بررسی کارایی تالاب مصنوعی زیرسطحی هیبریدی در تصفیه تکمیلی پساب شهری

امیر شیخان، محمد شایان‌نژاد* و وحید عرب نصرآبادی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۲۰)

چکیده

امروزه استفاده از پساب شهری تصفیه شده برای کشاورزی در جهان رو به افزایش است. یکی از روش‌های تصفیه طبیعی پساب، تالاب مصنوعی است. در این پژوهش اثر زمان‌های ماند سه و شش روز در عملکرد تالاب مصنوعی عمودی، افقی و ترکیبی (ابتدا جریان عمودی و سپس افقی) با بستر پرلیت و گیاه سیپروس روی پساب شهری بررسی شده. در این پژوهش حوضچه‌های تالاب افقی با ابعاد ۰/۷۵ متر عرض، ۰/۵ متر عمق و ۶ متر طول و تالاب عمودی به‌صورت استوانه‌ای با قطر ۰/۷ متر و ۱/۲ متر ارتفاع طراحی شدند. در زمان ماند سه روز در تالاب‌های عمودی، افقی و ترکیبی، میانگین راندمان حذف نیترات به‌ترتیب ۳۱/۴، ۳۶/۳ و ۵۶/۳ درصد، آمونیوم به‌ترتیب ۷/۶، ۳۲/۷ و ۳۷/۸ درصد و کلی‌فرم مدفوعی به‌ترتیب ۵۳/۳، ۹۳/۴ و ۹۶/۹ شد. همچنین در زمان ماند شش روز در تالاب‌های عمودی، افقی و ترکیبی میانگین راندمان حذف نیترات به‌ترتیب ۴۵/۸، ۵۸/۴ و ۷۷/۵ درصد، آمونیوم به‌ترتیب ۱۶/۹، ۷۵/۱ و ۷۹/۳ درصد و کلی‌فرم مدفوعی به‌ترتیب ۵۸، ۹۷/۵ و ۹۸/۹ درصد شد. در مجموع نتایج نشان داد که تالاب مصنوعی ترکیبی با بستر پرلیت و گیاه سیپروس، عملکرد مناسبی در حذف آلاینده‌های پساب به‌ویژه کلی‌فرم مدفوعی داشته است.

واژه‌های کلیدی: تالاب مصنوعی ترکیبی، پرلیت، سیپروس، پساب شهری

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

مقدمه

افزایش روز افزون جمعیت و گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی در بیشتر کشورهای واقع در کمربند مناطق خشک منجر به تشدید بحران آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران شده است. در این راستا منابع آب متعارف محدود بوده و افزایش تقاضا و بهره‌برداری از منابع آب منجر به وارد آمدن فشار به منابع موجود می‌شود. به همین سبب در سال‌های اخیر استفاده از آب‌های نامتعارف به‌منظور خروج از بحران کمبود آب و استفاده بهینه از منابع آب دائمی قابل دسترس مورد توجه جوامع بشری قرار گرفته است (۲۴).

فاضلاب یکی از انواع آب‌های نامتعارف محسوب می‌شود که بخش عمده آن متشکل از آب است که در صورت حذف آلاینده‌ها و ناخالصی‌های آن، می‌تواند دوباره در چرخه مصرف قرار گیرد. امروزه استفاده از پساب شهری تصفیه شده برای کشاورزی در جهان رو به افزایش است. استفاده از فاضلاب‌های تصفیه شده در کشاورزی مزایای فراوانی دارد که از آن جمله می‌توان به کاهش فشار بر منابع آب، کاهش هزینه آب کشاورزی، کاهش هزینه کود، افزایش محصولات و کاهش بار آلودگی وارده به محیط‌زیست اشاره کرد. یکی از روش‌های بسیار مناسب برای جبران کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، استفاده از پساب است (۱۴).

فاضلاب حاوی انواع مواد آلوده و بیماری‌زا است که برای موجودات زنده و حتی محیط زیست خطرناک است. لذا به منظور حفاظت از محیط زیست، جانوران و انسان‌ها این آلودگی‌ها بایستی در فرایند تصفیه رفع شوند (۱۷). سیستم‌های صنعتی تصفیه پساب علی‌رغم مزیت‌هایی که دارند، هزینه اولیه و جانبی زیادی داشته و به نیروی متخصص برای بهره‌برداری نیاز دارند. یکی از روش‌های طبیعی تصفیه پساب، تالاب مصنوعی است (۲۳). امروزه با توجه به هزینه‌های زیاد راهکارهای متداول تصفیه پساب، استفاده از روش‌های زیستی چون تالاب‌های مصنوعی برای کاهش آلاینده‌ها، افزایش چشمگیری یافته است. آلاینده‌ها طی فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی حذف می‌شوند. همچنین گیاهان نیز در جذب بعضی آلاینده‌های فلزی و نمکی شرکت کرده و سبب تصفیه پساب می‌شوند (۲۵). تالاب‌ها از نظر نوع جریان به دو گروه تالاب جریان سطحی و جریان زیرسطحی تقسیم می‌شوند که تالاب‌های جریان زیرسطحی نیز از نظر نوع جریان به سه گروه جریان افقی، جریان عمودی و جریان ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شوند که هر کدام مزیت خاص خود را دارند.

