاب عمل شد.

یافته‌ها: میانگین حذف با استفاده از وتلند زیرسطحی جریان افقی نشان داد که درصد کارایی حذف در حوضچه شاهد که فاقد نی بود برای COD، BOD، TKN و TP و کدورت (NTU) به ترتیب ۴۷/۱۱، ۷۰/۲۶، ۵۰/۸۳، ۱۹/۶۹، ۹۱/۶۹ و برای حوضچه داری گیاه نی فراگماتیس استرالیس درصد کارایی حذف برای COD، BOD، TSS، TKN، TP به ترتیب ۸۱/۴۷، ۷۸/۵، ۸۷/۸۷، ۷۶/۱۸ و ۹۷/۸ به دست آمد. بهترین زمان ماند هیدرولیکی ۶ روز تعیین شد و سایز ۱۰ میلی متر گراول مناسب تر از سایز ۲۰ میلی متر است.

استنتاج: این سیستم به عنوان یک سیستم کارآمد می‌تواند در کاهش آلاینده‌های متداول فاضلاب در حد استانداردهای تصفیه ثانویه فاضلاب‌ها و در حذف ازت و فسفر بالاتر از سیستم‌های متداول تصفیه در دفع پساب به آب‌های سطحی و زیرزمینی و آبیاری در مزارع کشاورزی موفق باشد.

واژه های کلیدی: نيزار مصنوعی زیرسطحی، حذف آلاینده‌ها، تصفیه فاضلاب

مقدمه

عموماً در ایران و به خصوص در مازندران، اغلب از سیستم‌های تصفیه فاضلاب مکانیزه استفاده می‌شود. فعال از نوع هوادهی ممتد در اجتماعات کوچک، سیستم‌های لجن فعال متداول در شهرهای بزرگ و لجن

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی شماره ۱۹-۹۰ است که توسط معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران تامین شده است.

مؤلف مسئول: سید مجتبی حسینی - ساری: کیلومتر ۱۸ جاده خزرآباد، مجتمع دانشگاهی پیامبر اعظم، دانشکده بهداشت
E-mail: m.hossaini57@gmail.com

۱. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۲. گروه آمار زیستی، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۲۱ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۱/۹/۲۶ تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۱۲/۲۶

سیستم‌های لاگون هوادهی، لجن فعال نوع تثبیتی تماسی، صافی چکنده و برکه تثبیت، از انواع سیستم‌های تصفیه مورد کاربرد برای تصفیه فاضلاب‌های بهداشتی و شهری محسوب می‌شوند که در مازندران عمدتاً سیستم‌های لجن فعال متداول برای شهرهای بزرگ و لجن فعال ممتد برای اجتماعات کوچک‌تر در طرح‌های اجرایی مورد توجه‌اند که این سیستم‌ها عمدتاً به دلایل منابع مالی ناکافی، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، عدم حضور مشاورین باتجربه و آگاه و عدم اپراتورهای آموزش دیده فاقد کارآمدی مناسب‌اند. این سیستم‌ها عموماً برای دفع نوترینت‌ها و فلزات سنگین طراحی نمی‌شوند، لذا تخلیه پساب تصفیه شده این سیستم‌ها به رودخانه و دریا و آبراهه‌ها سبب پدیده اوتریفیکاسیون می‌شود (۲، ۱). افزایش توجه به فرایندهای طبیعی، ضرورت تصفیه فاضلاب در مناطق کم جمعیت، کاربرد تصفیه فاضلاب به صورت عمومی، هزینه‌ها و نیازهای نگهداری و بهره‌برداری و اهداف حذف نوترینت‌ها و فلزات سنگین از فاضلاب‌ها، از جمله عواملی هستند که سبب گردیده در سال‌های اخیر در سراسر دنیا توجه عمومی به سوی تلندها جلب گردد (۳، ۱). بیش از ده‌ها سال از برکه تثبیت فاضلاب می‌گذرد. به علت سادگی و هزینه پایین بهره‌برداری، به عنوان یک تکنولوژی تصفیه فاضلاب در کنار سیستم‌های مکانیزه در کشور استفاده می‌شود. با این حال برکه‌های تثبیت بعد از چند سال اول بهره‌برداری، با مشکل تخلیه جامدات بیولوژیکی (جلبک‌ها) به داخل آب‌های پذیرنده مواجه می‌شوند که سبب افزایش مواد مغذی آب‌های پذیرنده می‌شوند. تلندهای مصنوعی طرح‌های جدیدی از سیستم‌های طبیعی‌اند که اولین بار در اوایل دهه ۱۹۵۰ توسط دکتر کیت سیدل از انستیتوی Max Plank در آلمان غربی ارائه شد. در طول سال‌های گذشته ترکیبی از سیستم‌های تصفیه طبیعی از جمله تلندهای مصنوعی به عنوان یک راه حل مشکل مطرح گردید و سیستم‌های هیبریدی در کارهای مختلف مورد استفاده قرار گرفت (۷-۳).

بر اساس طراحی، و تلندهای مصنوعی سه گروه‌اند. و تلندهای جریان سطحی (SF)؛ و تلندهای جریان زیر سطحی (SSF) (جریان افقی و عمودی) و تلندهای هیبریدی (HS). در سیستم‌های با جریان سطحی، سطح سیال مورد تصفیه قابل مشاهده است و گیاهان از آب برون آمده‌اند. و تلندهای سطحی در کشورهای پیشرفته و آمریکا خصوصاً برای جریان‌های زیاد فاضلاب و زلال‌سازی فاضلاب از لحاظ نوترینت‌ها رایج‌اند (۸). اما این سیستم‌ها با محدودیت مساحت نسبتاً زیاد زمین، بوی بد و مشکل فعالیت در شرایط اقلیمی سردسیری مواجه‌اند. سیستم‌های و تلند با جریان زیر سطحی از کانال‌ها یا حوضچه‌های آب‌بندی شده با لایه‌های نفوذ ناپذیر درست شده‌اند که داخل آن تا ارتفاع معینی شن یا گراول ماسه یا خاک با دانه بندی معین پر می‌شوند فاضلاب به صورت عرضی در بستر جریان می‌یابد و در اثر تماس با محیط در منطقه ریشه گیاهان تصفیه می‌شود (۹، ۱۰). از طرفی و تلندهای زیر سطحی، برای شرایط اقلیمی سردسیری مناسب‌اند چون تصفیه در زیر سطح زمین اتفاق می‌افتد (۱۰). در سیستم‌های و تلند زیر سطحی وقتی هدف تصفیه حذف BOD و جامدات معلق (TSS) باشد، و تلند زیر سطحی با جریان افقی (HSSF)، گزینه مناسبی برای تصفیه می‌باشد (۱۱)؛ اما این سیستم تصفیه از لحاظ انتقال اکسیژن به میزان کافی برای انجام نیتریفیکاسیون کامل ناتوان است (۱۲). سیستم‌های و تلند با جریان عمودی، برای بهبود شرایط هیدرولیکی سیستم، تماس بهتر فاضلاب با ریشه و اکسیژن‌رسانی به بستر طراحی گردیدند (۵، ۱۳). این سیستم جریان، خود به دو شکل نوع جریان رو به پایین (Down flow) و نوع جریان روبه بالا (Up flow) دسته‌بندی می‌شود (۱۶-۱۲). سیستم‌های و تلند با جریان زیر سطحی از نوع عمودی (VSSF)، از شرایط هوایی مطلوبی برخوردارند و با اکسید نمودن ازت آمونیاکی فاضلاب، سبب انجام نیتریفیکاسیون می‌شوند (۱۳، ۱۴).

