

Efficacy of Hybrid Constructed Wetland in Removing Lead and Cadmium from Wastewater

Zabihollah Yousefi¹,
Ali Mashayekh Salehi²,
Reza Ali Mohamadpur Tahamtan³

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

² MSc Student in Environmental Health, Faculty of Health, Student Research Committee, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

³ Department of Biostatistics, Faculty of Health, Health Sciences Research Center, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received August 13, 2012 ; Accepted January 20, 2013)

Abstract

Background and purpose: High concentrations of heavy metals in industrial and domestic wastewater cause adverse effects on the environment and human health. Therefore, removing heavy metals from water resources is considered as a positive step towards sustainable development. Today, application of artificial wetlands to remove pollutants such as heavy metals is increasing due to high costs of construction sites, low operation, maintenance, and energy needs.

Materials and methods: This experiential research was carried out in a pilot scale in adjacent of wastewater treatment plant in the campus of Mazandaran University of Medical Sciences. The pilot was composed of four rectangular concrete reactors with $6 \times 1.5 \times 0.8$ m length, width and affective depth. One reactor was used as control. The research was performed in five phases. Different hybrid systems of the reactors (combination of vertical and horizontal with parallel and series flow) were evaluated. The samples were digested using an acid digester and concentrations of lead and cadmium were analyzed using atomic absorption spectrophotometer. The data was analyzed using SPSS.

Results: By increasing the hydraulic retention time (HRT) from 2 to 6 days, the mean percentage for removal of studied metals increased to 58 (which was 42 at the beginning). Among the different phases, phase four was more efficient which removed 54% of the heavy metals while the lowest removal percentage was detected in phase one. The average percentage removal of cell output for reed planting and the controls were 65% and 35%, respectively. These differences were statistically significant ($P \leq 0.05$).

Conclusion: The findings of this research showed that combination of DF-UF (down flow-Up flow) reactors was the best condition for the removal of lead and cadmium from subsurface wetlands. The optimal hydraulic retention time was 4 to 6 days and 10 to 20 mm gravel could be more appropriate for the size of gravel in wetland.

Keywords: Constructed wetland, hybrid system, heavy metals, wastewater

کارایی نیزار مصنوعی هیبریدی در حذف سرب و کادمیوم از پساب

ذبیح اله یوسفی^۱
علی مشایخ صالحی^۲
رضاعلی محمدپور تهمتن^۳

چکیده

سابقه و هدف: وجود فلزات سنگین در فاضلاب‌های صنعتی و خانگی با غلظت‌های بالاتر از حد مجاز موجب زیان به محیط زیست و به خطر افتادن سلامت انسان می‌گردد. بنابراین حذف فلزات سنگین از منابع آبی، گامی مثبت در جهت رسیدن به توسعه پایدار محسوب می‌شود. امروزه به علت هزینه‌های ساخت، بهره‌برداری و نگهداری پایین و نیاز به انرژی کم، استفاده از نیزارهای مصنوعی کاربردهای زیادی در حذف آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین پیدا کرده است.

مواد و روش‌ها: این تحقیق تجربی در مقیاس پیلوت پلنت و در مجاورت تصفیه خانه فاضلاب پردیس دانشگاه علوم پزشکی مازندران انجام شد. پیلوت از ۴ رآکتور مستطیل شکل بتونی تشکیل شد. ابعاد هر رآکتور $6 \times 1.5 \times 0.8$ متر (طول، عرض و عمق مؤثر) بود. یک رآکتور به عنوان رآکتور کنترل به کار رفت. تحقیقات در ۵ مرحله انجام شد. سیستم مختلفی از رآکتورها به صورت هیبرید (ترکیبی از جریان‌های عمودی سری و موازی با جهت جریان رو به پایین و روبه بالا) بررسی شد. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه هاضم اسیدی هضم شده و غلظت دو فلز سنگین سرب و کادمیوم با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی قرائت گردید. داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها: با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۲ تا ۶ روز، میانگین درصد حذف فلزات از ۴۲ به ۵۸ درصد افزایش پیدا کرده است. در میان فازهای مختلف، فاز ۴ با ۵۴ درصد حذف، برای تمامی فلزات بهترین عملکرد را داشته است. کمترین درصد حذف در فاز ۱ مشهود بود. میانگین درصد حذف در خروجی سلول با کاشت نی ۶۵ درصد و برای شاهد ۳۵ درصد بوده است. اختلاف این دو از نظر آماری نیز معنی‌دار است ($p < 0.05$).