تالاب مصنوعی زیرسطحی جریان افقی به‌دلیل سهولت در ساخت و کنترل، بیشتر مرسوم است و تالاب مصنوعی زیرسطحی جریان عمودی به‌دلیل ایجاد شرایط هوازی و افزایش راندمان حذف نیترات در فرایند تصفیه در ترکیب با جریان افقی به‌کار گرفته می‌شود (۲۱). گیاه‌پالایی فناوری نسبتاً جدیدی است که در آن از گیاهان مقاوم برای حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌های آلی، معدنی و ترکیبات خطرناک محیط‌زیست از جمله فلزات سنگین، مواد نفتی و علف‌کش‌ها استفاده می‌شود. امروزه استفاده از برخی گیاهان بر اساس توانایی فوق‌العاده آنها در انباشت عناصر (گیاهان بیش انباشتگر) و حذف ترکیبات مضر از محیط و متابولیزه کردن آنها به مولکول‌های متنوع، کاربرد فراوان دارد (۳). چنی در سال ۱۹۸۳ اولین کسی بود که گیاهان بیش‌انباشتگر را برای پالایش فلزات مناطق آلوده معرفی کرد (۴). از مهم‌ترین مزایای گیاهان در تالاب مصنوعی، انتقال اکسیژن اتمسفر به داخل بستر و ایجاد شرایط هوازی در محیط ریشه به‌منظور تسریع فعالیت ریزجانداران و تصفیه پساب است. گیاهان اکسیژن هوا را دریافت کرده و توسط مجاری انتقال گاز گیاهی، باعث افزایش اکسیژن محلول در آب می‌شوند. همچنین گیاهان با سایه‌اندازی، رشد جلبک‌ها را با محدود کردن نفوذ نور آفتاب به تالاب کنترل می‌کنند. نفوذ ریشه گیاه در خاک علاوه بر تسهیل حرکت آب اطراف ریشه، باعث ایجاد منافذی برای عبور آب می‌شود. نیتروژن، فسفر، فلزات سنگین و نمک‌های موجود در پساب را جذب کرده و از

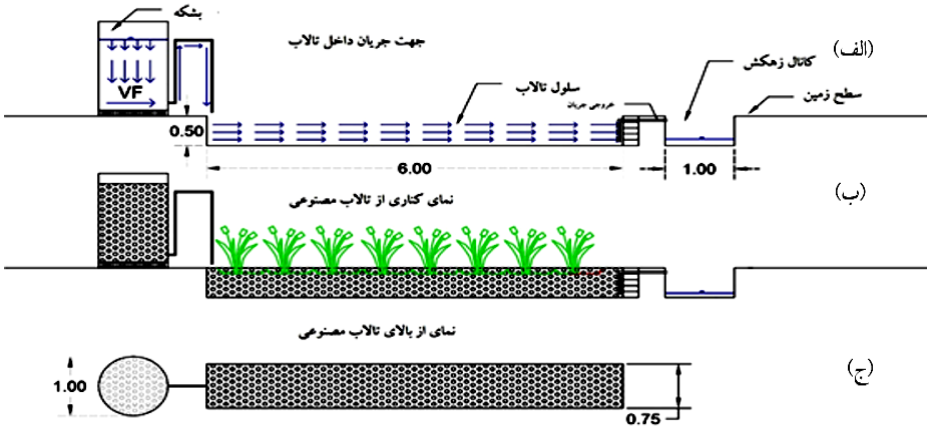
غلظت آلاینده‌ها می‌کاهد. در فصول سرما از یخ‌زدگی جلوگیری کرده و مانع اخلال در تصفیه می‌شود (۲۴). بنابراین گیاه انتخابی در سیستم باید خصوصیاتی منحصر به فرد داشته باشد. این گیاهان باید مقاومت زیادی در برابر تماس با آلاینده‌ها داشته باشند به‌طوری که نوسانات غلظت هر آلاینده باعث خشکیدن و نابودی گیاه نشود. همچنین نسبت به آفات و بیماری‌ها مقاوم بوده و از نظر مراقبت به حداقل مدیریت نیاز باشد. سیستم ریشه‌ای قوی داشته باشد تا بتواند در بستر نفوذ کرده و علاوه بر انتقال اکسیژن به اعماق تالاب، قابلیت جذب بالای مواد مغذی را دارا باشد. از دیگر خصوصیات مهم این گیاهان بومی منطقه بودن، دارای فتوسنتز قوی و سازگاری با آب و هوای منطقه مورد استفاده است (۸).

یکی از گیاهان به‌کار رفته در تالاب‌های مصنوعی گیاه سیپروس است. ریشه این گونه تولید اندام هوایی و ریزوم می‌کند. گل‌آذین خوشه‌ای، دمگل باریک و طویل و بذر سه‌گوش و به رنگ قهوه‌ای تا سیاه است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که که نرخ راندمان حذف فسفر پساب توسط نی و سیپروس در حال رشد در تالاب مصنوعی در اوگاندا به‌ترتیب ۳۳ و ۶۶ درصد بوده است (۱۹). دلیل انتخاب این گونه گیاهی مقاومت بسیار زیاد نسبت به شرایط محیطی نامساعد و جذب بالای عناصر است. همچنین مقاومت بسیار زیادی در تحمل نوسانات دما و بیماری‌ها و آفات داشته و دارای ریشه‌های ضخیم و قدرتمند است و در قسمت ریشه دارای غده‌های زیادی بوده که محل ذخیره مواد غذایی است.

بستر تالاب‌های مصنوعی از مهم‌ترین اجزای تالاب در فرایند تصفیه بوده و با استفاده از مواد متخلخلی همچون شن، ماسه، پوکه معدنی و پرلیت پر می‌شود. پرلیت نوعی شیشه ولکانیکی آلومینه سیلیکاته است که مقدار دو الی پنج درصد آب در شبکه بلوری خود جای داده و به سبب همراه داشتن آب، اشکال کروی در آن ایجاد شده است. از مهم‌ترین مزایای استفاده از پرلیت در بستر تالاب، درصد تخلخل بسیار زیاد و سطح ویژه بالای آن است که سبب می‌شود توانایی بالایی در فرایند جذب آلاینده‌ها از پساب داشته باشد. همچنین با قیمت مناسب به فراوانی در ایران یافت می‌شود. همچنین از ترکیبات شیمیایی خنثی و ضد اشتعال بوده و دوست‌دار محیط زیست است (۹ و ۱۰). استفاده از پرلیت روز به روز در حال رشد و گسترش است. قطب‌های صنعتی جهان یعنی آمریکا و روسیه از دیرباز به شناسایی و استفاده از پرلیت روی آورده‌اند. پرلیت قابلیت جذب بالایی در حذف رنگ از پساب رنگی دارد (۱۶). نتایج نشان می‌دهد که پرلیت به‌عنوان جاذب معدنی مناسب برای حذف فلزات آلاینده مثل جیوه، مس و نقره طی یک واکنش طبیعی و گرمازا از محلول‌های آبی و فاضلاب بهترین عملکرد را دارد (۹).

