بررسی عملکرد تالاب مصنوعی ترکیبی با بستر پامیس و گیاه وتیور در تصفیه پساب شهری

جهانگیر عابدی کوپایی*، وحید عرب نصرآبادی و امیر شیخان[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۲۰)

چکیده

یکی از راه‌های کاهش بار آلودگی پساب استفاده از تالاب مصنوعی است. در این پژوهش عملکرد تالاب مصنوعی ترکیبی با بستر سنگ معدنی پامیس و گیاه وتیور بر روی پساب شهری مورد بررسی قرار گرفته است. تالاب ترکیبی با مشخصات مذکور در حاشیه تصفیه‌خانه پساب دانشگاه صنعتی اصفهان احداث شد. به‌منظور بررسی عملکرد تالاب مصنوعی، اثر زمان‌های ماند سه و شش روز بر راندمان حذف با استفاده از طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. در زمان ماند سه روز به‌طور متوسط در تالاب با جریان عمودی، جریان افقی و تالاب ترکیبی، کلی‌فرم گوارشی به‌ترتیب ۴۷/۰، ۹۸/۳ و ۹۹/۱ درصد، BOD_5 به‌ترتیب ۷/۶، ۲۰/۹ و ۲۶/۹ درصد و COD به‌ترتیب ۴/۶، ۴۰/۰ و ۴۲/۷ درصد کاهش یافت. همچنین، در زمان ماند شش روز به‌طور متوسط در تالاب با جریان عمودی، جریان افقی و تالاب ترکیبی، کلی‌فرم گوارشی به‌ترتیب ۶۱/۶، ۹۹/۳ و ۹۹/۸ درصد، BOD_5 به‌ترتیب ۱۰/۷، ۲۹/۹ و ۳۷/۴ درصد و COD به‌ترتیب ۱۶/۰، ۸۶/۸ و ۸۸/۹ درصد کاهش یافت. ترکیب پامیس به‌عنوان ماده‌ای متخلخل با قابلیت جذب عناصر و همچنین گیاه وتیور به‌عنوان یک گیاه توانا در گیاه‌پالایی عملکرد بسیار مناسبی را در زمان ماند کم نمایش داد.

واژه‌های کلیدی: تالاب مصنوعی ترکیبی، وتیور، پامیس، پساب شهری

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Koupai@cc.iut.ac.ir

مقدمه

تا چند دهه قبل، پساب تولید شده توسط جوامع شهری، صنعت و کشاورزی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مخاطرات طبیعت شناخته می‌شد. اما امروزه، از طرفی افزایش چشمگیر جمعیت و نیاز به تولید بیشتر محصولات کشاورزی و به تبع آن مصرف روز افزون منابع آب سالم موجب شد تا به پساب به‌عنوان منبع جدید تأمین آب که از منابع آب نامتعارف تلقی می‌شود، نگریسته شود (۹).

پساب شهری به لحاظ کیفیت بسیار گسترده و متغیر است. برخی مواقع این نوع پساب، آلوده به پساب صنعتی و مقدار زیادی فلزات سنگین است (۱). استفاده بدون آگاهی از کیفیت این پساب‌ها به‌منظور آبیاری می‌تواند اثرات نامطلوبی بر سلامت مردم بگذارد. بنابراین، تصفیه اصولی پساب به‌منظور استفاده مجدد امری ضروری است.

سیستم‌های صنعتی تصفیه پساب، به تصفیه پساب در محیطی با مساحت کم می‌پردازند اما علاوه بر هزینه ساخت زیاد، نیاز به نگه‌داری‌های تخصصی نیز دارند. یکی از روش‌های طبیعی تصفیه پساب، تالاب مصنوعی است. تالاب‌های مصنوعی سیستم‌های مهندسی هستند که به‌عنوان یک روش مناسب و جایگزین برای تکنولوژی‌های متداول تصفیه فاضلاب طراحی شده اند که سازگاری بیشتری با محیط زیست نیز داشته و در اصل رفتارهای تالاب‌های طبیعی را تقلید می‌نمایند (۷ و ۲۳).

تالاب‌ها راه حلی کاربردی برای افزایش کیفیت پساب‌های آلوده به‌منظور بازگشت مجدد به طبیعت و یا استفاده به‌منظور آبیاری هستند (۲). در واقع ثابت شده است که تالاب‌ها قادر به بهبود آلودگی‌های شیمیایی (مواد ارگانیک، فلزات و متالوئیدها) و ارگانیسم‌های بیولوژیکی (باکتری‌ها، ویروس‌ها و انگل‌ها) از رواناب‌ها و پساب‌های شهری هستند (۳ و ۴).

تالاب‌های مصنوعی به دو گروه تالاب با جریان سطحی و تالاب با جریان زیر سطحی تقسیم می‌شوند. تالاب‌های با جریان زیرسطحی نیز از لحاظ نحوه حرکت جریان به دو گروه جریان افقی و جریان عمودی تقسیم می‌شوند (۱۱).

تالاب مصنوعی با جریان افقی، سیستمی بیولوژیک به‌منظور تصفیه پساب است که در مقایسه با سیستم‌های تصفیه پساب مرسوم، به سهولت ساخته شده و نگه‌داری می‌شود (۱۵). معمولاً تالاب‌های مصنوعی با جریان عمودی در ترکیب با تالاب با جریان افقی استفاده می‌شوند (۱۷). ویژگی بارز این تالاب‌ها وجود شرایط هوازی در فرایند تصفیه است (۲۷).