Bavor در سال ۱۹۹۵ گزارش کرد سیستم‌های

وتلندهای مصنوعی بالای ۹۰ درصد، از قابلیت کاهش غلظت‌های مواد آلی، جامدات معلق و باکتری‌های شاخص برخوردارند و در عین حال نیازهای بهره‌برداری شان کم است. به علاوه، این سیستم‌ها به صورت افزایشی برای تصفیه تکمیلی فاضلاب‌های تصفیه شده به موازات تکنولوژی‌های متداول تصفیه پساب مورد توجه قرار گرفته‌اند (۱۷). تحقیقات انجام شده بر روی پالایش آب‌های آلوده شهری تهران با تالاب مصنوعی و گیاه «فراگماتیس استرالیس» که توسط عباسعلی قادری انجام شد، نشان داد که میزان حذف COD، BOD و TSS به ترتیب برابر با 4.19 ± 3.40 و 20.36 ± 2.0 میلی گرم بر لیتر است. میزان حذف کلی فرم‌های مدفوعی توسط این سیستم بیش از ۹۹ درصد است (۱۸).

در مطالعه‌ای که توسط Fenxia و همکاران بر روی حذف نیترژن موجود در فاضلاب روستایی به وسیله وتلندهای مصنوعی هیبریدی دوگانه انجام گرفته است، جریان در مراحل اول و سوم به صورت جریان زیرسطحی افقی و در دومی به صورت جریان آزاد سه لایه بوده که میزان حذف مواد معلق کل، COD، نیترژن آمونیاکی، نیترژن کل و کل فسفر به ترتیب ۸۹، ۸۵، ۸۳، ۸۳ و ۶۴ درصد بوده است (۱۹).

مطالعه Herrera Melián و همکاران در تصفیه و بازیابی فاضلاب شهری توسط وتلند در مقیاس پایلوت، حذف ۸۶ درصدی برای BOD، ۸۰ درصدی برای COD و ۹۶ درصدی برای جامدات معلق (SS) را نشان داد (۲۰). گزارشات نشان دادند کارآیی دفع آلاینده‌ها ممکن است به صورت تابعی از هیدرولوژی وتلند، نوع خاک یا بستر و دانه‌بندی آن‌ها، نوع پوشش گیاهی و میزان غلظت آلاینده‌ها تغییر نماید (۲۱). مطالعات متعددی، غنی‌سازی فلزات سنگین توسط گیاهان آبرزی و استفاده از آن‌ها به عنوان اندیکاتورهای بیولوژیکی را گزارش نمودند (۴، ۵، ۷، ۱۲، ۱۳).

مازندران اکنون با حضور بیش از ۶۵۰ وتلند طبیعی و مساحت ۱۷۵۰۰ هکتار سطح تحت پوشش آب‌بندان‌های

طبیعی (وتلندها) بیش از تمامی استان‌های کشور به صورت طبیعی از این نوع سیستم‌ها برخوردار است، اما در جهت استفاده از قابلیت تصفیه فاضلاب سیستم‌های طبیعی و نیز استفاده از سیستم‌های نوین وتلند مصنوعی، فعالیت عمده‌ای صورت نگرفته و مطالعات بسیار محدودی روی سیستم‌های طبیعی منطقه شمالی ایران انجام شده است؛ از طرفی پدیده‌های مزاحمی چون ورود انواع سموم مصرفی کشاورزی، ورود فاضلاب‌های سمی و صنعتی و عوامل نامساعد دیگر تهدید کننده جدی برای پتانسیل‌های این سیستم‌ها بوده است (۱۵). کارآیی وتلندهای مصنوعی با شرایط هیدرولوژیکی منطقه، نوع متداول پوشش گیاهی، نوع بسترهای مورد استفاده، الگوهای جریان، بارهای آلی و هیدرولیکی مختلف و اهداف برنامه کاهش آلاینده‌ها مرتبط است. وابسته بودن وتلندها به انواع پارامترهای اقلیمی، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، بافت خاک و بستر و دانه‌بندی آن‌ها، غلظت آلاینده‌ها و اهداف تصفیه و مسائل بهره‌برداری، نگهداری و جوانب اقتصادی، از ضرورت‌های مطالعه این سیستم‌ها در هر شرایط اقلیمی است.

گیاه متداول نی (Reed Phragmites) می‌تواند به طور مؤثری مواد مغذی را جذب نمایند. این گیاه دارای توده بیومس بزرگی در دوناچه بالایی (برگ‌ها) و زیرین (ساقه و ریشه زیرزمین) می‌باشد که به عنوان سطح سوپسترا محسوب می‌شوند. بافت‌های زیرسطحی گیاه، به طریق افقی و عمودی رشد می‌کنند و یک ماتریکس گسترده‌ای را ایجاد می‌نمایند که ذرات خاک را به هم متصل می‌نماید و سطوح گسترده‌ای را برای جذب نوترینت‌ها و یون‌ها فراهم می‌سازند. لوله‌های خالی در بافت‌های گیاهی قادر می‌سازد گیاه را تا از برگ‌ها به ناحیه ریشه و اطراف خاک منتقل سازد این کار قادر می‌سازد فرآیند تجزیه هوازی فعال میکروبی و جذب آلاینده‌ها در سیستم آب اتفاق بیفتد (۷، ۹، ۲۲). از آنجایی که مازندران دارای نزارهای طبیعی و صدها وتلند

طبیعی است و حضور نیزارهای طبیعی در این استان بیش از هر منطقه‌ای از کشور برجسته است، ضرورت دارد با توجه به شرایط بومی و منطقه‌ای، نوع بسترها و شرایط اقلیمی در رابطه با سیستم‌های تصفیه طبیعی گام‌های بیشتری برداشته شود (۲۴، ۲۳، ۱۵). ویژگی این مطالعه در قیاس با سایر مطالعات انجام شده آن است که عمدتاً در کارهای انجام شده دامنه تغییرات اعمال شده به لحاظ زمان ماند هیدرولیکی و گراول و آنالیزهای انجام شده و نوع فاضلاب مورد استفاده به گستردگی این تحقیق نبوده است و عمدتاً فاقد تدابیر اکسیژن رسانی طبیعی بوده است (۱۲، ۹)، لذا این تحقیق بر آن است تا برای اولین بار در کشور و در مازندران در مقیاس پایلوتی، سیستم وتلند مصنوعی را در پردیس دانشگاه برای فاضلاب پردیس دانشگاه که شبیه فاضلاب‌های شهری و خانگی ضعیف اما مخلوط با فاضلاب‌های مختلف آزمایشگاهی و تحقیقاتی مرسوم در یک مجتمع دانشگاهی است، مورد ارزیابی قرار دهد تا نتایج این تحقیق برای کل منطقه و کشور و شرایط مشابه دیگر مورد استفاده قرار گیرد. هدف کلی این، تعیین کارایی پایلوت سیستم وتلند مصنوعی زیر سطحی با جریان افقی و تعیین کارایی سیستم برای انواع آلاینده‌ها است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه تجربی و کاربردی با استفاده از نیزار مصنوعی برای تصفیه فاضلاب مجتمع پردیس دانشگاه علوم پزشکی مازندران انجام شد. طول دوره تحقیق یک سال بوده است. این مطالعه در ۴ فصل کار شده است که یک فصل آن برای راه‌اندازی و پایداری سیستم بوده است فاضلاب مجتمع که شامل فاضلاب آزمایشگاه‌های تحقیقاتی، دانشکده‌های تحت پوشش، خوابگاه‌های دانشجویی، فاضلاب حاصله از شستشوی محوطه و آب باران و... بوده، ابتدا وارد حوضچه ته‌نشینی اولیه شد، سپس فاضلاب جهت وتلند، توسط یک پمپ به حوضچه نگهداری فاضلاب پمپاژ شد، در ادامه فاضلاب

توسط پمپ دیگری به یک تانکر ۱۰۰۰ لیتری در ارتفاع ۱/۵ متری پمپاژ و فاضلاب با نیروی ثقل وارد حوضچه‌ها شد. ۴ حوضچه، هر کدام به طول ۶ متر و عرض ۱/۵ متر و عمق ۰/۸ متر وجود داشت. کاشت نی که در اطراف محل تصفیه خانه به وفور رشد می‌کند صورت گرفت. تراکم نی ۴ ریزوم در مترمربع بود. ابتدا با ریختن گراول به سایزهای ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر و عمق حدود ۶۰ سانتی‌متر و سپس با لوله کشی مختلف جهت امکان ترکیب سیستم‌ها و تغییرات الگوی جریان همراه با نصب شیرآلات مختلف، کار آماده‌سازی سیستم انجام گرفت. دبی ورودی یا خروجی جریان توسط دبی سنج اندازه‌گیری شد.