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سایت تصفیه‌خانه پساب دانشگاه صنعتی اصفهان واقع در ضلع جنوبی دانشگاه و در حاشیه جاده کمربندی خمینی‌شهر با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۱ دقیقه و ۴۹ ثانیه و با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۲ دقیقه و ۲۴ ثانیه به‌منظور تصفیه تکمیلی پساب خروجی تصفیه‌خانه دانشگاه اجرا شد. این تالاب‌ها در کنار لاگون تصفیه پساب دانشگاه صنعتی اصفهان به‌منظور دسترسی آسان به پساب راه‌اندازی شدند. تالاب‌های مصنوعی به‌صورت ترکیبی (ابتدا جریان عمودی و سپس افقی) ساخته شدند. قسمت جریان عمودی شامل بشکه‌هایی با قطر ۰/۷ متر و ارتفاع ۱/۲ متر بود که در بالادست قسمت جریان افقی نصب شدند. قسمت جریان افقی به‌صورت حوضچه‌هایی با طول ۶ متر و عرض ۰/۷۵ متر و عمق ۰/۵ متر حفاری و سپس با شیب یک درصد تسطیح شدند. پس از آن با استفاده از آجر لفتون دیوارچینی و عملیات زیرسازی و عایق‌بندی با استفاده از موکت و پلاستیک دو لایه پلی‌اتیلن انجام شد. بستر به‌کار رفته پرلیت با تخلخل ۶۰ درصد بود که به تالاب‌ها انتقال داده شد. پساب به‌وسیله یک پمپ کف‌کش و با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از قطره‌چکان‌های درون خط خود شوینده دبی ثابت به قسمت جریان عمودی



شکل ۱. الف) نحوه قرارگیری تالاب جریان عمودی و افقی، ب) نمای کناری تالاب و ج) پلان تالاب

تالاب‌ها منتقل و توزیع شد. این پساب بعد از گذشتن از سیستم عمودی با یک سیفون به قسمت جریان افقی زیرسطحی منتقل و پس از گذراندن زمان ماند طراحی، از سیستم خارج می‌شد (شکل ۱). همچنین پساب به‌صورت زیرسطحی در تالاب‌ها جریان داشت. زمان ماند اسمی در نظر گرفته شده برای هر تالاب سه و شش روز انتخاب شد. با اندازه‌گیری دبی خروجی جریان از تالاب‌ها زمان ماند واقعی برابر ۲/۴ و ۶/۹ روز به‌دست آمد.

یکی از اهداف اساسی در تصفیه تکمیلی پساب شهری کاهش بار کلی‌فرم مدفوعی است. همچنین نیتروژن پساب نیز یکی از معضلات فرایند تصفیه است که به‌صورت‌های مختلف در انواع واکنش‌ها و فرایندها، دگرگونی می‌یابد. نیترات و آمونیوم از مهم‌ترین پارامترهای پساب است که به‌منظور بررسی نقش تالاب در فرایند پالایش نیتروژن پساب بایستی هر دو شکل نیترات و آمونیوم بررسی شود (۱). لذا شاخص‌های کلی‌فرم مدفوعی، نیترات و آمونیوم در این پژوهش بررسی قرار گرفتند. کلی‌فرم مدفوعی به روش تخمیر پنج‌لوله‌ای (۶) در آزمایشگاه محیط زیست دانشکده بهداشت و محیط زیست دانشگاه علوم پزشکی اصفهان (معتمد محیط زیست) انجام شد. روش تخمیر چندلوله‌ای برای تعیین تعداد کلی‌فرم آب‌های حاوی نمک و شور، انواع فاضلاب شهری و صنعتی و حتی آب‌های با تعداد کلی‌فرم بسیار کم استفاده می‌شود. تعداد باکتری‌های کلی‌فرم که از روش تخمیر پنج لوله‌ای به‌دست می‌آید در اصل بیشترین احتمال برای تعداد کلی‌فرم‌ها در ۱۰۰ میلی‌لیتر از آب را بیان می‌کند (۶). شاخص نیترات با استفاده از روش استاندارد با شماره ۸۰۳۹ توسط دستگاه اسپکتروفتومتر Hach Lange مدل ۶۰۰۰ DR و آمونیوم با استفاده از دستگاه کجلدال بر مبنای تیتراسیون کجلدال و بر اساس روش استاندارد بین‌المللی آزمایش‌های آب و پساب (۲۰) در آزمایشگاه آب گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری نیترات از کیت استاندارد اندازه‌گیری نیترات با شماره ۸۰۳۹ شرکت هک استفاده شد (۲۲).

داده‌های نیترات، آمونیوم و کلی‌فرم مدفوعی در هر زمان ماند با سه تکرار اندازه‌گیری شد و توسط طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم افزار تحلیل آماری SPSS ۱۹ بررسی و تحلیل شدند.

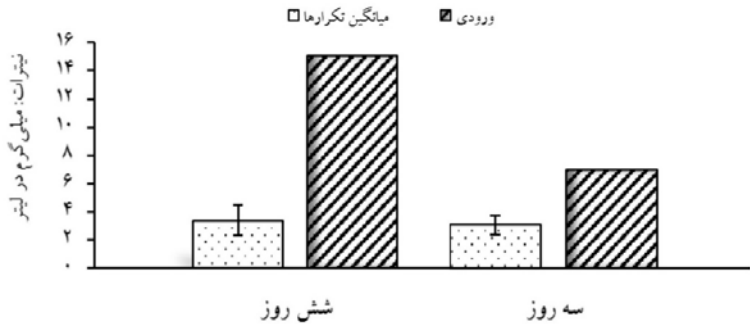
نتایج و بحث

تغییرات نیترات

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در زمان ماند سه روز، میانگین راندمان حذف نیترات از قسمت جریان عمودی برابر با ۳۱/۰ درصد با انحراف معیار ۲۶/۵۲ و در زمان ماند شش روز به ۴۵/۷ درصد با انحراف معیار ۱۸/۹ رسیده است. همچنین در