در سال‌های گذشته یکی از گیاهانی که برای کشت در تالاب‌های مصنوعی مورد توجه قرار گرفت، گیاه وتیور است. از سال ۱۹۸۰ که گیاه علفی وتیور توسط بانک جهانی به‌منظور حفاظت آب و خاک معرفی شد، این گیاه بیش از سه دهه در حداقل ۵۰ کشور مورد استفاده قرار گرفته است. اما طی این ۵۰ سال هیچ گونه گزارشی درباره تبدیل شدن این گیاه به علف هرز و گیاه مهاجم منتشر نشده است. وتیور، گیاهی حاره‌ای، علفی، چندساله، از خانواده گرامینه با سازگاری بوم‌شناختی و تولید ماده خشک زیاد است که قابلیت سازگاری با شرایط مختلف محیطی را دارد (۲۱). سیستم ریشه‌ای گیاه وتیور سبب می‌شود تا گیاه در برابر خشکسالی مقاوم باشد. وتیور در برابر آفات، بیماری‌ها و آتش‌سوزی نیز مقاوم است. ساقه‌های گیاه وتیور به‌صورت راست و برافراشته رشد کرده و در صورت وجود شرایط مساعد، می‌تواند تا ارتفاع ۳ متر برسد و قطر پایه آن نیز حدود ۳۰ سانتی‌متر می‌شود (۲۱). وتیور طیف وسیعی از pH خاک را بدون نیاز به اصلاح می‌تواند تحمل کند که این دامنه از pH بین ۳/۳ تا ۱۲/۵ است (۱۹).

بستر تالاب یکی از مهم‌ترین اجزای تالاب مصنوعی است. تخلخل زیاد و در دسترس‌بودن از مهم‌ترین ویژگی‌های بستر هستند. پامیس سنگی آتشفشانی است که به فراوانی و با قیمت مناسب در ایران یافت می‌شود. پامیس، فوم، فوم آتشفشانی یا پاماسیت در واقع شیشه‌های سیلیسی و اغلب با رنگ روشن هستند، گرچه انواع تیره رنگ آنها هم وجود دارد. به‌طور معمول این مواد در اثر انباشته شدن روانه‌های آتشفشانی ساخته می‌شوند که با انفجار از دهانه آتشفشان‌ها به بیرون پرتاب

می‌شوند. نام‌گذاری آنها بیشتر بر پایه اندازه دانه‌ها انجام می‌شود. بدین‌ترتیب، توده‌های ساخته شده از دانه‌های بزرگتر از ۲ یا ۳ میلی‌متر را پامیس و توده‌های پدید آمده از دانه‌های ریزتر را پاماسیت نامیده‌اند (۵ و ۱۰). مزیت‌های اصلی سنگ پامیس نسبت به سایر تعویض‌کننده‌های یونی در قدرت مکانیکی آن، پایداری در برابر محلول‌های آلی و حملات میکروبی، سهولت انتقال به‌دلیل سبک‌بودن آن و قابلیت احیای مجدد آن است (۱۸ و ۲۰). سنگ پامیس در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و pH=۸ دارای ظرفیت جذب ۰/۰۵۵ میلی‌گرم بر گرم است (۲۸).

هدف از این پژوهش بررسی عملکرد تالاب مصنوعی ترکیبی با بستر پامیس و گیاه وتیور در تصفیه تکمیلی پساب شهری است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تصفیه تکمیلی پساب شهری، تالاب زیرسطحی ترکیبی در محل تصفیه‌خانه پساب دانشگاه صنعتی اصفهان، در غرب شهر اصفهان با مختصات جغرافیایی طولی ۵۴۹۶۹۹ و عرضی ۳۶۱۸۸۹۳ احداث شد. حوضچه‌های افقی تالاب به طول ۶ متر، عرض ۰/۷۵ متر و عمق ۰/۵ متر و حوضچه‌های عمودی تالاب با ۱/۲ متر ارتفاع و قطر ۰/۷ متر (به‌صورت بشکه) احداث شدند. احداث تالاب و داده‌برداری از مهرماه ۱۳۹۵ تا آذرماه ۱۳۹۶ به طول انجامید. در شکل ۱ نمایی از سلول‌های تالاب نمایش داده شده است.

فاضلاب خام پس از عبور از آشغال‌گیر در ابتدای تصفیه‌خانه فاضلاب دانشگاه صنعتی اصفهان، وارد لاگون اول تصفیه پساب شده و توسط سه عدد پمپ هواده سطحی، هوادهی می‌شود. سپس، پساب هوادهی شده وارد لاگون دوم با زمان ماند تقریبی ۲۰ روز می‌شود. جریان ورودی به تالاب از لاگون دوم سیستم تصفیه پساب دانشگاه صنعتی اصفهان تأمین شد.

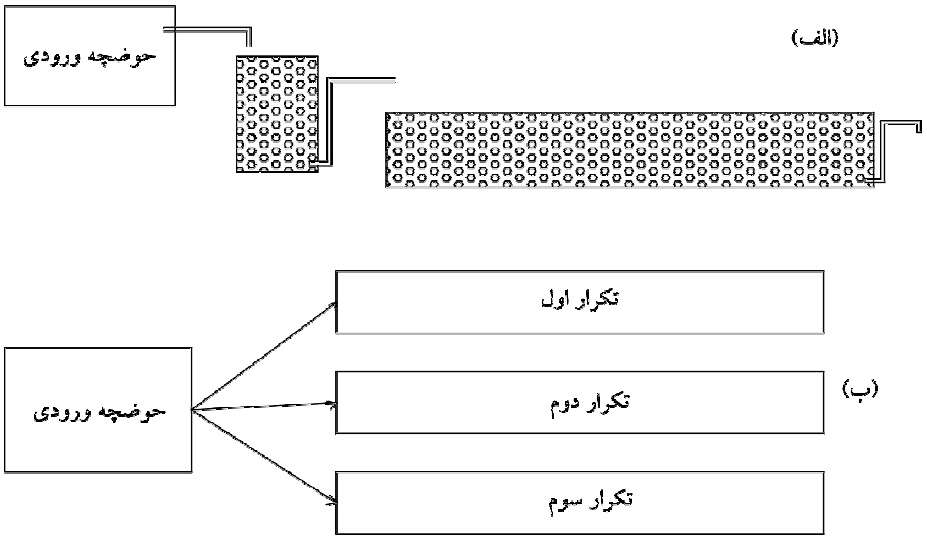
ابتدا حوضچه‌های تالاب توسط بیل مکانیکی حفاری شد و پس از آجر چینی دیواره حوضچه‌ها، بستر تالاب با شیب حدود یک درصد تسطیح شد. سپس حوضچه‌ها توسط پلاستیک پلی‌اتیلن دو لایه عایق شده و درنهایت بستر به درون حوضچه‌های تالاب منتقل شد. به‌منظور ساخت تالاب با جریان عمودی از بشکه‌های ۱۸۰ لیتری پلی اتیلنی استفاده شد.