استنتاج: یافته‌های این تحقیق نشان داد که ترکیب رآکتورها به صورت سری جریان عمودی روبه پایین (Down flow) و در ادامه جریان عمودی روبه بالا (Up flow) و زمان ماند هیدرولیکی ۴ الی ۶ روز و سائز گراول ۱۰ الی ۲۰ مناسب‌ترین وضعیت و تلندهای زیرسطحی برای حذف فلزات مورد آنالیز در فاضلاب‌های شهری و صنعتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نیزار مصنوعی، سیستم هیبرید، فلزات سنگین، فاضلاب

مقدمه

صنعتی شدن روز افزون کشورهای در حال توسعه که غلظت این فلزات در فاضلاب‌های شهری و صنعتی به نیاز بیش از پیش آن‌ها به فلزات سنگین سبب شده است به طور چشمگیری افزایش یابد (۱). وجود فلزات سنگین

E-mail: zyousefi2004@gmail.com

مؤلف مسئول: ذبیح اله یوسفی - مازندران: دانشگاه علوم پزشکی مازندران، دانشکده بهداشت

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

۲. دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

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

تاریخ دریافت: ۹۱/۵/۲۳ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۹۱/۹/۲۷ تاریخ تصویب: ۹۱/۱۱/۱

روی مکانیسم‌های موجود در نزارهای طبیعی تحقیق کردند. نتیجه این تحقیقات، ساخت نزارهای مصنوعی است که طی آن فرآیند حذف آلوده‌کننده‌ها را در فاضلاب‌ها سرعت می‌بخشد (۱۵). فلزات موجود در فاضلاب‌ها در داخل نزارها با مکانیسم‌های مختلفی چون جذب گیاهی، ته نشینی شیمیایی و فیزیکی، تبادل یون و جذب بر روی خاک و جذب بیولوژیکی توسط بیوفیلم، واکنش با ترکیبات آلی و معدنی و ... جدا می‌شوند (۱۶). به طور کلی نزارهای مصنوعی بر اساس نوع جریان فاضلاب به دو گروه اصلی با جریان سطحی و زیر سطحی تقسیم‌بندی می‌شوند. در نزارهای سطحی، جریان فاضلاب در سطح خاک حرکت کرده، در حالی که در نزارهای زیر سطحی فاضلاب از لایه‌های شن یا گراول موجود در وتلند جریان می‌یابد (۱۵). نزارهای زیر سطحی خود نیز بر اساس جریان به سه گروه (۱) با جریان افقی، (۲) عمودی و (۳) هیبریدی (تلفیقی از نوع ۱ و ۲) تقسیم می‌شوند (۱۵). نزارهای مصنوعی با جریان زیر سطحی افقی کارایی بالایی در حذف مواد آلی و معلق دارند در حالی که نوع عمودی آن اکسیژن رسانی بهتری انجام داده و سرعت تجزیه هوازی را افزایش می‌دهند (۱۷). به منظور دستیابی به میزان کارایی بالاتر نزارهای مصنوعی در حذف آلوده‌کننده‌ها، انواع مختلف آن را باهم ترکیب می‌کنند که معمول‌ترین آن ترکیب نزارهای مصنوعی با جریان زیر سطحی افقی و عمودی است که آن را تحت عنوان وتلندهای هیبریدی می‌نامند (۱۵، ۱۷، ۱۹). بازده نزارهای مصنوعی هیبریدی بیش تر از هر یک از جریان‌های عمودی و افقی است.