الگوی جریان به صورت افقی از طریق یک لوله تقسیم و شیرآلات کنترل انجام شد. جریان به صورت موازی از هر ۴ حوضچه با تنظیم بار هیدرولیکی صورت گرفت. از گیاه متداول منطقه با نام *Phragmitis Australis* استفاده گردید. تدابیری برای اکسیژن رسانی بیش‌تری به ریزوم‌های گیاهی به طریق طبیعی در سیستم به کار گرفته شد تا کمبود احتمالی اکسیژن جبران شود (تصویر شماره ۱). در این خصوص لوله‌های هواده مشبک که به صورت دستی در حوضچه‌ها تعبیه شده بود استفاده گردید. پس از کاشت نی و رشد مناسب نی‌ها و طی دوران تثبیت، نمونه‌های فاضلاب از ورودی و خروجی نیزار مصنوعی و در ظروف پلاستیکی ۱ لیتری اخذ و جهت انجام آزمایش به آزمایشگاه دانشکده بهداشت منتقل و پس از نگهداری در یخچال آزمایشات لازم انجام شد.

محدوده سه ماهه اول، برای راه‌اندازی و کاشت نی و آزمایشات اولیه بوده است و یک هفته بعد از کاشت نی، آزمایشات شروع شد منتهی بعد از دوره پایداری حدوداً یک ماه و نیم بعد از کاشت نی نمونه‌برداری اساسی انجام شد. در این مرحله فاضلاب از طریق لوله تقسیم به حوضچه‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ وارد شده و به صورت افقی از آن‌ها خارج گردید. دو حوضچه دارای گراول ۲۰ میلی‌متر و دو حوضچه دارای گراول ۱۰

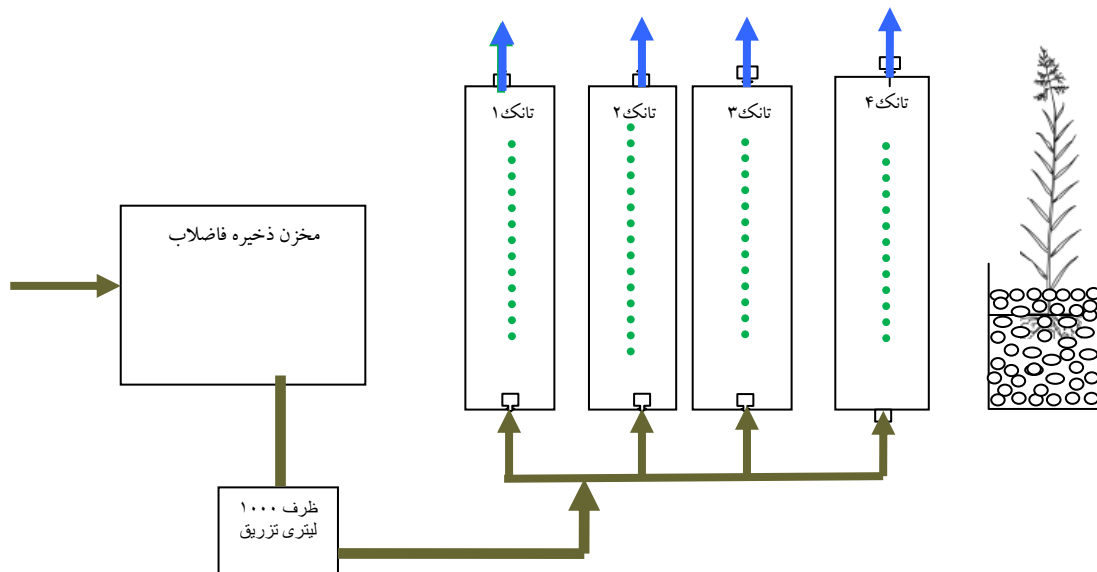
یافته‌ها

همان‌طور که جدول شماره ۲ نشان می‌دهد بیش‌ترین درصد حذف مربوط به BOD، COD، TSS، ازت کل، فسفر کل، کدورت، هدایت الکتریکی، آمونیاک، نیترات در زمان ماند های ۲ و ۴ و ۶ روز در زمان ماند ۶ روز می باشد. راندمان حذف در زمان ماند های ۴ و ۶ و روز تفاوت اندکی دارد. بیش‌ترین کارایی در زمان ماند ۶ روز مشاهده شد. کارایی حذف برای سیستم وتلند هیبریدی دو مرحله‌ای در زمان ماند های ۲ و ۴ و ۶ روز در جدول شماره ۱ آورده شده است. میانگین حذف با استفاده از وتلند زیر سطحی دو مرحله‌ای نشان داد که درصد کارایی حذف در حوضچه شاهد که فاقد نی بود نسبت به حوضچه دارای گیاه نی کم‌تر است. نتایج آنالیز آماری بر روی اطلاعات به دست آمده نشان می‌دهد که از نظر زمان ماند و کارایی حذف متغیرها تفاوت معنی‌دار وجود دارد ($p < 0.05$).

همان‌طور که جدول شماره ۳ نشان می‌دهد، میانگین فسفر کل فاضلاب مورد تزریق به حوضچه‌ها در این مطالعه، از محدوده ۶ تا ۲۴ میلی‌گرم در لیتر تغییر کرد و

میلی‌متر بودند. یک حوضچه به عنوان شاهد (فاقد نی) و مابقی دارای نی بودند. این فاز از سه زمان ماند هیدرولیکی ۲ روزه، ۴ روزه و ۶ روزه استفاده گردید. دبی ورودی به ترتیب ۰/۹ لیتر در ثانیه، ۰/۶۵ لیتر در ثانیه و ۰/۳۲ لیتر در ثانیه بر اساس زمان ماندهای هیدرولیکی در هر حوضچه منظور گردید. کلیه تغییرات از طریق پمپ و شیرآلات تعبیه شده انجام شد. نمونه فاضلاب از ورودی سیستم ونیز خروجی های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ در فواصل زمانی مناسب اخذ و آنالیز شدند.

مشخصات راکتورهای مورد استفاده در تحقیق، در جدول شماره ۱ نمایش داده شد. آزمایشات مختلف COD، TSS، ازت و فسفر کل، کدورت، هدایت الکتریکی، PH، آمونیاک و BOD بر روی نمونه‌های ورودی و خروجی انجام و بر اساس مرجع استاندارد متد برای آب و فاضلاب اعمال شد (۲۵). اطلاعات حاصل از اندازه گیری‌های مورد نظر محلول آبی، توسط نرم افزار SPSS مورد آنالیز و آزمون های آماری آنالیز واریانس دوطرفه و رگرسیون قرار گرفت. رسم جداول و نمودارها به کمک برنامه اکسل انجام گرفت.