جدول ۱. مقدار نیترات ورودی و خروجی به تالاب‌های عمودی، افقی و ترکیبی و راندمان حذف آنها در زمان‌های ماند سه و شش روز

نیترات	ورودی (میلی‌گرم در لیتر)		خروجی (میلی‌گرم در لیتر)		راندمان حذف	
	سه روز	شش روز	سه روز	شش روز	سه روز	شش روز
عمودی	۷/۱	۱۵/۱	۴/۹	۸/۲	۳۱/۰	۴۵/۷
افقی	۴/۹	۸/۲	۳/۱	۳/۴	۳۶/۷	۵۸/۵
ترکیبی	۷/۱	۱۵/۱	۳/۱	۳/۴	۵۶/۳	۷۷/۵



شکل ۲. مقادیر نیترات ورودی و خروجی در تالاب‌های ترکیبی در زمان ماند اسمی سه و شش روز

زمان ماند سه روز قسمت جریان افقی میانگین راندمان حذف نیترات ۳۶/۷ درصد با انحراف معیار ۱۵/۷۷ داشت و در زمان ماند شش روز این مقدار به ۵۸/۵ با انحراف از معیار ۱۳/۶۵ افزایش پیدا کرده است. درنهایت میانگین راندمان حذف در سیستم ترکیبی (مجموع تالاب عمودی و افقی) در زمان ماند سه روز برابر ۵۶/۳ درصد با انحراف از معیار ۱۰/۸۳ و در زمان ماند شش روز برابر با ۷۷/۵ با انحراف از معیار ۷/۴ شد. مقدار نیترات ورودی و خروجی به تالاب‌های عمودی، افقی و ترکیبی و راندمان حذف آنها در زمان‌های ماند سه و شش روز در جدول (۱) و همچنین شکل (۲) بیان شده است. طی پژوهشی روی تالاب مصنوعی هیبریدی با بستر شن و زمان ماند ۷/۹ روز، متوسط راندمان حذف نیترات ۵۲ درصد گزارش شد (۱۱). نتایج نشان داد که راندمان حذف نیترات در تالاب مصنوعی جریان افقی بیشتر از قسمت جریان عمودی بوده و همچنین در زمان ماند شش روز راندمان حذف نیترات بیشتر از زمان ماند سه روز بوده است.

برای بررسی اثر زمان ماند بر راندمان حذف نیترات آزمون تجزیه واریانس بین تکرارها انجام شد. با بررسی اثر زمان ماند در قسمت‌های مختلف تالاب مصنوعی مشاهده شد که در تالاب جریان عمودی و تالاب جریان افقی بین زمان‌های ماند سه و شش روز تفاوت معنادار نبوده است. اما در تالاب مصنوعی ترکیبی، راندمان حذف نیترات بین زمان‌های ماند سه روز و شش روز در سطح پنج درصد ($p< ۰/۰۵$) تفاوت معنی‌دار داشته است (جدول ۲).

نیتروژن کل در پساب شامل نیترات، نیتریت، آمونیاک، آمونیوم و نیتروژن آلی است. نیتروژن نیتراتی اکسیدشده‌ترین شکل نیتروژن فاضلاب است. غلظت بالای نیترات در آب شرب اثرات بسیار نامطلوبی روی بدن انسان و به‌خصوص کودکان دارد. مکانیزم‌های حذف نیتروژن بسیار گسترده بوده و شامل نیتریفیکاسیون، دی‌نیتریفیکاسیون، آمونیفیکاسیون، جذب گیاهی و تبخیر است (۱۸). فرایند نیتریفیکاسیون و دی‌نیتریفیکاسیون مکانیزم اصلی حذف نیتروژن در بیشتر تالاب‌های مصنوعی است که در طی این فرایندها آمونیاک در ناحیه هوازی توسط ریزجانداران به نیترات اکسید می‌شود و

جدول ۲. مقایسه آماری راندمان حذف نیترات توسط تالاب با جریان عمودی، افقی و ترکیبی در زمان‌های ماند سه و شش روز

نوع جریان	F	سطح معناداری
عمودی	۰/۵۹^{ns}	عدم وجود تفاوت معنی‌دار
افقی	۳/۳۹^{ns}	عدم وجود تفاوت معنی‌دار
ترکیبی	۷/۸۴*	پنج درصد (p< ۰/۰۵)