مواد و روش‌ها

۱-۲) آماده سازی و توصیف محل مورد آزمایش

این مطالعه تجربی با استفاده از نزار مصنوعی برای تصفیه فاضلاب مجتمع پردیس دانشگاه علوم پزشکی مازندران انجام گردید. این تحقیق در چهار حوضچه

در فاضلاب‌های صنعتی و خانگی با غلظت‌های زیاد موجب زیان به محیط زیست و به خطر افتادن سلامت انسان می‌گردد (۴-۲). فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست محیطی محسوب می‌گردند. محققان معتقدند که در حال حاضر مجموع سمیتی که در اثر فلزات سنگین به محیط زیست وارد می‌شود بیش از سمیت تمام زباله‌های آلی و مواد رادیو اکتیو است (۵، ۶). این فلزات به صورت محلول در آب و خاک وارد شده و باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیر زمینی می‌شوند و سلامت انسان‌ها و جانوران به خطر می‌افتد. بنابراین باید نسبت به حذف چنین موادی از منابع آبی هرچه سریع‌تر اقدام نمود تا گامی مثبت در جهت توسعه پایدار برداریم. در راستای رسیدن به چنین هدفی روش‌های مختلفی برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب‌ها وجود دارد که شامل الکترودیالیز، اسمز معکوس، ترسیب شیمیایی، روش‌های متداول تصفیه بیولوژیکی و ... می‌باشد. استفاده از این روش‌ها برای حذف فلزات سنگین، هزینه‌های زیاد اولیه، بهره برداری و نگهداری بالا، نیاز به تخصص و مهارت اپراتور و مصرف زیاد انرژی همراه است. لذا دانشمندان و محققان به دنبال استفاده از سیستم‌هایی با تکنولوژی پایین تر، اما کارآیی بالا بوده‌اند که وتلندهای مصنوعی پاسخی به این نیاز بوده است (۷، ۸). بنابراین جهت رفع این محدودیت‌ها، تصفیه طبیعی فاضلاب‌ها توسط وتلندهای مصنوعی زیر سطحی مورد بررسی قرار گرفت. یکی از روش‌های طبیعی در تصفیه فاضلاب‌ها با استفاده از تالاب‌ها یا نزارهای مصنوعی است (۹). امروزه به علت هزینه‌های ساخت، بهره برداری و نگهداری پایین نزارهای مصنوعی و همچنین توانایی بالای آن در حذف آلودگی‌های موجود در فاضلاب شهری و صنعتی و نیاز به انرژی کم، استفاده زیادی از آن می‌شود (۱۰-۱۳). نزارها سیستم‌های طبیعی هستند که حد واسط بین خشکی و اکوسیستم‌های آبی می‌باشند و شامل گیاهان برون‌آبی، خاک و اجتماع میکروبی است (۱۴). محققین فراوانی

در این مطالعه، ۵ نوع فاز یا جریان در مدت زمان ۶ ماه بررسی شد (هر فاز یک ماه رشد و سازگاری نی با فاضلاب مورد نظر یک ماه دیگر) که نمونه برداری در ورودی و خروجی هر یک از سلول ها انجام گرفت. هر فاز شامل ۳ نوع زمان ماند هیدرولیکی (۲، ۴، ۶ روز) بوده است.

۲-۲) نحوه جمع آوری نمونه‌ها

فاضلاب ورودی و خروجی پس از نمونه‌برداری در ظرف‌های شیشه‌ای جهت انجام آزمایشات مربوطه به آزمایشگاه تحقیقاتی بهداشت محیط دانشکده انتقال داده شده و در همان روز مورد آزمایش قرار گرفت. به علت وجود روزهای بارانی فراوان در منطقه و امکان اختلال در مقادیر واقعی فلزات سنگین سعی شد تا ۲۴ ساعت قبل و بعد از بارندگی نمونه‌برداری انجام نشود.