تصویر شماره ۱: مقطع جریان فاضلاب و فلوجارت استقرار حوضچه‌ها و مسیر لوله کشی و ورودی و خروجی فاضلاب در پایلوت تحقیق

جدول شماره ۱: مشخصات راکتورهای مورد استفاده در تحقیق

زمان ماند (روز)	نسبت طول به عرض	مساحت سطح (m ²)	نوع مدیا	تخلخل درصد	عمق گراول (cm)	اندازه موثر	عمق مایع (cm)	حجم گراول (لیتر)	حجم مفید فاضلاب (لیتر)
۱-۶	۴	۹	گراول	۵۰	۸۰	۲۰ m m	۶۰	۷۲۰۰	۲۷۰۰
۱-۶	۴	۹	گراول	۴۵	۸۰	۱۰ m m	۶۰	۷۲۰۰	۲۴۳۰
۱-۶	۴	۹	گراول	۴۵	۸۰	۱۰ m m	۶۰	۷۲۰۰	۲۴۳۰
۱-۶	۴	۹	گراول	۵۰	۸۰	۲۰ m m	۶۰	۷۲۰۰	۲۷۰۰

جدول شماره ۲: کارایی (انحراف معیار تمیانگین) حذف سیستم در گروه ها (حوضچه های مورد و شاهد) بر حسب زمان ماند

پارامتر	حوضچه ۱ (شاهد)	حوضچه ۲ فائقه (شاهد)	حوضچه ۳ (شاهد)	حوضچه ۱ (شاهد)	حوضچه ۲ فائقه (شاهد)	حوضچه ۳ (شاهد)	حوضچه ۱ (شاهد)	حوضچه ۲ فائقه (شاهد)	حوضچه ۳ (شاهد)
COD	۳۷/۸۱±۱۵/۴۸	۲۴/۳۹±۱۳/۶۸	۳۹/۱۵±۱۶/۹	۵۷/۷۷±۶/۹۳	۴۴/۸۴±۱۳/۰۵	۶۹/۲۴±۸/۰۸	۷۷/۸۸±۱۰/۳۲	۷۰/۲۶±۱۰/۴۲	۷۸/۵±۳/۷۷
TKN	۵۳/۷۵±۱۰/۳۹۹	۵۰/۸۳±۱۱/۱۹	۶۵/۶۶±۱۱/۵۸	۵۷/۱۸±۲/۳۱	۴۷/۵۹±۰/۷۷	۶۲/۴۷±۵/۴۲	۸۴/۸۴±۲/۱۴	۷۷/۲۷±۳/۲۱	۸۷/۸۷±۳/۳۵
TP	۲۷/۷۷±۸/۸۸	۱۹/۶۳±۱۰/۴۸	۲۸/۶۳±۱۵	۵۸/۳۳±۲/۳۸	۵۱/۰۱±۴/۴۸	۶۹/۲۴±۸/۰۸	۷۴/۲۴±۷/۷	۶۵/۵۳±۹/۶	۷۶/۱۸±۷/۳۱
TSS	۵۰/۵۵±۱۵/۸۳	۵۵/۵۵±۹/۶۱	۴۸/۸۸±۱۸/۵۹	۷۸/۱۹±۳/۴۲	۷۸/۱۹±۳/۴۲	۷۸/۱۹±۳/۴۲	۸۷/۴۵±۵/۲۲	۸۷/۴۵±۵/۲۲	۸۷/۸۷±۵/۳۲
نیترات	۵۱/۱۱±۶/۱۹	۴۵/۱۶±۱۰/۴۵	۵۳/۵۳±۶/۸	۶۵/۲۲±۴/۵۴	۵۷/۱۸±۱۳/۴۲	۶۷/۵۹±۳/۸۳	۷۳/۴۲±۲/۱۱	۷۳/۳۷±۲/۳۷	۷۶/۴۶±۵/۱۸۳
کدورت	۸۵/۲۵±۶/۶۲	۹۱/۶۹±۱/۱۱	۹۲/۴۲±۱	۹۵/۹۸±۰/۴۲	۹۶/۴۹±۰/۳۹	۹۶/۴۹±۰/۳۹	۹۱/۱۸±۰/۱۷	۹۷/۶۹±۰/۸	۹۷/۸±۱۳
آمونیاک	۵۳/۲۱±۱۷/۷	۴۷/۷۴±۱۸/۹۲	۵۵/۸۹±۱۷/۹۴	۵۹/۸۳±۱۹/۱۲	۵۴/۵۶±۲۰/۳۷	۶۶/۰۶±۱۵/۳۹	۸۲/۰۲±۵/۷۲	۶۶/۰۶±۱۵/۳۹	۸۹/۸۹±۸/۲۱
BOD	۴۴/۵۵±۶/۱۹	۴۷/۱۱±۶/۱۹	۵۳/۶۶±۳/۵۷	۶۰/۰۷±۱/۷۸	۵۱/۹±۱/۷۱	۶۲/۲۹±۴/۱۷	۷۳/۴۹±۶/۷۲	۷۳/۴۹±۶/۷۲	۸۱/۴۷±۵/۴۴

جدول شماره ۳: مقادیر کمی متغیرها (انحراف معیار تمیانگین) در سیستم نیزاز مصنوعی جریان افقی

متغیرها	زمان ماند (روز)	ورودی (Mean±SD)	خروجی حوضچه ها (Mean±SD)
فسفر کل (میلی گرم در لیتر)	۲	۱۴/۳۸±۶/۵۸	۱۰/۶۹±۵/۸۱
	۴	۱۷/۶۳±۲/۰۱	۷/۳۴±۰/۸۷
	۶	۲۰/۴۸±۳/۶۷	۵/۱۸±۱/۴۸
TKN (میلی گرم در لیتر)	۲	۱۵/۶۶±۶/۷۹	۶/۸۴±۲/۹۹
	۴	۱۲/۳۲±۹/۰۱	۴/۳۲±۲/۳
	۶	۱۵/۷۵±۸/۹۶	۲/۷۹±۱/۴
COD (میلی گرم در لیتر)	۲	۲۲۳/۳۳±۲۵/۱۶	۱۳۶/۶۶±۲۰/۸۱
	۴	۲۰۶/۶۶±۱۱/۵۴	۸۶/۶۶±۱۱/۵۴
	۶	۲۰±۴۰	۴۶/۶۶±۳۰/۵۵
BOD (میلی گرم در لیتر)	۲	۱۳۰±۱۰	۷۳/۳۳±۵/۷۷
	۴	۱۲۵±۲۲/۹۱	۵۰±۱۰
	۶	۱۳۰±۳۰	۳۰±۱۰
کدورت (NTU)	۲	۶۶/۶۲±۱۰/۰۱	۷/۹۵±۰/۲۶
	۴	۸۵±۵/۸۸	۳/۰۵±۰/۳۴
	۶	۹۶±۷/۰۷	۲/۴۲±۰/۵۱
نیترات (میلی گرم در لیتر)*	۲	۱۹/۰۸±۱/۸۹	۹/۲۸±۱/۶۳
	۴	۱۹/۵۲±۲/۴۸	۶/۷۱±۰/۱۸
	۶	۱۹/۵۳±۱/۱	۵/۱۳±۰/۵۸
آمونیاک (میلی گرم در لیتر)	۲	۱۲/۷۶±۶/۳۸	۵/۸۶±۴/۰۲
	۴	۹/۶۴±۸/۰۹	۲±۰/۴۵۸
	۶	۱۲/۹۴±۷/۹۲	۲/۱۶±۱/۱۳
هدایت الکتریکی (میکرومهموس بر سانتیمتر)	۲	۱۵۱۳±۵۵/۰۷	۱۲۲۳/۳۳±۳۰/۵۵
	۴	۱۳۰۸/۳۳±۹۴/۶۴	۹۷۵±۷۶/۶۶
	۶	۱۳۱۰±۷۹/۳۷	۷۸۳/۳۳±۷۵/۷۱
pH	۲	۷/۸±۰/۱	۷/۴±۰/۲
	۴	۷/۹±۰/۱	۷/۵±۰/۱
	۶	۷/۹	۷/۵±۰/۱

ورودی ارائه شده در جدول شماره ۳ لازم به ذکر است که در این سیستم، ته نشینی اولیه وجود ندارد. البته فاضلاب، از حوضچه ذخیره فاضلاب ورودی از ایستگاه پمپاژ برداشت و از طریق مخزن ذخیره فاضلاب، جهت تزریق به سیستم منتقل می‌شد که این مخزن ذخیره می‌تواند کار یک حوضچه ته نشینی را انجام دهد و جامدات معلق قابل ته نشین را حذف نماید. به علاوه نتایج بررسی میدانی بر روی پیلوت نشان داد، متوسط رشد گیاه نی ۱/۱ سانتی متر در فروردین و اردیبهشت می‌باشد و گرم شدن هوا زمان مناسبی برای رشد نی می‌باشد. بیشترین درصد حذف در بین متغیرها مربوط به کدورت بوده و بیشترین درصد حذف متغیرها مربوط به زمان ماند ۶ روز به دست آمد.