**: معنی‌دار در سطح یک درصد، *: معنی‌دار در سطح پنج درصد و ns عدم وجود تفاوت معنی‌دار

در نواحی بی‌هوازی، نیترات به گاز نیتروژن تبدیل می‌شود همچنین در شرایط بی‌هوازی آمونیفیکاسیون شدت می‌یابد (۱۷). فرایندهای جذب نیترات در تالاب شامل جذب گیاهی، جذب میکروبی و جذب توسط بستر متخلخل است که باعث حذف نیترات از پساب می‌شود همچنین از عوامل مؤثر دیگر در حذف نیترات واکنش‌های شیمیایی بوده که در میان آنها دی‌نیتریفیکاسیون بسیار حائز اهمیت است (۵). در تالاب‌های مصنوعی معمولاً شرایط هوازی و بی‌هوازی همزمان وجود دارد. در جریان عمودی شرایط هوازی بیشتر حاکم است و آمونیوم پساب تبدیل به نیترات می‌شود. نیترات تشکیل شده پس از وارد شدن به قسمت جریان افقی در دسترس گیاه قرار گرفته و مصرف می‌شود. اگر نیترات تولید شده زیادتر از نیترات مورد مصرف گیاه باشد، راندمان حذف نیترات منفی و مقدار آن نسبت به پساب ورودی بیشتر می‌شود (۲۲). بررسی تغییرات نیترات در تالاب مصنوعی ترکیبی نشان داد که در برخی از ماه‌های سال راندمان حذف نیترات منفی می‌شود (۱۳). هرچند که در قسمت جریان زیرسطحی افقی شرایط بی‌هوازی بیشتر حاکم است ولی در اطراف ریشه‌گیاهان و در نزدیکی سطح بستر که در تماس مستقیم با هوا است، شرایط هوازی رخ داده و مجدداً طی عمل نیتریفیکاسیون آمونیوم به نیترات تبدیل می‌شود. می‌توان گفت که در تالاب مصنوعی چرخه نیتریفیکاسیون و دی‌نیتریفیکاسیون دائماً در حال رخ دادن است. نکته حائز اهمیت در این فرایند کم شدن سرعت حذف نیترات در زمان ماند شش روز است. به‌طوری که با دو برابر شدن زمان ماند از سه روز به شش روز، فقط ۳۶ درصد راندمان حذف نیترات افزایش پیداست. علت این امر کم شدن جریان در زمان ماند شش روز است. هر چه زمان ماند بیشتر شود، شدت جریان ورودی به تالاب کم شده و شرایط بی‌هوازی بیشتر رخ می‌دهد. بنابراین نیترات‌زایی کاهش یافته و نیترات قابل جذب کمتر در دسترس گیاه قرار می‌گیرد و در نتیجه جذب گیاهی کاهش می‌یابد (۲۶). با توجه به اینکه در تالاب مصنوعی یک چرخه نیترات وجود دارد و بسته به شرایط هوازی و بی‌هوازی و همچنین دما و اسیدیته محیط، نیتریفیکاسیون و دی‌نیتریفیکاسیون دائماً در حال رخ دادن است، بررسی نیترات به‌تنهایی صحیح نیست. به همین سبب بخش تحلیل تغییرات آمونیوم مکمل تحلیل تغییرات نیترات خواهد بود. در کل می‌توان نتیجه گرفت که در تالاب مصنوعی ترکیبی با گیاه سیپروس و بستر پرلیت، فرایند حذف نیترات به‌خوبی انجام می‌شود و شرایط هوازی در سیستم تالاب کمک شایانی به حذف نیتروژن پساب می‌کند.

تغییرات آمونیوم

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در زمان ماند سه روز میانگین راندمان حذف آمونیوم از قسمت جریان عمودی برابر با ۷/۶ درصد با انحراف معیار ۱/۶ و در زمان ماند شش روز به ۱۶/۸ درصد با انحراف معیار ۷/۳ رسیده است. همچنین در زمان ماند سه روز در قسمت جریان افقی میانگین راندمان حذف آمونیوم ۳۲/۷ درصد با انحراف از معیار ۱۸/۳۵ بوده و در زمان ماند شش روز این مقدار به ۷۵/۲ درصد با انحراف از معیار ۲/۷۳ افزایش پیدا کرده است. درنهایت میانگین راندمان حذف آمونیوم در سیستم ترکیبی در زمان ماند سه روز برابر ۳۷/۸ درصد با انحراف از معیار ۱۶/۹۶ و در زمان ماند شش روز

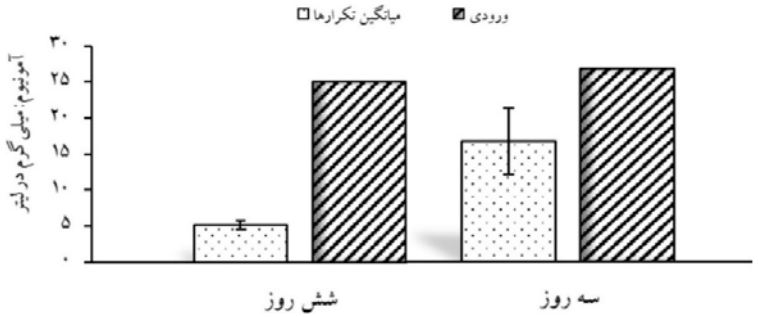
جدول ۳. مقدار آمونیوم ورودی و خروجی به تالاب‌های عمودی، افقی و ترکیبی و راندمان حذف آنها در زمان‌های ماند سه و شش روز

آمونیوم	ورودی		خروجی		راندمان حذف	
	سه روز	شش روز	سه روز	شش روز	سه روز	شش روز
عمودی	۲۶/۳	۲۵	۲۴/۳	۲۰/۸	۷/۶	۱۶/۸
افقی	۲۴/۳	۲۰/۸	۱۶/۳۶	۵/۱۶	۳۲/۷	۷۵/۲
ترکیبی	۲۶/۳	۲۵	۱۶/۳۶	۵/۱۶	۳۷/۸	۷۹/۴

جدول ۴. مقایسه آماری راندمان حذف آمونیوم توسط تالاب با جریان عمودی، افقی و ترکیبی در زمان‌های ماند سه و شش روز

نوع جریان	F	سطح معناداری
عمودی	۳/۱۷ ns	عدم وجود تفاوت معنی‌دار
افقی	۱۵/۷۰*	پنج درصد (p< ۰/۰۵)
ترکیبی	۱۷/۷۰*	پنج درصد (p< ۰/۰۵)

**: معنی‌دار در سطح یک درصد، *: معنی‌دار در سطح و پنج درصد و ns عدم وجود تفاوت معنی‌دار



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

برابر با ۷۹/۴ با انحراف از معیار ۲/۲۷ شد (جدول ۳). پژوهشگران طی پژوهشی روی تالاب مصنوعی با گیاه وتیور راندمان حذف ۲۶ درصدی آمونیوم را گزارش دادند (۲). نتایج نشان داد که راندمان حذف آمونیوم در تالاب مصنوعی جریان افقی بیشتر از قسمت جریان عمودی بوده و همچنین در زمان ماند شش روز راندمان حذف آمونیوم بیشتر از زمان ماند سه روز بوده است (شکل ۳).

با بررسی اثر زمان ماند در قسمت‌های مختلف تالاب مصنوعی مشاهده شد که راندمان حذف آمونیوم در قسمت جریان عمودی بین زمان ماند سه و شش روز تفاوت معنی‌دار نداشته است. اما در قسمت جریان افقی و جریان ترکیبی اختلاف راندمان حذف بین زمان ماند سه و شش روز در سطح پنج درصد (p< ۰/۰۵) معنی‌دار شده است (جدول ۴).