در این پژوهش از سنگ معدنی پامیس به‌عنوان بستر تالاب و گیاه وتیور استفاده شد. پامیس استفاده شده در این پژوهش متعلق به معادن پامیس شهر قروه استان کردستان بوده که دارای تخلخل ۶۰ درصد است. اندازه دانه‌های پامیس مورد استفاده بین ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر است. با توجه به فراوانی و قیمت مناسب این ماده معدنی در ایران، تخلخل و سطح ویژه قابل توجه و همچنین قابلیت جذب عناصر، استفاده از این بستر در بهینه سازی تالاب بسیار مؤثر است.

پس از آماده‌سازی سلول‌های تالاب، بوته‌های گیاه وتیور از شهر اهواز به مکان پروژه منتقل شدند. گونه غالب گیاه وتیور به‌منظور استفاده در تالاب مصنوعی، گونه زیزانیویدیس (Zizanioides) است. این گونه که توسط بانک جهانی پیشنهاد شده است، غیر مهاجم بوده و در امور حفاظت خاک استفاده می‌شود. در این پروژه نیز از همین گونه استفاده شد. این گیاه از تیره گندمیان است، فاقد استولون یا ریزوم بوده، دارای تقسیم ریشه‌ای حجیم با ساختارهای ظریف است که می‌تواند به سرعت رشد کرده و گاهی عمق ریشه به ۳ تا ۴ متر می‌رسد (۱۹).

گیاهان با تراکم پنج بوته در متر مربع درون تالاب کشت شدند. به‌منظور کشت گیاهان درون تالاب، ابتدا ریشه گیاهان از گلدان‌ها خارج و سپس توسط آب شستشو شد. سپس با استفاده از توری پلاستیکی ریشه‌ها پوشش داده شد و گیاهان به تالاب منتقل شدند.

به‌منظور انتقال جریان از لاگون دوم تصفیه پساب دانشگاه صنعتی اصفهان به تالاب، جریان پساب توسط پمپ کفکش به



شکل ۱. الف) سطح مقطع تالاب ساخته شده در دانشگاه صنعتی اصفهان و ب) پلان تالاب

سیستم آبیاری قطره‌ای منتقل شد. در این سیستم به‌منظور تنظیم دبی ورودی به تالاب عمودی از قطره چکان‌های درون خط دارای قابلیت خودشویندگی استفاده شد. در تالاب‌های مصنوعی ترکیبی به‌صورت معمول ابتدا تالاب با جریان عمودی و سپس جریان افقی قرار می‌گیرد (۱۶). جریان ابتدا ۱/۲ متر در تالاب با جریان عمودی حرکت کرده و سپس با استفاده از یک سیفون، جریان پس از عبور از تالاب عمودی به تالاب با جریان افقی متصل شد. در ادامه، جریان پساب طول شش متری تالاب افقی را طی کرده و در نهایت با استفاده از سیفون U شکل، جریان به خارج از تالاب منتقل شد. نسبت طول به عرض تالاب با جریان افقی به گونه‌ای انتخاب شده است که پساب به‌صورت یکنواخت در تالاب افقی جریان یابد و حجم مرده به حداقل برسد.

داده‌ها با دو زمان ماند اسمی سه و شش روز و با سه تکرار برداشت شدند. به‌منظور دستیابی به زمان ماند واقعی با توجه به دبی ورودی و خروجی، پس از متعادل شدن جریان خروجی تالاب افقی، دبی جریان خروجی اندازه‌گیری شد که زمان‌های ماند واقعی ۲/۳ و ۶/۷ روز به‌دست آمد.

نمونه‌های پساب پس از برداشته شدن با رعایت اصول حمل نمونه، جهت انجام آزمایش‌های کیفی به آزمایشگاه منتقل شدند. در این پژوهش پارامترهای کلی‌فرم گوارشی، BOD_5 و COD اندازه‌گیری شد. آزمایش کلی‌فرم توسط آزمایشگاه محیط زیست دانشکده بهداشت و محیط زیست دانشگاه علوم پزشکی اصفهان (معتمد محیط زیست) با استفاده از روش ۵ لوله‌ای صورت پذیرفت. سایر آزمایش‌ها در آزمایشگاه آب گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. پارامتر COD توسط دستگاه اسپکتروفتومتر هچ لانگ مدل DR6000 و راکتور COD هچ مدل DRB200 تعیین شدند.

به‌منظور تحلیل نتایج از نرم افزار تحلیل آماری SPSS 19 و طرح آزمایشی کاملاً تصادفی استفاده شد.

نتایج و بحث

کاهش کلی‌فرم گوارشی

کلی‌فرم گوارشی نمایانگر وجود پاتوژن‌ها (عوامل بیماری‌زا) از جمله ویروس‌ها است. از این نظر اندازه‌گیری این پارامتر بسیار حائز اهمیت است.

در زمان ماند سه روز، میانگین راندمان حذف کلی‌فرم گوارشی توسط تالاب با جریان عمودی ۴۷/۰ درصد و انحراف معیار آن ۱۲ شد. در زمان ماند مشابه، راندمان حذف کلی‌فرم گوارشی توسط تالاب با جریان افقی ۹۸/۳ درصد با انحراف