نمودار شماره ۱ نشان می‌دهد میانگین کارایی حذف COD در زمان ماندهای ۲، ۴ و ۶ روز در حوضچه‌ها با یکدیگر متفاوت است و به لحاظ آماری نیز تفاوت معنی‌دار است ($p < 0.05$). اما تفاوت بین حوضچه ۱ نیزار با بستر گراول سایز ۲۰ میلی‌متر و حوضچه ۳ نیزار با بستر گراول سایز ۱۰ میلی‌متر به لحاظ آماری معنی‌دار نیست، اگرچه عملکرد کارایی حذف در نیزار با بستر گراول سایز ۱۰ میلی‌متر بهتر از بستر گراول سایز ۲۰ میلی‌متر می‌باشد و در زمان ماند ۴ روز این تفاوت بیشتر خود را نشان می‌دهد. مقایسه کارایی حذف COD بین حوضچه نیزار بدون گیاه نی (حوضچه ۲) و حوضچه‌های نیزار با بستر گراول سایز ۲۰ و ۱۰ میلی‌متر (حوضچه ۱ و ۳) نیز نشان می‌دهد عملکرد حوضچه‌های دارای گیاه نی از حوضچه شاهد (بدون گیاه) بالاتر است که نقش گیاه نی را در افزایش کارایی سیستم نشان می‌دهد همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد این اختلاف از حدود ۷ درصد در زمان ماند ۶ روز تا محدوده ۱۳ الی ۱۵ درصد در زمان ماندهای ۲ و ۴ روز متغیر می‌باشد و در زمان ماندهای کمتر نقش گیاه نی در افزایش کارایی بیش‌تر است.

نمودار شماره ۲ نشان می‌دهد میانگین کارایی حذف BOD در زمان ماندهای ۲، ۴ و ۶ روز در

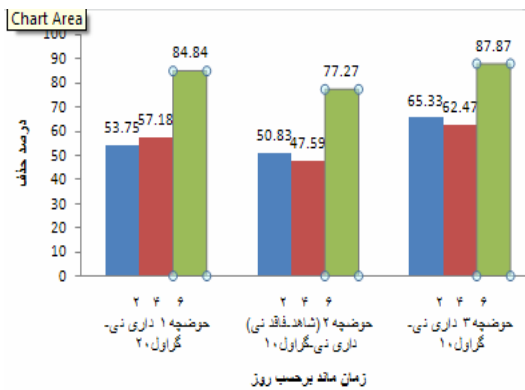
بهترین پاسخ سیستم برای فاضلاب ورودی با غلظت فسفر کل $20/48 \pm 3/67$ میلی‌گرم در لیتر در زمان ماند ۶ روز مربوط به حوضچه ۱ با غلظت $5/18 \pm 1/48$ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. به علاوه جداول شماره ۱ و ۲ نشان می‌دهد سیستم نیزاز مصنوعی جریان افقی برای فاضلاب‌های ضعیف و یا فاضلاب مجتمع با غلظت مواد آلی یا COD در محدوده ۲۰۰ تا ۱۳۰ میلی‌گرم در لیتر با زمان ماندهای ۴ و ۶ روز، در دستیابی به محدوده استاندارد تخلیه به آب‌های سطحی و زیرزمینی (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) موفق عمل کرده است. به عبارتی برای غلظت فاضلاب ورودی 200 ± 40 میلی‌گرم در لیتر، غلظت COD در پساب خروجی از حوضچه ۱ با گراول ۲۰ میلی‌متری به محدوده $46/66 \pm 30/55$ میلی‌گرم در لیتر و در خروجی حوضچه ۳ با گراول ۱۰ میلی‌متری به محدوده $38/33 \pm 20/20$ میلی‌گرم در لیتر رسیده است اما خروجی حوضچه شماره ۲ به عنوان شاهد (بدون گیاه)، محدوده غلظت $61/66 \pm 33/29$ میلی‌گرم در لیتر را نشان می‌دهد که اختلاف غلظت خروجی حوضچه‌های ۱ و ۳ نسبت به حوضچه ۲ (شاهد) به عنوان نقش گیاه نی در سیستم تلقی می‌شود.

در این سیستم، چون عملاً در فاضلاب نیترات خام وجود ندارد و عمدتاً ازت فاضلاب خام به صورت ازت آلی و آمونیاکی می‌باشد جهت واکنش سیستم در برابر حذف نیترات مداخله به عمل آمد و نیترات به صورت مصنوعی به حوضچه ورودی اضافه شد.

مقادیر کمی انحراف معیار و میانگین متغیرها در سیستم نیزاز مصنوعی جریان افقی، در جدول شماره ۳ نمایش داده شد. در این مرحله از تحقیق که حوضچه‌ها به صورت موازی و با جریان افقی مورد بررسی قرار گرفتند، به دلیل این که حوضچه‌های ۱ و ۴ از نظر ابعاد، سایز گراول، بارهیدرولیکی، بار آلی و تراکم نی مشابه هم بودند. نتایج نمونه‌های حوضچه ۴ منظور نشده است در جدول ۳ میانگین و انحراف معیار متغیرها در زمان ماندهای ۲ و ۴ و ۶ روز آمده است. در خصوص داده‌های

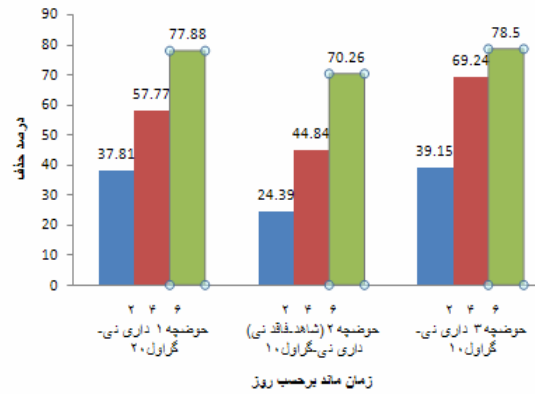
نشان داده شده که زمان ماند بیشتر، کارایی حذف را بالاتر برده است اما به لحاظ آماری معنی دار نیست، زیرا پارامترهای اساسی دیگری مثل بیوفیلم و مدیا یا گراول هم ایفای نقش می کنند که در همه سیستم وجود دارد و مانع نشان دادن نقش گیاه به صورت مجزا است. هرچند این تفاوت موجود بین زمان ماندها از لحاظ آماری غیر معنی دار باشد، گویای زمان ماند است و تا محدوده ای زمان ماند در همه سیستم های فاضلاب، ایفای نقش می کند و بعد از آن تأثیرش کم می شود.

نمودار شماره ۳ نشان می دهد میانگین کارایی حذف TKN در زمان ماندهای ۲، ۴ و ۶ روز در حوضچه ها، اگرچه با یکدیگر متفاوت است اما این تفاوت بین حوضچه ۱ نیزار با بستر گراول سایز ۲۰ میلی متر و حوضچه ۳ نیزار با بستر گراول سایز ۱۰ میلی متر در زمان ماندهای ۲ و ۴ روز بیش از زمان ماند ۶ روز خود را نشان می دهد. همچنین نمودار نشان می دهد زمان ماند ۶ روز، زمان ماند مناسب برای حذف TKN در سیستم نیزار زیر سطحی جریان افقی است.