آمونیوم فرم دیگری از نیتروژن موجود در پساب است که برای گیاه قابل مصرف نیست. فرایند حذف آمونیوم پساب به دو صورت انجام می‌شود. در محیط‌های قلیایی با اسیدیته بالای ۸/۵ آمونیوم تبدیل به گاز آمونیاک شده و از محیط خارج می‌شود. با توجه به اندازه‌گیری‌هایی که از محیط صورت گرفت، اسیدیته در کل با پنج درصد نوسان حدود هشت بود. راه دیگر حذف آمونیوم تبدیل آن به نیترات و مصرف توسط

جدول ۵. مقدار کلی‌فرم مدفوعی ورودی و خروجی به تالاب‌های عمودی، افقی و ترکیبی و راندمان حذف آنها در زمان ماند سه و شش روز

کلی‌فرم مدفوعی	ورودی		خروجی		راندمان حذف	
	سه روز	شش روز	سه روز	شش روز	سه روز	شش روز
عمودی	۳۵۰۰۰	۱۳۰۰۰	۱۶۳۴۵	۵۴۶۰	۵۳/۳	۵۸/۰
افقی	۱۶۳۴۵	۵۴۶۰	۱۰۸۰	۱۳۶	۹۳/۴	۹۷/۵
ترکیبی	۳۵۰۰۰	۱۳۰۰۰	۱۰۸۰	۱۳۶	۹۶/۹	۹۹/۰

جدول ۶. مقایسه آماری راندمان حذف کلی‌فرم مدفوعی توسط تالاب با جریان عمودی، افقی و ترکیبی در زمان‌های ماند سه و شش روز

نوع جریان	F	سطح معناداری
عمودی	۰/۰۴ns	عدم وجود تفاوت معنی‌دار
افقی	۴/۶۷ ns	عدم وجود تفاوت معنی‌دار
ترکیبی	۸/۳۰*	۵ درصد (p< ۰/۰۵)

**: معنی‌دار در سطح یک درصد، *: معنی‌دار در سطح پنج درصد و ns عدم وجود تفاوت معنی‌دار

گیاه است. فرایند معدنی شدن نیز که شامل تبدیل نیتروژن آلی به فرم‌های معدنی مانند آمونیوم، نیتریت و نیترات است، در تغییرات نیتروژن مؤثر است (۱۵). با توجه به مقادیر آمونیوم و نیترات در تالاب مصنوعی، می‌توان نتیجه گرفت که اثر جذب گیاهی بسیار زیاد بوده و همچنین فرایندهای نیتریفیکاسیون و دی‌نیتریفیکاسیون به‌طور مکرر رخ می‌دهد. در مجموع می‌توان بیان کرد که هر چه زمان ماند افزایش یابد، چرخه نیتریفیکاسیون و دی‌نیتریفیکاسیون تکرار شده و فرایند حذف نیتروژن کامل‌تر می‌شود.

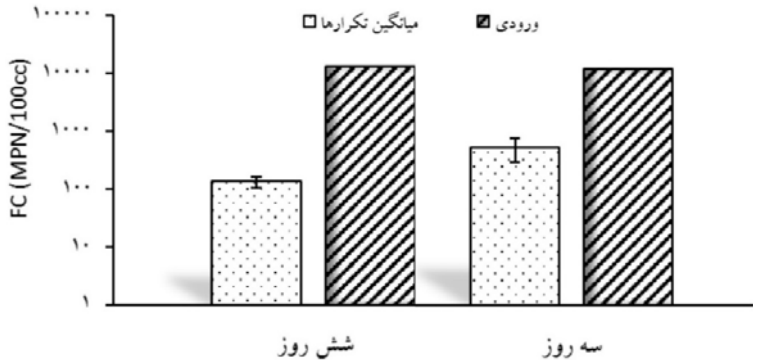
تغییرات کلی‌فرم مدفوعی

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در زمان ماند سه روز میانگین راندمان حذف کلی‌فرم مدفوعی از قسمت جریان عمودی برابر با ۵۳/۳ درصد با انحراف معیار ۳۹/۱۱ و در زمان ماند شش روز به ۵۸/۰ درصد با انحراف معیار ۳۲/۳۷ رسیده است. همچنین در قسمت جریان افقی در زمان ماند سه روز میانگین راندمان حذف کلی‌فرم مدفوعی ۹۳/۴ درصد با انحراف معیار ۲/۵۳ بود و در زمان ماند شش روز این مقدار به ۹۷/۵ درصد با انحراف از معیار ۰/۵۶ افزایش پیدا کرده است. درنهایت میانگین راندمان حذف کلی‌فرم مدفوعی در سیستم ترکیبی در زمان ماند سه روز برابر ۹۶/۹ درصد با انحراف از معیار ۱/۵۰ و در زمان ماند شش روز برابر با ۹۹/۰ با انحراف از معیار ۰/۲۴ شد (جدول ۵). طی پژوهشی روی تالاب مصنوعی هیبریدی با بستر شن و زمان ماند ۷/۹ روز، متوسط راندمان حذف کلی‌فرم مدفوعی ۹۵ درصد گزارش شد (۱۱).

در مجموع می‌توان گفت که مقدار راندمان حذف کلی‌فرم مدفوعی خروجی از تالاب مصنوعی با افزایش زمان ماند، افزایش پیدا کرده است. همچنین نتایج نشان داد که راندمان حذف کلی‌فرم مدفوعی در قسمت جریان افقی تالاب مصنوعی افزایش چشمگیری نسبت به جریان عمودی داشته و در زمان ماند شش روز، تالاب مصنوعی ترکیبی در حذف کلی‌فرم مدفوعی بهتر عمل کرده است.

راندمان حذف کلی‌فرم مدفوعی برای تالاب‌های با جریان افقی و جریان عمودی در زمان‌های ماند سه و شش روز، اختلاف معنادار مشاهده نشد. اما در جریان ترکیبی راندمان حذف بین دو زمان ماند سه و شش روز دارای اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد (p< ۰/۰۵) شده است (جدول ۶).