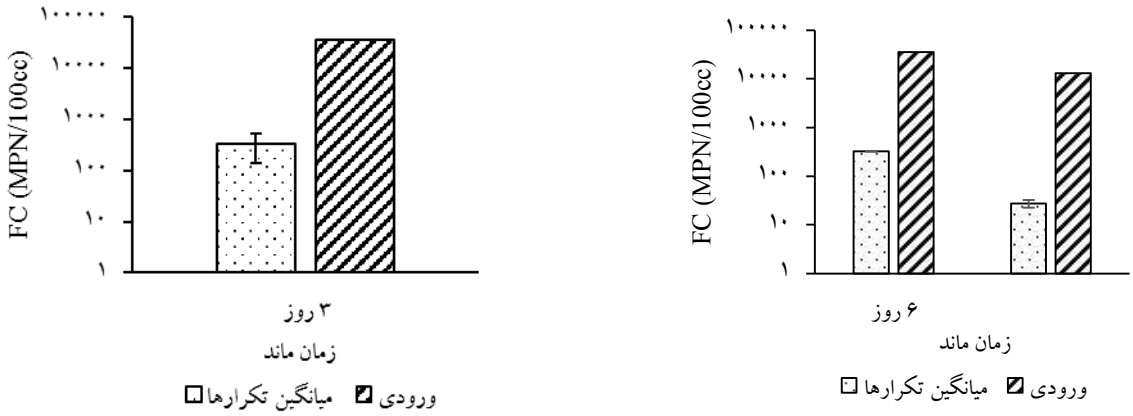
معیار ۱/۰۴ و راندمان حذف کلی‌فرم گوارشی در تالاب ترکیبی ۹۹/۱ درصد با انحراف معیار ۰/۵۵ شد. بر اساس نتایج بدست آمده، تالاب مصنوعی با جریان افقی در حذف کلی‌فرم مؤثرتر از تالاب با جریان عمودی عمل کرده است. مقدار کلی‌فرم گوارشی خروجی از تالاب ترکیبی با زمان ماند اسمی سه روز به‌طور متوسط ۳۲۳ عدد در ۱۰۰ میلی‌لیتر شد.

در زمان ماند شش روز، میانگین راندمان حذف کلی‌فرم گوارشی توسط تالاب با جریان عمودی ۶۱/۶ درصد و انحراف معیار آن ۲۲/۸ شد. همچنین در زمان ماند مشابه، راندمان حذف کلی‌فرم گوارشی توسط تالاب با جریان افقی ۹۹/۳ درصد با انحراف معیار ۰/۰۴ و راندمان حذف کلی‌فرم گوارشی در تالاب ترکیبی ۹۹/۸ درصد با انحراف معیار ۰/۰۳ شد. نتایج در مقایسه با زمان ماند سه روز، افزایش راندمان حذف را نمایش می‌دهد. در این زمان ماند، خروجی کلی‌فرم گوارشی از تالاب ترکیبی با زمان ماند اسمی شش روز به‌طور متوسط حدود ۲۸ عدد در ۱۰۰ میلی‌لیتر شد. در مجموع می‌توان بیان کرد مقدار کلی‌فرم گوارشی پساب خروجی از تالاب ترکیبی در زمان‌های ماند سه و شش روز، کمتر از مقدار استاندارد سازمان حفاظت از محیط زیست ایران (۴۰۰ عدد کلی‌فرم گوارشی در ۱۰۰ میلی‌لیتر پساب تصفیه شده) بوده و قابل استفاده در آبیاری محصولات کشاورزی است.

به‌منظور مقایسه اثر نوع جریان در تالاب مصنوعی بر راندمان حذف کلی‌فرم گوارشی، تجزیه واریانس صورت پذیرفت. بدین منظور در هر زمان ماند، تالاب با جریان افقی و جریان عمودی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج در زمان ماند سه روز تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد ($P<0.01$) بین راندمان حذف کلی‌فرم گوارشی تالاب با جریان عمودی و افقی را نمایش می‌دهد. در زمان ماند شش روز تفاوت معنی‌دار در سطح پنج ($P<0.05$) درصد بین تالاب با جریان عمودی و افقی وجود داشت.

اثر زمان ماند بر راندمان حذف تالاب با جریان عمودی، جریان افقی و تالاب ترکیبی نیز بررسی شد. بدین منظور راندمان حذف تالاب‌های با جریان افقی، جریان عمودی و ترکیبی به‌صورت مجزا در زمان‌های ماند اسمی سه و شش روز مقایسه شدند. نتایج حاصل از زمان ماند سه روز و شش روز تفاوت معنی‌داری را در بین تالاب‌های با جریان عمودی، جریان افقی و همچنین تالاب‌های ترکیبی نمایش نمی‌دهد. به عبارت دیگر زمان ماند اثر معنی‌داری بر راندمان حذف کلی‌فرم گوارشی نداشته است. اما بایستی توجه شود به‌طور متوسط تعداد کلی‌فرم گوارشی خروجی از تالاب ترکیبی در زمان ماند سه روز ۳۲۳ عدد در ۱۰۰ میلی‌لیتر بوده، درحالی که در زمان ماند شش روز ۲۸ عدد در ۱۰۰ میلی‌لیتر است (شکل ۲). مقادیر کلی‌فرم گوارشی ورودی و خروجی تالاب مصنوعی در جدول ۱ ذکر شده است.

زمان ماند به عوامل حذف کلی‌فرم این فرصت را می‌دهد تا به خوبی در فرایند حذف شرکت نمایند. فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به تنهایی و یا در تعامل با یکدیگر در حذف کلی‌فرم شرکت می‌نمایند (۲۶). فرایندهای فیزیکی شامل به دام انداختن میکروارگانیسم‌ها در ریزوسفر، چسبیدن به مواد بستر و رسوب می‌شود. درحالی که فرایندهای شیمیایی شامل اکسیداسیون، تابش اشعه فرابنفش، قرار گرفتن در معرض بیواسیدهای دفع شده از برخی گیاهان و جذب مواد آلی شدن می‌شود (۲۲ و ۲۴). رقابت برای جذب منابع و فعالیت‌های آنتی‌میکروبی عصاره ریشه، فرایندهای بیولوژیکی را شامل می‌شود (۱ و ۴). باید توجه کرد در تالاب ترکیبی مورد مطالعه اثر تالاب با جریان افقی در کاهش کلی‌فرم گوارشی قابل توجه است. درتالاب با جریان افقی، پساب طول بیشتری را در بستر طی کرده و زمان ماند بیشتری نسبت به تالاب با جریان عمودی دارد. اما بایستی توجه کرد کلی‌فرم‌های گوارشی در شرایط هوازی و بی‌هوازی زنده می‌مانند. در تالاب با جریان عمودی بیشتر شرایط هوازی حاکم است، اما در تالاب با جریان افقی، به جز در سطح پساب که در تماس با اتمسفر است و ناحیه محدودی در اطراف ریشه گیاهان، شرایط بی‌هوازی حاکم است (۱۲). در مجموع وجود فرایندهای هوازی و بی‌هوازی