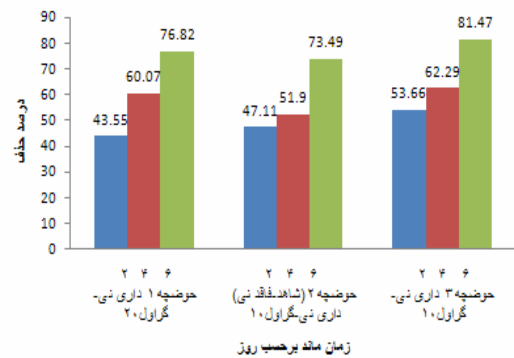


نمودار شماره ۳: کارایی حذف TKN توسط سیستم نیزار مصنوعی جریان افقی در ارتباط با زمان ماند و گراول

نمودار شماره ۴ نشان می دهد میانگین کارایی حذف فسفر کل در زمان ماندهای ۴ و ۶ روز در حوضچه ها، به هم نزدیک تر است و به لحاظ آماری تفاوت معنی دار نیست ($p > 0.05$)، اما تفاوت میانگین



نمودار شماره ۱: کارایی حذف COD توسط سیستم نیزار مصنوعی جریان افقی در ارتباط با زمان ماند و گراول



نمودار شماره ۲: کارایی حذف BOD توسط سیستم نیزار مصنوعی جریان افقی در ارتباط با زمان ماند و گراول

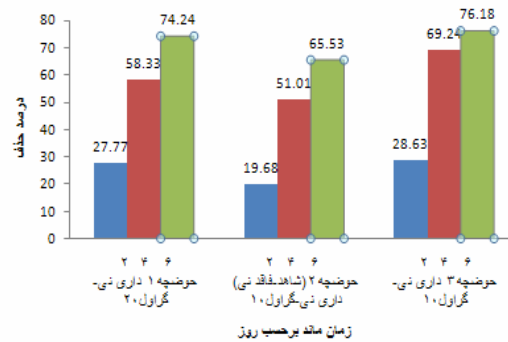
حوضچه ها، اگرچه با یکدیگر متفاوت است اما به لحاظ آماری تفاوت معنی دار نیست ($p > 0.05$). به علاوه تفاوت بین حوضچه ۱ نیزار با بستر گراول سایز ۲۰ میلی متر و حوضچه ۳ نیزار با بستر گراول سایز ۱۰ میلی متر به لحاظ آماری معنی دار نیست، اگرچه روند عملکرد کارایی حذف در نیزار با بستر گراول سایز ۱۰ میلی متر در غالب متغیرهای مورد بررسی بهتر از بستر گراول سایز ۲۰ میلی متر می باشد. عملکرد حوضچه های دارای گیاه نی از حوضچه شاهد (بدون گیاه) در ارتباط با حذف BOD به لحاظ آماری تفاوت معنی دار نیست ($p > 0.05$). در جدول نتایج و نیز نمودار شماره ۲ به خوبی نقش زمان ماند نشان داده شده است، همچنین

برای حذف کدورت در سیستم نیز از زیر سطحی جریان افقی است. غلظت اکسیژن در پساب و تلند به صورت پراکنده در چندین نوبت مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت. که در محدوده ۰/۵ تا ۱/۸ میلی گرم در لیتر بوده است، این نشان می دهد که سیستم اکسیژن رسانی توسط لوله های عمودی مشبک تعبیه شده، نقش خود را به خوبی ایفا نموده است.

بحث

آنچه که به عنوان دستاورد ارزشمند این تحقیق تلقی می شود در این موضوع نهفته است که گیاه نی فراگماتیس استرالیس بومی در شرایط اقلیمی مازندران قادر است ضمن حفظ شرایط هوایی با اکسیژن رسانی از طریق لوله های نی به ریزوم های حجیم این گیاه در ناحیه ریشه، سبب گسترش بیوفیلم و اکسیداسیون مواد آلی و تجزیه آلاینده های محیطی فاضلاب شود. با توجه به این که نوسانات کمی و بار هیدرولیکی و آلی که گاهی با توقف های کاری مختلف ناشی از خرابی سیستم تزریق و یا شرایط قطع برق و ... ایجاد می شود، برخلاف سیستم های متداول تصفیه لجن فعال و ... نتوانست کارایی سیستم را کاهش دهد. ثبات و پایداری سیستم در مشکلات بهره برداری و نگهداری تصفیه خانه فاضلاب، از مزایای ارزشمند این سیستم می باشد. نوآوری دیگر این تحقیق که به عنوان دستاورد جدید به این سیستم اضافه می شود این است که یکی از مشکلات این سیستم در نتایج تحقیقات دیگران (۹، ۱۳، ۱۵، ۱۶)، عدم قابلیت اکسیژن رسانی به ناحیه ریشه ای در شرایط سرد زمستانی است که گیاه نی خشکیده می شود و فعالیت ریزوم از پویایی ساقط می شود و کارایی تجزیه آلاینده ها کند می شود، اما در این تحقیق با تدابیر به کار گرفته شده از طریق تعبیه لوله ای پلی اتیلن مشبک به صورت عمودی در ستون گراول و بستر به فواصل منظم، قابلیت اکسیژن رسانی به ناحیه ریشه ای ترمیم و جبران شد و تحت شرایط زمستانی نیز میزان اکسیژن

کارایی با زمان ماند ۲ روز در حوضچه ها به لحاظ آماری تفاوت معنی دار است ($p < 0/05$). همچنین نمودار نشان می دهد زمان ماند ۶ روز، زمان ماند مناسب برای حذف فسفر کل در سیستم نیز از زیر سطحی جریان افقی است.



نمودار شماره ۴: کارایی حذف فسفر کل توسط سیستم نیز از مصنوعی جریان افقی در ارتباط با زمان ماند و گراول

نمودار شماره ۵ نشان می دهد میانگین کارایی حذف کدورت در زمان ماندهای ۴ و ۶ روز در حوضچه ها، به هم نزدیک تر است و به لحاظ آماری تفاوت معنی دار نیست ($p > 0/05$)، اما تفاوت میانگین کارایی با زمان ماند ۲ روز فقط در حوضچه ۱ نیز از با بستر گراول سایز ۲۰ میلی متر به لحاظ آماری با زمان ماندهای ۴ و ۶ روز معنی دار است ($p < 0/05$). همچنین نمودار نشان می دهد زمان ماند ۶ روز، زمان ماند مناسب



نمودار شماره ۵: کارایی حذف کدورت توسط سیستم نیز از مصنوعی جریان افقی در ارتباط با زمان ماند و گراول

موجود در ناحیه ریشه‌ای از ۱ میلی گرم در لیتر پایین تر نیامده است که یک موفقیت مهم این تحقیق تلقی می شود که در سایر تحقیقات به کار گرفته نشد. به علاوه نوآوری دیگر این تحقیق، کاربرد این سیستم در ۵ فاز مختلف بوده است که در تحقیقات دیگران، شیوه ترکیب سیستم به این صورت گسترده نبوده است و عمده تحقیقات انجام شده در دو حالت افقی-افقی یا افقی عمودی بوده است. لذا اطلاعات این تحقیق می تواند در طراحی سیستم برای مقیاس های کامل مورد استفاده قرار گیرد. نوآوری مهم دیگر این تحقیق، کاربرد این سیستم هیبریدی برای مجتمع دانشگاهی است، اگرچه ترکیب این فاضلاب به ترکیب فاضلاب خانگی یا شهری نزدیک می باشد، اما با توجه به حضور ترکیبات مصرفی در آزمایشگاه های مختلف پردیس دانشگاه (با بیش از ۴ دانشکده متفاوت و مراکز تحقیقاتی مختلف) و طیف گسترده ای از ترکیبات و مواد مصرفی در آزمایشگاه ها و بخش های تأسیساتی دستاورد کاهش آلاینده ها با گیاه نی فراگماتیس استرالیس بومی در شرایط اقلیمی مازندران همانند سایر تحقیقات مشابه کار شده بر روی فاضلاب های خانگی و شهری، نشان از موفقیت این سیستم طبیعی فاضلاب و پتانسیل بالای تحمل این سیستم در برابر آلاینده های مقاوم و نشان از دوام و پایداری سیستم می باشد. در واقع لایه میکروبی چسبیده به ریشه های نی (بیوفیلم)، شرایط مناسبی را برای اکسیداسیون بیولوژیکی فراهم می کند و همین امر باعث می شود تا مواد آلی، مواد جامد معلق و ترکیبات آلاینده فاضلاب، در سیستم های وتلند کاهش یابند. البته نقش گیاه نی نیز به واسطه جذب این مواد در فصول رشد و بقاء گیاه که شرایط مناسب برای گیاه نی فراهم است مهم می باشد. همچنین به دلیل این که لایه بیولوژیکی و بیوفیلم در وتلند با جریان زیر سطحی در داخل بستر و به دور از نوسانات دمایی و سطحی تشکیل می شود، از خطر یخ زدگی محفوظ مانده و سیستم های وتلند زیر سطحی در شرایط یخبندان نیز به کار می روند. با توجه به تجارب

قبل، سایز گراول در محدوده ۵ تا ۲۵ میلی متر سایز مناسب وتلند می باشد و تحقیقات قبلی نشان داد در این محدوده تفاوت معنی دار آماری مابین سایز گراول نیست. لذا با توجه به محدودیت زمانی و اثر غیر معنی دار، از هر دو سایز استفاده شد. تفاوت حضور نی و شاهد در حذف TKN در نمودار شماره ۳ نشان داده شد، اما تفاوت معنی دار آماری نیست چون عوامل اثر گزار علاوه بر گیاه، مدیا یا گراول و بیوفیلم در همه وجود دارد.