به‌طورکلی پاتوژن‌ها اساساً در طی عبور فاضلاب از میان



شکل ۴. مقادیر کلی‌فرم مدفوعی ورودی و خروجی در تالاب‌های ترکیبی در زمان ماند اسمی سه و شش روز (محور عمودی لگاریتمی است)

تالاب‌ها توسط فرایندهای ته‌نشینی، فیلتراسیون و جذب سطحی به‌وسیله لایه بیولوژیکی مواد بستر حذف می‌شوند، با به دام افتادن ارگانسیم‌ها در سیستم، شمار آنها به سرعت کاهش می‌یابد که این کاهش به‌علت فرایندهای مرگ طبیعی و شکار است (۸). تعداد کلی‌فرم پساب ورودی و خروجی از هر تالاب مصنوعی اختلاف بسیار زیادی داشته که باعث نزدیک شدن راندمان حذف در هر تکرار شده است. در یک فرایند رشد چسبیده، یک لایه بیولوژیکی متشکل از ریزجانداران و ذرات معلق به بستر نگه‌دارنده چسبیده و آنها را می‌پوشاند. با عبور پساب از کنار این لایه بیولوژیکی، مواد مغذی و اکسیژن آن به داخل لایه بیولوژیکی نفوذ کرده و تجزیه و مصرف می‌شود و درنهایت محصولات تجزیه بیولوژیکی به پساب پس داده می‌شود. طی جذب اولیه مواد آلی توسط جرم سلولی بیش از نیمی از آنها اکسید شده و باقیمانده به توده سلولی جدید تبدیل و به مرور زمان اکسید می‌شود (۱۸).

با توجه به متخلخل بودن بستر پرلیت، محیط مناسبی برای رشد و تکثیر انواع میکروارگانیسم‌ها فراهم آمد. این امر سبب شد راندمان حذف کلی‌فرم مدفوعی قابل توجه شود. در شکل (۴) به‌خوبی تغییرات قابل توجه کلی‌فرم مدفوعی قابل مشاهده است.

نتیجه‌گیری

گیاه‌پالایی یک تکنولوژی رو به گسترشی است که از ۱۰ سال پیش جنبه‌های کاربردی آن در تمام دنیا آغاز شد و آن شامل پالایش آلودگی‌های ارگانیک، غیر ارگانیک و مواد رادیواکتیویته است که یکی از مهم‌ترین اقدامات بشر برای تصفیه فاضلاب با پتانسیل و مزایای زیاد در مقایسه با دیگر سیستم‌های تصفیه فاضلاب بوده است.

تالاب مصنوعی سیستمی طبیعی در تصفیه فاضلاب است که با توجه به سادگی ساخت، سازگاری با محیط زیست و بازدهی زیاد در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است و یکی از راهکارهای کم‌هزینه برای دفع و تصفیه بهداشتی پساب در مناطق روستایی و شهری به‌واسطه فناوری گیاه‌پالایی است. هدف از انجام این پژوهش بررسی عملکرد تالاب مصنوعی ترکیبی در حذف آلاینده‌های پساب شهری و تصفیه تکمیلی پساب بود. استفاده از پرلیت به‌عنوان بستر و همچنین گیاه سیپروس در یک سیستم تالاب مصنوعی از نوآوری‌های این پژوهش بود. بستر پرلیت به‌دلیل داشتن تخلخل و سطح ویژه زیاد باعث کم شدن مساحت تالاب شده و محیطی مناسب برای تشکیل لایه بیولوژیکی به‌منظور تصفیه آلاینده‌های پساب ایجاد کرده و عملکرد تالاب مصنوعی را افزایش داده است. همچنین گیاه سیپروس نیز به‌دلیل داشتن سیستم ریشه‌ای قوی با رشد فراوان، به‌خوبی اکسیژن محیط را به بستر انتقال می‌دهد و محیط مناسبی برای رشد و تکثیر ریزجانداران را فراهم می‌کند.

تالاب مصنوعی ترکیبی با بستر پرلیت و گیاه سیپروس در حذف آلاینده‌های نیترات، آمونیوم و کلی‌فرم مدفوعی عملکرد

بسیار خوبی داشت. به‌طوری که در زمان ماند سه روز و شش روز راندمان حذف نیترات به‌ترتیب برابر با ۵۶/۳ درصد و ۷۷/۵ درصد بود. همچنین راندمان حذف آمونیوم در زمان ماند سه روز و شش روز برابر با ۳۷/۸ درصد و ۷۹/۳ درصد شد. راندمان حذف کلی فرم مدفوعی نیز قابل توجه بود به‌طوری که راندمان حذف این شاخص در زمان ماند سه روز و شش روز به‌ترتیب برابر با ۹۶/۹ درصد و ۹۸/۹ درصد شد. نکته حائز اهمیت در مورد عملکرد تالاب مصنوعی این است که هر چقدر غلظت مواد آلی و آلاینده‌های پساب ورودی به تالاب‌ها بیشتر باشد، مقدار حذف هر شاخص آلودگی افزایش یافته و راندمان حذف نیز افزایش می‌یابد. در مجموع نتیجه گرفته می‌شود که تالاب مصنوعی ترکیبی با بستر پرلیت و گیاه سیپروس توانایی زیادی در حذف آلاینده‌های پساب دارد و به‌عنوان یک راهکار مناسب و مقرون به‌صرفه در تصفیه تکمیلی پساب می‌توان از آن در جوامع کوچک روستایی و شهری و همچنین تصفیه پساب صنایع استفاده کرد.