شکل ۲. مقادیر کلی‌فرم گوارشی ورودی و خروجی در تالاب‌های ترکیبی در زمان ماند اسمی سه و شش روز (محور عمودی لگاریتمی است)

جدول ۱. مقادیر ورودی و خروجی COD، BOD5 و کلی‌فرم گوارشی به تالاب ترکیبی

شاخص	واحد	زمان ماند	ورودی به تالاب	خروجی از تالاب
COD	mg/L	سه روز	۵۷	۳۲/۷
BOD_5	mg/L	سه روز	۱۲/۲	۸/۸۹
کلی‌فرم گوارشی	MPN/100cc	سه روز	۳۵۰۰۰	۳۲۳/۳
COD	mg/L	شش روز	۴۸	۵/۳۳
BOD_5	mg/L	شش روز	۸/۲۰	۵/۱۳
کلی‌فرم گوارشی	MPN/100cc	شش روز	۱۳۰۰۰	۲۷/۷

به‌صورت همزمان، موجب عملکرد مناسب تالاب ترکیبی در کاهش بار میکروبی شده است.

درنهایت می‌توان بیان کرد، تالاب مصنوعی با بستر پامیس و گیاه وتیور، به علت تخلخل زیاد (۶۰ درصد)، جاذب بودن و همچنین شبکه گسترده و در هم تنیده ریزوم‌های ریشه گیاه وتیور، شرایط ایده‌آلی برای فرایندهای تصفیه فیزیکی و بیولوژیکی فراهم کرده است و به تبع آن بار آلودگی‌های میکروبی کاهش یافته است.

کاهش BOD_5

اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی یا BOD_5، نرخ مصرف اکسیژن در داخل آب توسط ارگانیسم‌ها است. اگر BOD_5 کم باشد آب پاک و فاقد ارگانیسم است یا آنکه ارگانیسم های داخل آب مرده و نیازی به مصرف اکسیژن ندارند.

در زمان ماند سه روز، میانگین راندمان حذف BOD_5 توسط تالاب با جریان عمودی ۷/۶ درصد و انحراف معیار آن ۰/۳۶ شد. در زمان ماند مشابه، میانگین راندمان حذف BOD_5 توسط تالاب با جریان افقی ۲۰/۹ درصد با انحراف معیار ۴/۰۴ و تالاب ترکیبی ۲۶/۹ درصد با انحراف معیار ۳/۷۴ شد. در مجموع تالاب افقی راندمان حذف حدود سه برابری را نسبت به تالاب با جریان عمودی در زمان ماند سه روز نمایش

می‌دهد. کم بودن BOD_5 ورودی به تالاب از عوامل کم بودن راندمان حذف است. میانگین BOD_5 خروجی از تالاب ترکیبی ۸/۸۹ میلی‌گرم در لیتر بود.

در زمان ماند شش روز، میانگین راندمان حذف BOD_5 توسط تالاب با جریان عمودی ۱۰/۷ درصد و انحراف معیار آن ۲/۹۳ شد. در همان زمان ماند، راندمان حذف BOD_5 توسط تالاب با جریان افقی ۲۹/۹ درصد با انحراف معیار ۵/۵۳ و راندمان حذف تالاب ترکیبی ۳۷/۴ درصد با انحراف معیار ۴/۹۴ شد. نتایج در مقایسه با زمان ماند سه روز، افزایش راندمان حذف را نمایش می‌دهد. در زمان ماند شش روز میانگین BOD_5 خروجی از تالاب ترکیبی ۵/۱۳ میلی‌گرم در لیتر بود (شکل ۳).

تجزیه واریانس به‌منظور مقایسه اثر نوع جریان در تالاب مصنوعی بر راندمان حذف انجام شد. تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد ($P<0.01$) میان راندمان‌های حذف تالاب با جریان عمودی و تالاب با جریان افقی در زمان ماند سه روز و شش روز مشاهده شد.

اثر زمان ماند بر راندمان حذف BOD_5 در تالاب با جریان عمودی، جریان افقی و تالاب ترکیبی نیز بررسی شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس تفاوت معنی‌داری را در اثر تغییر زمان ماند بر راندمان حذف BOD_5 در تالاب‌های با جریان عمودی و جریان افقی نشان نمی‌دهد. اما در تالاب با جریان ترکیبی با تغییر زمان ماند، تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد ($P<0.05$) را نمایش می‌دهد.

فرایندهای هوازی و بی‌هوازی بیولوژیک از عوامل مؤثر بر کاهش BOD_5 درتالاب‌های مصنوعی زیرسطحی هستند (۱۳). همچنین فیلتر شدن و رسوب کردن از فرایندهای فیزیکی مؤثر بر حذف BOD_5 است. مقدار اکسیژن تزریق‌شده به پساب توسط گیاهان بسیار کمتر از میزان اکسیژن مورد نیاز در فرایندهای هوازی به‌منظور تجزیه مواد آلی است. اما فرایندهای بی‌هوازی با استفاده از باکتری‌های متصل به ریشه گیاهان، ریزوم‌ها و سطح مواد متخلخل بستر نقش مهمی در کاهش BOD_5 به‌ویژه در تالاب‌های مصنوعی بازی می‌نمایند. در اصل تجزیه BOD_5 توسط فرایندهای هوازی در ناحیه‌ای بسیار محدود در اطراف ریشه و ریزوم‌ها و قسمت‌هایی از بستر که در مجاورت اتمسفر است صورت می‌پذیرد (۲۵). در مجموع می‌توان گفت که در سیستم عمودی به علت وجود اکسیژن بیشتر فعالیت‌های هوازی شدت بیشتری داشته، اما به علت حجم کمتر تالاب عمودی و به سبب آن زمان ماند کمتر نسبت به تالاب زیرسطحی افقی در مجموع نقش فرایند هوازی در کاهش BOD_5 کم است.