غلظت نیترات در پساب کمتر از ورودی است علت آن است که در این سیستم، نیتریفیکاسیون با دنیتریفیکاسیون توأم انجام می شود و نیترات تولیدی در اثر دنیتریفیکاسیون به ازت تبدیل و وارد هوا می شود که این طبیعی است و نشان از صحت کار تحقیق است. عمدتاً آلاینده های آزمایشگاهی محیط کشت های بیولوژیکی و یا مواد شیمیایی از نوع آلی اند که در BOD, COD, TSS, TP, NH3 و پارامترهای آنالیز شده خود را نشان می دهند. علاوه بر این با فاضلاب سایر بخش ها مخلوط و رقیق می شوند و اثر بازدارندگی شان کم می شود.

۱- تحقیقات قبلی (۲۶-۳۲) گزارش نمودند سیستم های وتلند نقش فعالی در کاهش COD, BOD و TSS از فاضلاب دارند و این موضوع در تحقیق حاضر و با گیاه نی فراگماتیس استرالیس بومی در شرایط اقلیمی مازندران نیز تأیید شد.

۲- تحقیق حاضر نیز همانند برخی تحقیقات دیگر (۲۳، ۲۴، ۲۳، ۳۴) نشان داد که سیستم های وتلند می توانند کارایی خوبی در حذف نیتروژن کج‌لدال، آمونیاک و فسفر کل از فاضلاب داشته باشد.

۳- تحقیق حاضر نیز همانند برخی تحقیقات دیگر (۳۱-۲۹) نشان داد که سیستم های ترکیبی کارایی بیشتری در حذف مواد آلی فاضلاب دارند.

نتایج این تحقیق در ارتباط با حذف COD, BOD و نیترات در زمان ماند هیدرولیکی مشابه براساس داده های تحقیق، بالاتر از نتایج تحقیق Caselles و همکاران او (۳۵) بوده است. بر حذف این که کار این

محقق از لحاظ زمانی در فصل بهار انجام شده بود و تحقیق حاضر در فصل پاییز انجام شد، اما کارآیی حذف بالاتر به دست آمد. دلیل این تفاوت می‌تواند به نوع گیاه مورد استفاده در وتلند باشد که نشان می‌دهد گیاه نی فراگماتیس استرالیس قابلیت جذب مواد آلی بیشتری نسبت به گونه مورد استفاده توسط Caselles و همکاران او (*Lycopersicum sculentum*) داشته باشد. حذف پایین‌تر نوترینت (نیتراژ و فسفات) در تحقیق مشابه Caselles و همکاران (۳۵) که دلیل آن، نیتریفیکاسیون ضعیف ناشی از شرایط انوکسیک در سیستم ذکر شده بود، در تحقیق حاضر به عنوان یک مشکل تلقی نشد و از حذف بالاتری برخوردار شد که علت آن نوع گیاه نی فراگماتیس استرالیس بومی مازندران بوده است که توانسته است اکسیژن بیش‌تری را به اعماق وتلند برساند، همچنین استفاده از لوله‌های هواده مشبک در تحقیق حاضر سبب افزایش درصد حذف نوترینت‌ها شد.

باتوجه به این که نیاز بود تا سیستم وتلند برای دوره تثبیت به تدریج تطابق یابد، تلاش شد تا در ابتدای کار بارآلی ورودی به سیستم در حد متوسط باشد. دلیل این امر نیز ناکافی بودن حجم بیوفیلیم تشکیلی روی سطح مواد داخل بستر بود که نقش اصلی در تصفیه فاضلاب را دارد. مسلم است که در ابتدای کار ریشه و ساقه‌های زیرزمینی گیاه در حال رشد و توسعه سریع بوده و نیاز به اکسیژن زیادی برای تنفس دارند که در رقابت با میکروارگانیسم‌ها اکسیژن بیشتری را مصرف می‌کنند. در مراحل بعدی به دلیل این که عمل فتوسنتز بهتر صورت گرفته در نتیجه اکسیژن کافی در اختیار میکروارگانیسم‌ها قرار می‌گیرد. با توجه به رشد سریع نی در فصل گرما، موادآلی و مواد جامد معلق بهتر حذف می‌شوند. استفاده از نیزار مصنوعی هیبریدی یکی از روش‌های مقرون به صرفه در شمال کشور و به خصوص مازندران می‌باشد که گیاه نی به وفور رشد می‌کند. افزایش درجه حرارت محیط و بالطبع افزایش درجه حرارت فاضلاب به همراه افزایش زمان ماند

هیدرولیکی، یکی از آیتم‌های مهم در کاهش موادآلی و معدنی فاضلاب می‌باشد. در سیستم تصفیه فاضلاب با استفاده از وتلند، در خصوص فاضلاب‌های ضعیف و متوسط که فاضلاب جوامع کوچک را شامل می‌شود، نیازی به طراحی سیستم بی‌هوای نمی‌باشد، ولی اگر در نظر گرفته شود می‌تواند در بالابردن کارآیی تصفیه فاضلاب موثر باشد. این سیستم می‌تواند نقش مهمی در حفاظت از منابع آب‌های ذخیره و با رعایت استانداردهای لازم به عنوان آبیاری در مزارع کشاورزی به کار برده شود. همچنین از این سیستم می‌توان به راحتی در آپارتمان‌ها، شهرک‌های مسکونی در تصفیه فاضلاب حمام و آشپزخانه و بازگشت پساب در آبیاری فضای سبز اقدام نمود. در جدول نتایج و نیز نمودار شماره ۲ به خوبی نقش زمان ماند نشان داده شده است و بیان‌کننده این است که زمان ماند بیشتر، کارآیی حذف را بالاتر برده است اما به لحاظ آماری معنی‌دار نیست، زیرا پارامترهای اساسی دیگری مثل بیوفیلیم و مدیا یا گراول هم ایفای نقش می‌کنند که در همه سیستم وجود دارد و مانع نشان دادن نقش گیاه به صورت مجزا می‌باشد. همین تفاوت موجود بین زمان ماندها هر چند از لحاظ آماری غیر معنی‌دار باشد، گویای زمان ماند است و در همه سیستم‌های فاضلاب تا محدوده ای زمان ماند ایفای نقش می‌کند و بعد از آن تأثیرش کم است.

در پایان می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این سیستم به عنوان یک سیستم کارآمد می‌تواند در کاهش آلاینده‌های متداول فاضلاب در حد استانداردهای تصفیه ثانویه فاضلاب‌ها و حذف ازت و فسفر، بیش از سیستم‌های متداول تصفیه ای در دفع پساب به آب‌های سطحی و زیرزمینی و آبیاری در مزارع کشاورزی موفق باشد. با توجه به نتایج خوب وتلند در تمام فازها با زمان ماند ۶ روزه به نظر می‌رسد در هر جایی که محدودیت زمین وجود نداشته باشد، خصوصاً برای اجتماعات کوچک شهری و روستایی، از مناسب‌ترین و کارآمدترین سیستم تصفیه طبیعی به لحاظ اقتصادی است که می‌تواند

مکملی بر این تحقیق باشد.