۲-۳) استخراج فلزات سنگین و قرائت نمونه‌ها

عملیات استخراج فلزات سنگین از نمونه‌ها به روش هضم اسیدی و بر اساس رفرنس مرجع، استاندارد متد برای آب و فاضلاب انجام شد. در این روش نمونه‌ها توسط دستگاه هاضم اسیدی (Hach, Modell: 20-23130) هضم شده و سپس جهت تعیین مقدار از دستگاه جذب اتمی (Atomic absorption) مدل "Perklin-Elmer AA100 Wellesley, MA" استفاده شد. جهت هضم اسیدی، ۲۰ میلی لیتر از هر یک از نمونه‌ها را برداشته، مقدار ۳ ml اسید سولفوریک غلیظ به آن اضافه شد. دمای دستگاه را تا حدود ۴۴۵ درجه سانتی گراد رسانیده و نمونه ترکیب شده با اسید را به مدت ۳ تا ۵ دقیقه در این دما قرار دادیم. سپس مقدار ۱۰ میلی لیتر از پراکسید هیدروژن ۵۰ درصد را آرام آرام به آن اضافه کردیم، پس از تخلیه کامل پراکسید از قیف هاضم و off دستگاه، نمونه برای قرائت آماده شد.

(یک حوضچه بدون نی به عنوان شاهد، سه حوضچه دیگر با کاشت نی به طول ۶m و عرض ۱/۵m)، صورت گرفت. فاصله کاشت نی‌ها از یکدیگر ۱۵cm و جنس حوضچه‌ها از بتن مسلح با ضخامت ۳۰cm بود که کف حوضچه و اطراف شیرهای خروجی با استفاده از ایزوگام و قیرگونی عایق شد و گراول نخودی با قطر متوسط ۱۰ mm در حوضچه‌های ۲ و ۳ و ۲۰mm در حوضچه‌های ۱ و ۴ به ارتفاع ۸۰ cm قرار داده شده بود. درصد تخلخل این نوع گراول در حدود ۵۰ درصد بوده که در نهایت حجم مفید هر حوضچه را تا حد ۵۰ درصد کاهش داد. ارتفاع مؤثر جریان فاضلاب تا ارتفاع ۶۰ cm بود. فاضلاب با استفاده از یک پمپ، از حوضچه یکنواخت سازی به حوضچه ذخیره فاضلاب ورودی با حجم ۱۶ m^۳ انتقال می‌یافت. به منظور ایجاد جریان ثقلی، فاضلاب از حوضچه ذخیره به تانک انتقال (که در ارتفاع ۳متری کار گذاشته شده بود) با حجم ۱۰۰۰ لیتر هدایت شد. جهت کنترل عمق فاضلاب در داخل حوض‌ها از شیرهای ورودی (یکی در کف و دیگری در سطح) و خروجی (دو عدد در سطح و دو عدد در کف حوضچه) که در ارتفاع مختلف در حوض تعبیه شده، استفاده شد. باز و بسته شدن هر یک از این شیرهای ورودی و خروجی با توجه به نوع فازها متفاوت بود. به منظور کنترل جریان از اتصال کوتاه، جریان فاضلاب از لوله‌ای مشبک پلی اتیلن با قطر ۵ میلی متر وارد شد و خروج آن با توجه به نوع فاز، توسط شیرهایی بوده که تا حد ممکن از ایجاد اتصال کوتاه جلوگیری شود (ایجاد اختلاط کامل). به جز فاز ۱، جریان در داخل سیستم به صورت ترکیبی از زیر سطحی افقی و عمودی (هیبرید) بوده و پس از رشد مناسب نی‌ها نمونه‌های فاضلاب از ورودی و خروجی نیزار مصنوعی هیبریدی اخذ و جهت انجام آزمایش به آزمایشگاه دانشکده بهداشت منتقل شده و آزمایشات لازم بر روی آن انجام گردید. در این تحقیق از گیاه متداول منطقه با نام Phragmitis Australis استفاده شد.