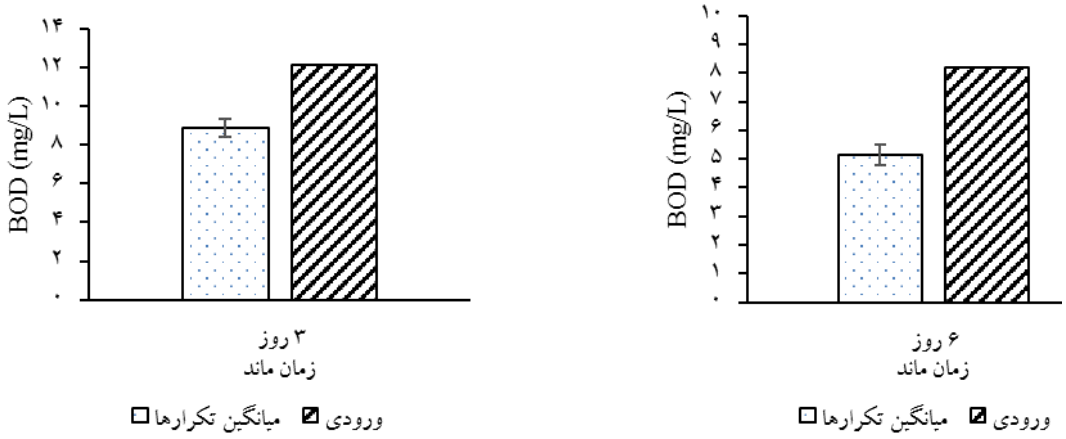
اما از علت‌های کم بودن راندمان حذف BOD_5 در این پژوهش می‌توان به دو علت عمده اشاره کرد:

ابتدا بایستی توجه کرد میانگین مقادیر BOD_5 ورودی به تالاب‌ها کمتر از ۱۲ میلی‌گرم در لیتر است (استاندارد BOD_5 پساب به‌منظور استفاده در کشاورزی ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر است).

همچنین برخی باکتری ها قادرند آمونیاک را به نیتریت و پس از آن به نیترات اکسید نمایند که در این صورت به اکسیژن نیاز دارند. چون سرعت تکثیر باکتری‌های نیتراتساز کند بوده، بین ۶ تا ۱۰ روز طول می کشد تا به مقدار زیاد انتشار یابند و اکسیژن مورد نیاز آن‌ها قابل اندازه‌گیری شود. اما اگر از ابتدا به مقدار کافی وجود داشته باشند، تداخل ناشی از نیتریفیکاسیون با BOD_5 چشمگیر خواهد بود. با وقوع نیتریفیکاسیون در آزمایش BOD_5 راندمان حذف کاهش می یابد. در اینجا نیز انتظار می رود که در آزمایش BOD_5 نیتریفیکاسیون رخ داده و باعث کاهش راندمان حذف شده است. در اصل این پدیده باعث می‌شود نتایج حاصل از راندمان حذف BOD_5 کمتر از مقادیر واقعی باشد (۱۴). علاوه بر این می‌توان بیان کرد، تالاب مصنوعی ترکیبی از تالاب مصنوعی با جریان عمودی و جریان افقی در حذف BOD_5 مؤثرتر عمل کرده است. به عبارت دیگر فرایندهای هوازی و بی‌هوازی در کنار یکدیگر اثر بیشتری بر راندمان حذف BOD5 داشته‌اند.

کاهش COD

اکسیژن خواهی شیمیایی یا همان COD یکی از مهمترین



شکل ۳. مقادیر BOD_5 ورودی و خروجی در تالاب‌های ترکیبی در زمان ماند اسمی سه و شش روز

شاخص های سنجش آلودگی فاضلاب است. آلودگی فاضلاب ناشی از مواد خارجی است که وارد آب شده و بصورت معلق یا محلول باعث آلودگی آن شده‌اند.

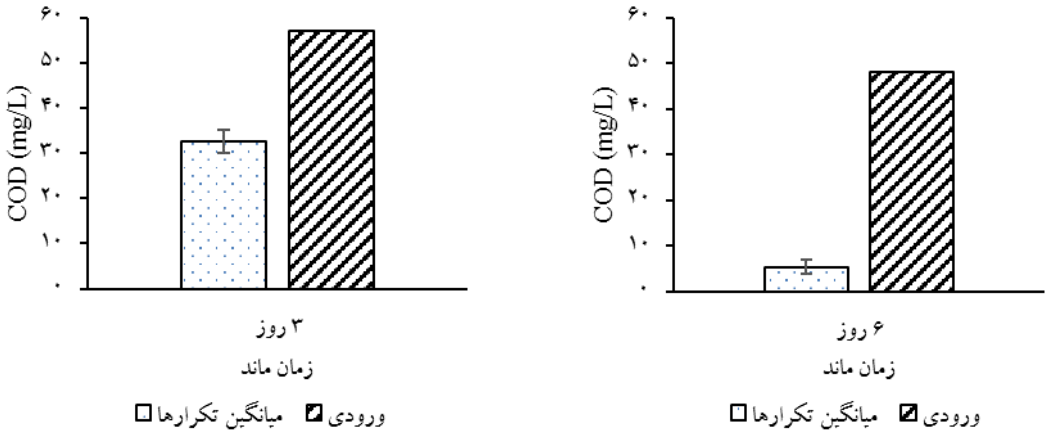
در زمان ماند سه روز، میانگین راندمان حذف COD توسط تالاب با جریان عمودی ۴/۶۰ درصد و انحراف معیار آن ۱/۲۲ بود. در همان زمان ماند، میانگین راندمان حذف COD توسط تالاب با جریان افقی ۴۰/۰ درصد با انحراف معیار ۴/۶۲ و میانگین راندمان حذف COD توسط تالاب ترکیبی ۴۲/۷ درصد با انحراف معیار ۴/۴۲ شد. راندمان حذف COD در تالاب با جریان افقی حدود نه برابر تالاب با جریان عمودی شد. میانگین COD خروجی از تالاب ترکیبی در زمان ماند سه روز ۳۲/۷ میلی‌گرم در لیتر بود.

در زمان ماند شش روز، میانگین راندمان حذف COD توسط تالاب با جریان عمودی ۱۶/۰ درصد و انحراف معیار آن ۲/۰۰ شد. همچنین در زمان ماند مشابه، میانگین راندمان حذف COD توسط تالاب با جریان افقی ۸۶/۸ درصد با انحراف معیار ۳/۷۹ و میانگین راندمان حذف COD توسط تالاب ترکیبی ۸۸/۹ درصد با انحراف معیار ۳/۱۸ شد. نتایج در مقایسه با زمان ماند سه روز، رشد قابل توجه راندمان حذف COD را نمایش می‌دهد. در زمان ماند شش روز، COD خروجی از تالاب ترکیبی به‌طور متوسط ۵/۳۳ میلی‌گرم در لیتر است (شکل ۴).