سپاسگزاری

از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه بخاطر تامین بودجه و حمایت از طرح تحقیقاتی و از دانشکده بهداشت و کارشناسان گروه مهندسی بهداشت محیط و پرسنل مجتمع پردیس دانشگاه بخاطر فراهم نمودن شرایط و امکانات و فضای فیزیکی پایلوت و ... تشکر و قدردانی می شود. این مقاله از پایان نامه کارشناسی ارشد بهداشت محیط آقای سید مجتبی حسینی و طرح تحقیقاتی مصوب به شماره ۹۱-۹۰ استخراج گردید.

پیشنهاد و طراحی شود. اطلاعات به دست آمده از این تحقیق می تواند به عنوان معیارهای طراحی سیستم مورد استفاده مشاورین قرار گیرد. به علاوه این سیستم می تواند به عنوان بهترین سیستم پالایش پساب های خروجی سایر تصفیه خانه ها قبل از ورود به محیط زیست و به عنوان بهترین سیستم مناسب و ارزان برای تصفیه آب های سطحی و روان آب ها قبل از الحاق به رودخانه پیشنهاد شود.

به سایر محققان پیشنهاد می شود تا فعالیت تحقیق بر روی این سیستم هیبریدی، برگشت پساب و اثر آن بر کارایی سیستم برای فاضلاب های ضعیف با ترکیب مشابه فاضلاب مجتمع دانشگاهی صورت گیرد تا

References

1. Rivas A, Barceló QI, Moeller GE. Pollutant removal in a hybrid system integrated by constructed wetlands and maturation ponds, in a temperate climate. proceeding of 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. 2010 October, 4-8. Venice, Italy.
2. Azimi A, Mehrdadi N, Rahmani A. Combined System of Optimization Pond and Constructed Wetland for Wastewater Treatment. International Journal of Applied Environmental Sciences 2008; 3(2): 125-138.
3. Stott R, May E, Mara DD. Parasite removal by natural wastewater treatment systems: performance of waste stabilisation ponds and constructed wetlands. Water Sci Technol 2003; 48(2): 97-104.
4. Tanner CC, Sukias JP. Linking pond and wetland treatment: performance of domestic and farm systems in New Zealand. Water Sci Technol 2003; 48(2): 331-339.
5. Ham JH, Yoon CG, Jeon JH, Kim HC. Feasibility of a constructed wetland and wastewater stabilisation pond system as a sewage reclamation system for agricultural reuse in a decentralised rural area. Water Sci Technol 2007; 55(1-2): 503-511.
6. Yeh TY, Wu CH. Pollutant removal within hybrid constructed wetland systems in tropical regions. Water Science and Technology 2009; 59(2): 233-240.
7. Wood A. Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding. Water Sci Technol 1995; 32(3): 21-29.
8. Sharma PK, Inoue T, Kato K, Ietsugu H, Tomita K, Nagasawa T. Potential of hybrid constructed wetland system in treating milking parlor wastewater under cold climatic conditions in northern Hokkaido, Japan. 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control in proceeding of 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. 2010. October, 4-8. Venice, Italy.
9. Vymazal J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. Ecol Eng 2005; 25(5):

- 478-490.
10. Werker AG, Dougherty JM, McHenry JL, Van Loon WA. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates. *Ecol Eng* 2002; 19(1): 1-11.
 11. Cooper P. A Review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. *Water Sci Technol* 1999; 40(3): 1-9.
 12. Cooper P, Green B. Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom- The first 10 years experience. *Water Sci Technol* 1995; 32(3): 317-327.
 13. Molle P, Prost-Boucle S, Lienard A. Potential for total nitrogen removal by combining vertical flow and horizontal flow constructed wetlands: A full-scale experiment study. *Ecol Eng* 2008; 34(1): 23-29.
 14. Cooper P. The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. *Water Sci Technol* 2005; 51(9): 81-90.
 15. Yousefi Z, Mesdaghinia A, Mohseni A, Gheiaseddin M. Efficiency of constructed subsurface wetland for domestical wastewater treatment. Thesis of Ph.D. health sciences college, Tehran University of medical sciences. 2001 (Persian).
 16. Molle P, Lienard A, Boutin C, Merlin G, Iwema A. How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. *Water Sci Technol* 2005; 51(9): 11-21.
 17. Bavor HJ, Roser DJ, Adcock PW. Challenges for the development of advanced constructed wetlands technology. *Water Sci Technol* 1995; 32(3): 13-20.
 18. Ghaderi A. Evaluation on plants role in natural treatment of municipal polluted water in Tehran. *Geography and Development Iranian Journal* 2004; 1: 107-120.
 19. Fenxia Ye, Ying Li. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. *Ecological Engineering* 2009; 35: 1043-1050.
 20. Herrera Meliána JA, Martín Rodríguez AJ, Arana J, González Díaz O, González Henríquez JJ. Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in the Canary Islands. *Ecological Engineering* 2010; 36: 891-899.
 21. Rivas Hernandez A, Mantilla Morales G, Pozo Roman F, Sánchez Castañeda LF, Sotelo Romero ND. Manejo sustentable y diseño hidráulico ybiológico de humedales para control de la contaminación. Part 1: Para Descargas Municipales, Sustainable management and biological and hydraulic design of wetlands for pollution control. Part 11: Municipal discharges. Final report. Mexican Institute of Water Technology, 2004. p. 1-4. Available form: <http://www.cep is.org.pe/bvsAIDIS/PuertoRico29/patzcua.pdf>. Accessed July 1, 2013.
 22. Kadlec RH, Knigth RL. *Treatment wetlands*. Boca Raton: Lewis Publishers; 1996.
 23. Yousefi Z, Mohseni-Bandpei A. Nitrogen and phosphorus removal from wastewater by subsurface wetlands planted with *Iris pseudacorus*. *Ecol Eng* 2010; 36(6): 777-782.
 24. Yousefi Z, Mesdaghinia A, Giaseddin M, Naseri S, Shokri M, Mohseni-Bandpi A, et al. Role of *Iris Pseudacorus* plant in removal of bacteria in subsurface constructed wetland. 6th International Conference on Modeling, Measuring & prediction of water pollution. 2001. Sep, 17-19. Rhodes, Greece.
 25. APHA (American Public Health Association),

- AWWA (American Water Works Association), WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. Washington, DC: 1992.
26. EPA/625/R-99/010. Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. US. Available at: <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL> (September 1999).
 27. Kivaisi AK. The potential for constructed wetlands for wastewater Treatment and reuse indeveloping countries: a review. *Ecol Eng* 2001; 16(4): 545-560.
 28. Verhoeven JTA, Meuleman AFM. Wetlands for wastewater treatment: Opportunities And limitations. *Ecol Eng* 1999; 12(1-2): 5-12.
 29. Ahmad A, Van Bruggen JJA. Purification efficiency and economics of hybrid constructed wetlands, floating wetlands and stabilization pond systems in a parallel treatment of domestic wastewater in Spain. 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. 2010. Oct. 4-8. Venice, Italy.
 30. Yeh TY, Wu CH. Pollutant removal within hybrid constructed wetland systems in tropical regions. *Water Sci Technol* 2009; 59(2): 233-240.
 31. Kato K, Moriaka R, Hosokawa H, Osada H, Kanazawa K, Nozoe T. Preliminary studies on hybrid wetland systems for purification of milking parlor wastewater in northern part of Japan. International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control (WETPOL), 2005. Ghent, Belgium.
 32. Kinsley C, Kennedy K, Crolla A. Reed bed treatment of septage at high solids loading rate in a cold climate. 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. 2010. Oct, 4-8. Venice, Italy.
 33. Almeida A, Novais JM, Martins-Dias S. Nitrate removal from synthetic wastewater in a VFCW planted with *Vetiveria zizanioides*, 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. 2010. Oct, 4-8. Venice, Italy.
 34. Barbagallo S, Cirelli GL, Marzo M, Milani M, Toscano A. Hydraulics and removal in two HSSF constructed wetlands for wastewater reuse with different operational life. 12th IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. 2010. Oct, 4-8. Venice, Italy.
 35. Caselles-Osorio A, Eslava P, Romero I, Mendoza G, Simanca M. Tropical subsurface-flow constructed wetlands for treatment of sanitary wastewater. 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. 2010. Oct, 4-8, Enento, Italy.