۲-۴) دیاگرام و مسیر جریان فاضلاب از میان حوضچه‌ها در فازهای مختلف

فاز ۱: در این فاز جریان فاضلاب به صورت زیر سطحی و از طریق لوله‌های مشبک موجود در لایه فوقانی زیر گراول وارد هر یک از حوضچه‌ها شده و پس از طی مسیر افقی توسط شیرهای خروجی از آن خارج شد. در این فاز حوضچه شماره ۲ به عنوان شاهد و سایر حوضچه‌ها به عنوان مورد، در نظر گرفته شدند. جریان در این مرحله به صورت هیبریدی نبوده و فاضلاب ورودی از هر یک از حوضچه‌ها به صورت افقی و ساده از آن خارج می‌شدند و نمونه‌های مرتبط با هر حوضچه از آن برداشت می‌شد. هدف از اجرای این فاز مقایسه جریان غیر هیبریدی با سایر جریان‌های هیبریدی در فازهای دیگر بود.

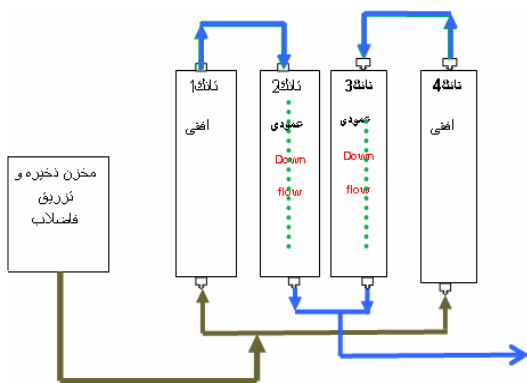
فاز ۲: حوضچه‌ها در این فاز و فازهای ۳ و ۴ و ۵ به دو گروه دوتایی تقسیم شده که جریان پس از عبور از حوضچه‌های اولیه مشابه وارد حوضچه‌های ثانویه دوتایی بعدی شده (که یکی از این حوضچه‌ها شاهد و دیگری مورد می‌باشد) و در نهایت یکی از این دو گروه به عنوان شاهد و دیگری به عنوان مورد در نظر گرفته می‌شد. در این تحقیق حوضچه شماره ۲ به عنوان شاهد (بدون کاشت نی) در نظر گرفته شد. جریان فاضلاب در این فاز پس از عبور از حوضچه‌های ۱ و ۴ (به صورت افقی) وارد حوضچه‌های ۲ و ۳ شده که جریان در این دو نیز افقی می‌باشد. تصویر شماره ۱ نمونه‌ای از جریان هیبریدی در فازهای مختلف را نشان می‌دهد.

فاز ۳: جریان در این فاز همانند فاز ۲ به صورت افقی وارد شده اما پس از عبور از حوضچه‌های اولیه به صورت عمودی و رو به بالا (Up flow) از حوضچه‌های ثانویه خارج می‌شد.

فاز ۴: در این فاز جریان فاضلاب به صورت عمودی و رو به پایین وارد حوضچه‌های ۱ و ۴ شده و سپس به صورت عمودی و رو به بالا از حوضچه‌های ۲ و ۳ عبور کرد.

فاز ۵: در این فاز جریان فاضلاب در ابتدا به صورت افقی وارد حوضچه‌های ۳ و ۴ شد و به صورت افقی نیز وارد حوضچه‌های ۱ و ۲ شده و از آن خارج گردید. تفاوت این فاز با فاز شماره ۲ در دانه‌بندی (اندازه گراول‌ها) موجود در حوضچه‌های مذکور می‌باشد. مراحل عملیاتی هر یک از فازها در جدول شماره ۱ خلاصه شده است.