منابع مورد استفاده

1. Arabnasrabadi, V. 2016. Improvement of urban wastewater quality using vetiver plants in constructed wetland system. MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan.
2. Bakhshoodeh, R., A. Soltani-Mohammadi, N. Alavi and H. Ghanavati. 2017. Treatment of high polluted leachate by subsurface flow constructed wetland with vetiver. *Civil Eng*ineering 49: 43-44.
3. Carrow. R. N. and R. R. Duncan. 2000. Wastewater and seawater use for turf grasses potential problems and solutions, Available online at: http://irrigation.org.au.
4. Chen, G. C., Z. L. He, P. J. Stoella, X. E. Yong, Yu. S. Yang and D. Calvert. 2006. Use of dolomite phosphate rock (DRR) fertilizer to reduse phosphorus leaching from sandy soil. *Environmental Pollution* 139: 176–182
5. Das, P., D. Sarkar, K. C. Makris and R. Datta. 2015. Urea-facilitated uptake and nitroreductase-mediated transformation of 2, 4, 6-trinitrotoluene in soil using vetiver grass. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 31: 445–452.
6. Eaton, A. D. and L. S. Clesceri. 2000. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21th Ed., Publishion Office American Public Health Association, USA.
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. *Ecological Engineering* 35: 987-1004.
8. Golestanifar, H., J. Molaei and M. Naserin. 2014. The Role of Wetlands in Urban and Industrial Wastewater Treatment (Design and Operation). Farahmand Publications, Iran.
9. Ghaemi, A., M. Torabmostaedi and H. ghanadzadeh. 2011. Experimental study of Cinetics and thermodynamics of heavy metals removal by perlite. *In:* Proceeding of the Third Specialized Thermodynamic Conference. University of Gilan.
10. Haghi, M. and M. Rezaei. 2012. Application of perlite mineral absorber in removal of heavy metals from aqueous solutions. *In:* Proceeding of the Second National Conference on Environmental Conservation and Planning. Technical University of Hamadan.
11. 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* 28: 227-239.
12. Hakimian, M. H. 2015. Improvement of urban wastewater quality for irrigation using the vetiver system. MSc. Thesis, Isfahan University of Technology.
13. Hernandez-Soriano, M. 2014. Environmental risk assessment of soil contamination. New York Institute of Technology PP. 485–517.
14. Kazemzadehkhoei, J. and S. Nouri. 2012. Phytoremediation. First Edition, Jihad University Publication, Iran.
15. Li, H. and W. Tao. 2017. Efficient ammonia removal in recirculating vertical flow constructed wetlands: Complementary roles of anammox and denitrification in simultaneous nitritation, anammox and denitrification. Chemical. *Engineering. Journal* 317: 972-979
16. Maroufalzakerin, S. and S. Saadat. 2016. Study of the possibility of removal of color pollutants from industrial wastewater using perlite pineral adsorbent. *In:* Proceeding of the Eighth National Conference and Specialized Exhibition of Environmental Engineering. Tehran.

17. Monzavi, M. 2014. Urban Sewage. Volume Two: Sewage Treatment. Fourth Edition. Tehran University Publications. Tehran.
18. Mosavi, G., M. Farzadkia and S. M. Mahmoodi. 2002. Sewage Engineering. Khaniran Publications. Iran.
19. Ondo Zue Abaga, N., S. Dousset, S. Mbengue and C. Munier-Lamy. 2014. Is vetiver grass of interest for the remediation of Cu and Cd to protect marketing gardens in Burkina Faso Chemosphere? *Water Research* 113: 42–47.
20. Rezvanipour, H. and Z. S. Razavidinani. 2014. Chemical Analysis of Water and Soil (with Environmental and Health Vision), Isfahan Industrial Complex Jihad, Isfahan University of Technology.
21. Robertson, G., P. Groffman and E. Paul. 2007. Soil Microbiology, Biochemistry and Ecology. Springer, New York.
22. Senzia, M., D. Mashauri and A. Mayo. 2003. Suitability of constructed wetlands and waste stabilisation ponds in wastewater treatment: nitrogen transformation and removal. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 28: 1117-1124.
23. Shannon, M. A., P. W. Bohn, M. Elimelech, J. G. Georgiadis, B. J. Marinas and A. M. Mayes. 2008. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature* 452: 301-310.
24. Truong, P., G. Carlin and F. Cook. 2003. Vetiver grass hedges for water quality improvement in acid sulfate soils, Queensland, Australia. *In:* Proceedings of the 3th International Conference on Vetiver and Exhibition, Guangzhou, China.
25. U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 1999. U.S. EPA manual: Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters (EPA/625/R-99/010). Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office. *Research and Development in Medical Education* 12: 211-223.
26. Zhao, Z., J. Chang, W. Han, M. Wang, D. Ma, Y. Du, Z. Qu, S. X. Chang and Y. Ge. 2016. Effects of plant diversity and sand particle size on methane emission and nitrogen removal in microcosms of constructed wetlands. *Ecological Engineering* 95: 390-398.

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 23, No. 2, Summer 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Performance Review of Hybrid Subsurface Constructed Wetlands in Urban Wastewater Supplementary Treatment

A. Sheykhan, M. Shayannejad* and V. Arab-Nasrabadi[1]

(Received: February 25-2018 ; Accepted: June 10-2018)

Abstract

Today, the use of refined urban wastewater for agriculture is growing considerably. One of the methods for the natural treatment of wastewater is the constructed wetland. In this study, the effects of three and six days retention time on the vertical, horizontal and hybrid constructed wetland (first vertical and then horizontal) with perlite beds and Cyperus plants on the urban wastewater were investigated. In this study, horizontal wetlands were designed with 0.75 m width, 0.5 m depth and 6 m length; the vertical wetlands were designed as cylinders with a diameter of 0.7 m and the height of 1.2 m. On average, for the three days retention time, in the wetland with the vertical flow, 5the horizontal flow and the hybrid wetland, nitrate was 31.0, 36.7 and 56.3 percent, ammonium was 7.6, 32.7 and 37.8 percent, and the fecal coliform was decreased by 53.3, 93.4 and 96.9 percent, respectively. Also, during the six days retention time in the wetland with the vertical flow, the horizontal flow and the hybrid wetland, nitrate was 45.7, 58.5 and 77.5 percent, ammonium was 16.8, 75.2 and 79.4 percent, and fecal coliform was decreased by 58.0, 97.5 and 99.0 percent, respectively. Overall, the results showed that constructed wetland with perlite beds and Cyperus plants had a good function in removing pollutants, especially fecal coliform.

Keywords: Hybrid Constructed Wetland, Perlite, Cyperus, Urban Wastewater

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