تجزیه واریانس به‌منظور مقایسه اثر نوع جریان بر راندمان حذف COD صورت پذیرفت. میانگین راندمان‌های حذف COD در تالاب با جریان عمودی و تالاب با جریان افقی در زمان‌های ماند سه و شش روز تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد ($P<0.01$) را نشان داد.

اثر زمان ماند بر راندمان حذف COD نیز بررسی شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس راندمان‌های حذف COD، تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد ($P<0.01$) در اثر تغییر زمان ماند در میان تالاب‌های با جریان عمودی، جریان افقی و تالاب ترکیبی را نشان داد.

از عوامل اصلی در حذف COD در تالاب‌های مصنوعی، فیلتر فیزیکی و تجزیه بیولوژیکی است. در این میان نقش گیاه انتقال اکسیژن به ناحیه ریزوسفر و کمک به تجزیه مواد آلی است (۸). همچنین مواد بستر به حذف فیزیکی مواد آلی کمک می‌نمایند. لازم به ذکر است که بستر پامیس دارای تخلخل به‌صورت حفرات درونی است که با توجه به طولانی کردن مسیر حرکت پساب در طول تالاب، می‌تواند کمک شایانی به حذف فیزیکی مواد آلی نماید.



شکل ۴. مقادیر COD ورودی و خروجی در تالاب‌های ترکیبی در زمان ماند اسمی سه و شش روز

در مجموع می‌توان بیان کرد که تالاب مصنوعی ترکیبی با بستر پامیس و گیاه وتیور اثر قابل توجهی برکاهش بار COD ورودی به تالاب داشته است. در پژوهشی نقش تالاب مصنوعی در حذف COD بررسی شد و به‌طور متوسط راندمان حذف ۷۹ درصد را مشاهده شد (۱۲). همچنین در پژوهشی دیگر راندمان حذف ۸۰ درصد توسط تالاب گزارش شد (۶).

در جدول ۱ مقادیر ورودی و خروجی شاخص‌های بررسی شده در این پژوهش آورده شده است.

نتیجه‌گیری

تالاب مصنوعی یکی از فناوری‌های جدید به‌منظور تصفیه طبیعی فاضلاب است که به‌طور وسیع در کشورهای اروپایی و آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. تالاب‌های مصنوعی به شدت وابسته به شرایط گیاه و بستر هستند، بنابراین، پیش از استفاده در سطح وسیع، بایستی در مقیاس‌های کوچک مورد بررسی و تحلیل قرار گیرند. همچنین بهینه‌سازی و بومی‌سازی تالاب‌های مصنوعی بسیار حائز اهمیت است.

در این پژوهش عملکرد تالاب مصنوعی ترکیبی بر کاهش بار آلودگی‌های پساب شهری مورد بررسی قرار گرفت. از نوآوری‌های این پژوهش ترکیب بستر پامیس و گیاه وتیور بود. بستر پامیس علاوه بر قابلیت جذب و تبادل یونی، دارای تخلخل و سطح ویژه زیاد است. این شرایط موجب ایجاد محیطی مناسب جهت رشد بیوفیلم درون تالاب می‌شود. همچنین، اثر جاذب بودن پامیس و تخلخل بیشتر نسبت به شن موجب کاهش مساحت تالاب و عملکرد بهتر نسبت به تالاب مصنوعی با بستر شن می‌شود. گیاه وتیور نیز با شبکه گسترده ریشه‌ای علاوه بر انتقال اکسیژن به درون پساب، محیط مناسبی را برای رشد و چسبیدن میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌نماید. استفاده از پامیس و گیاه وتیور در تالاب مصنوعی ترکیبی شرایط ایده‌آلی به‌منظور تصفیه پساب به وجود می‌آورد.

تالاب مصنوعی ترکیبی با بستر پامیس و گیاه وتیور کلی‌فرم گوارشی را به‌ترتیب در زمان‌های ماند سه و شش روز ۹۹/۱ و ۹۹/۸ درصد کاهش داد. تالاب مصنوعی مورد مطالعه در کاهش کلی‌فرم گوارشی کاملاً موفق عمل کرده است. همچنین BOD_5 به‌ترتیب در زمان‌های ماند سه و شش روز ۲۶/۹ و ۳۷/۴ درصد و COD در زمان‌های ماند سه و شش روز ۴۲/۷ و ۸۸/۹ درصد در تالاب مصنوعی ترکیبی کاهش یافت. بایستی توجه کرد هر چه مقدار مواد آلی تجزیه‌پذیر در پساب ورودی به تالاب بیشتر باشد

مقدار حذف مواد آلی در تالاب‌ها نیز افزایش یافته و غلظت آلاینده‌ها در خروجی کاهش می‌یابد.

در مجموع چنانچه از بسترهای جاذب مواد آلاینده استفاده شود، تالاب مصنوعی می‌تواند یکی از راه‌های مناسب و کم هزینه به‌منظور استفاده در تصفیه تکمیلی فاضلاب در کشور باشد.