مقطع جزئیات یک حوضچه از پایلوت در تصویر شماره ۲، انتقال و جابجایی و کاشت نی در حوضچه‌های نیزار و رشد نی کاشته شده در حوضچه‌های نیزار در تصاویر شماره ۳ و ۴ نمایش داده شده است. همچنین وضعیت نی کاشته شده در حوضچه‌های نیزار در فصل سرد نیز در تصویر شماره ۵ نمایش داده شده است.



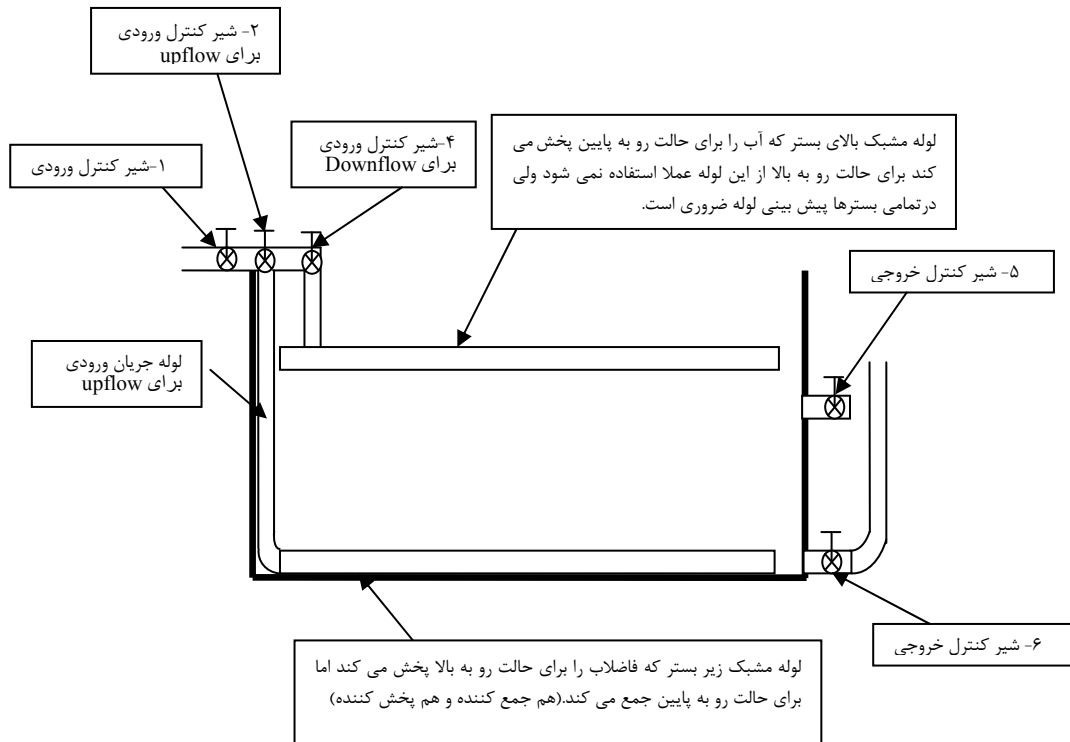
تصویر شماره ۱: شماتیک مسیر جریان فاضلاب از میان حوضچه‌ها

۲-۵) تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های به دست آمده از مقادیر ورودی و خروجی فلزات سنگین توسط نرم‌افزار SPSS و با استفاده از آزمون‌های T تست، ANOVA، رگرسیون خطی و تحلیل واریانس دو طرفه انجام شد. کارایی هر فاز با توجه به زمان ماند‌های هیدرولیکی مختلف برای سلول‌های با کاشت نی و شاهد، مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهای مورد نیاز نیز ترسیم شده است.