منابع مورد استفاده

1. Abedi-Koupai, J., R. Mollaei and S. S. Eslamian. 2015. The effect of pumice on reduction of cadmium uptake by spinach irrigated with wastewater. *Ecohydrology and Hydrobiology* 15: 208-214.
2. Akratos, C. S. and V. A. Tsihrintzis. 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Ecological Engineering* 29: 173-191.
3. Ayaz, S. Ç., Ö. Aktaş, L. Akça and N. Fındık. 2015. Effluent quality and reuse potential of domestic wastewater treated in a pilot-scale hybrid constructed wetland system. *Journal of Environmental Management* 156: 115-120.
4. Boutilier, L., R. Jamieson, R. Gordon, C. Lake and W. Hart. 2010. Performance of surface-flow domestic wastewater treatment wetlands. *Wetlands* 30: 795-804.
5. Cavaleri, L., N. Miraglia and M. Papia. 2003. Pumice concrete for structural wall panels. *Engineering Structures*. 25:115-125.
6. Comino, E., V. Riggio and M. Rosso. 2011. Mountain cheese factory wastewater treatment with the use of a hybrid constructed wetland. *Journal of Ecological Engineering* 37: 1673-1680.
7. Faulwetter, J. L., V. Gagnon, C. Sundberg, F. Chazarenc, M. D. Burr, J. Brisson, A. K. Camper and O. R. Stein. 2009. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Journal of Ecological Engineering*. 35: 987-1004.
8. Gagnon, V., F. Chazarenc, M. Koiv and J. Brisson. 2012. Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland. *Water Research* 46: 5305-5315.
9. Ghasemi, A., Sh. Danesh and A. Alizadeh. 2012. Feasibility study of using drip irrigation system in the application of effluent of Mashhad municipal wastewater treatment plants. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 3(6): 162-152 (In Farsi).
10. Ghorbani, M. 1999. Perlite and Mineral Pumice. Publications of the Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (In Farsi).
11. Giæver, H. 2003. Experience and results from the northernmost constructed wetland in Norway. *Advanced of Ecological Science* 11: 215-236.
12. Haghshenas-Adarmanabadi, A., M. Heidarpour and S. Tarkesh-Esfahani. 2015. Evaluation of horizontal–vertical subsurface hybrid constructed wetlands for tertiary treatment of conventional treatment facilities effluents in developing countries. *Water, Air, and Soil Pollution* 227: 28.
13. Kadlec, R. H. 2009. Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Journal of Ecological Engineering* 35: 159-174.
14. Khani, M. R., K. Yaghmaeian and M. Hojjati. 2011. Wastewater Engineering-Treatment and Reuse. Khanizan Publications, Tehran, Iran (In Farsi).
15. Mesquita, M., A. Albuquerque, L. Amaral and R. Nogueira. 2017. Seasonal variation of nutrient removal in a full-scale horizontal constructed wetland. *Energy Procedia* 136: 225-232.
16. Öövel, M., A. Tooming, T. Mauring and Ü. Mander. 2007. Schoolhouse wastewater purification in a LWA-filled hybrid constructed wetland in Estonia. *Journal of Ecological Engineering* 29: 17-26.
17. Papaevangelou, V. A., G. D. Gikas, V. A. Tsihrintzis, M. Antonopoulou and I. K. Konstantinou. 2016. Removal of endocrine disrupting chemicals in HSF and VF pilot-scale constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal* 294: 146-156.
18. Pazarlioğlu, N. K. and A. Telefoncu. 2005. Biodegradation of phenol by Pseudomonas putida immobilized on activated pumice particles. *Process Biochemistry* 40: 1807-1814.
19. Rafiipour, A. and M. Najjarchi 2012. Phytoremediation of vetiver grass in reducing water chemical pollution and its use to control weeds as mulch: A case study of Arak city. *In:* The 1st National Conference on Sustainable Development of Agriculture and Healthy Environment. Islamic Azad University of Hamadan Branch, Hamedan, Iran (In Farsi).

20. Sharbat Malek, M. A. and S. M. Borgheei. 2005. Performance of pumice stone as a biofilm fixed bed in aerobic biofilm reactor. *Water and Wastewater* 56: 71-62 (In Farsi).
21. Truong, P. N. 2000. The Global Impact of Vetiver Grass Technology on the Environment. *In*: Proceedings of the Second International Conference on Vetiver. Bangkok, Thailand.
22. Vymazal, J. 2010. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental Science and Technology* 45:61-69.
23. Vymazal, J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Journal of Ecological Engineering* 25: 478-490.
24. Vymazal, J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment* 380: 48-65.
25. Vymazal, J. and L. Kröpfelová. 2009. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience. *Science of The Total Environment* 407: 3911-3922.
26. Wu, S., P. N. Carvalho, J. A. Müller, V. R. Manoj and R. Dong. 2016. Sanitation in constructed wetlands: A review on the removal of human pathogens and fecal indicators. *Science of the Total Environment* 541: 8-22.
27. Wu, H., J. Fan, J. Zhang, H. H. Ngo, W. Guo, Z. Hu and J. Lv. 2016. Optimization of organics and nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: effects of aeration time and aeration rate. *International Biodeterioration and Biodegradation* 113: 139-145.
28. Yavuz, M., F. Godea, P. Erol, O. Sema and C. S. Yogesh. 2008. An economic removal of Cu^{2+} and Cr^{3+} on the new adsorbents, pumice and polyacrylonitrile/pumice composite. *Chemical engineering* 137: 453-461.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 1, Spring 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Study the Performance of Hybrid Constructed Wetland with Pumice Substrate and Vetiver Plants in Urban Wastewater Treatment

J. Abedi-Koupai*, V. Arab-Nasrabadi and A. Sheykhan[1]

(Received: May 3-2018; Accepted: June 10-2018)

Abstract

One of the ways to reduce the amount of wastewater pollution is the use of constructed wetlands. In this research, the performance of a hybrid constructed wetland with pumice ore and vetiver plant on urban wastewater has been investigated. Hybrid wetlands with these specifications were constructed in the vicinity of wastewater treatment at the Isfahan University of Technology. To evaluate the performance of constructed wetland the effects of three and six days of retention time on the removal efficiency were studied using a completely randomized design. On average, for three days of retention time, in the wetland with the vertical flow, the horizontal flow, and hybrid wetland, fecal coliform was 47.4, 98.3, and 99.1 percent, BOD_5 was 7.6, 20.9, and 26.9 percent, and the COD was 4.6, 40.0, and 42.7 percent decreased, respectively. Also, during the six days of retention time in the wetland with the vertical flow, the horizontal flow, and hybrid wetland, fecal coliform was 61.6, 99.3, and 99.8 percent, BOD_5 was 10.7, 29.9, and 37.4 percent, and COD was 16.0, 86.8, and 88.9 percent decreased, respectively. The combination of Pumice as a porous material with the ability to absorb the elements as well as vetiver as a plant capable of phytoremediation indicated a very suitable performance during low retention time.

Keywords: Hybrid constructed wetland, Vetiver, Pumice, Urban wastewater

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*: Corresponding author, Email: koupai@cc.iut.ac.ir