جدول شماره ۱: جزئیات مراحل عملیاتی تحقیق

فاز ۵ (S5)	فاز ۴ (S4)	فاز ۳ (S3)	فاز ۲ (S2)	فاز ۱ (S1)	
جریان سری افقی نخودی ۲۰	جریان سری عمودی رو به پایین نخودی ۲۰	جریان سری افقی نخودی ۲۰	جریان سری افقی گراول نخودی ۲۰	جریان موازی افقی گراول نخودی ۲۰	تانک ۱
سری افقی شاهد گراول نخودی ۱۰	سری عمودی رو به بالا شاهد، گراول نخودی ۱۰	سری عمودی رو به بالا شاهد، گراول نخودی ۱۰	جریان سری افقی شاهد، گراول نخودی ۱۰	موازی افقی شاهد گراول نخودی ۱۰	تانک ۲
سری افقی گراول نخودی ۱۰	سری عمودی رو به بالا گراول نخودی ۱۰	سری عمودی رو به بالا نخودی ۱۰	سری افقی گراول نخودی ۱۰	موازی افقی نخودی ۱۰	تانک ۳
سری افقی گراول نخودی ۲۰	سری عمودی رو به پایین گراول نخودی ۲۰	سری افقی نخودی ۲۰	سری افقی گراول نخودی ۲۰	موازی افقی نخودی ۲۰	تانک ۴
جریان هیبریدی، بررسی کارایی	جریان هیبریدی، بررسی کارایی	جریان هیبریدی، بررسی کارایی	جریان هیبریدی، بررسی کارایی	جریان غیر هیبریدی، مقایسه جریان‌ها	هدف



برای برقراری جریان up flow شیرهای کنترل ۱ و ۲ و ۵ باز و ۳ و ۴ و ۶ بسته می شود.
 برای برقراری جریان down flow شیرهای کنترل ۱ و ۴ و ۶ باز و شیرهای کنترل ۲ و ۳ و ۵ بسته می شود.
 برای برقراری جریان افقی شیرهای کنترل ۱ و ۳ و ۵ باز و شیرهای کنترل ۲ و ۴ و ۶ بسته می شود.

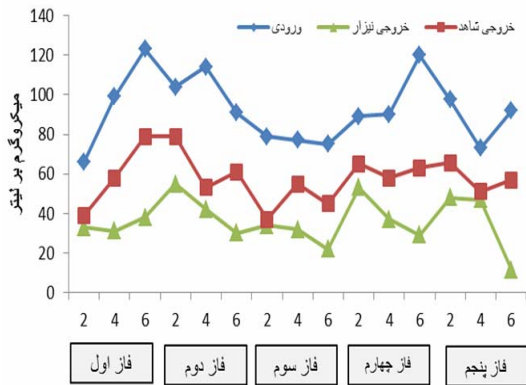
تصویر شماره ۲: مقطع جزئیات یک حوضچه از پایلوت



تصویر شماره ۴: انتقال و جابجایی و کاشت نی در حوضچه های نیزار



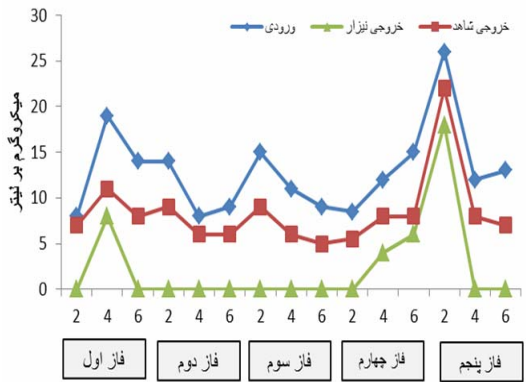
تصویر شماره ۳: رشد نی کاشته شده در حوضچه های نیزار



نمودار شماره ۱: میزان غلظت های مختلف فلز سرب در ورودی، خروجی نيزار و شاهد در فازهای مختلف



تصویر شماره ۵: وضعیت نی کاشته شده در حوضچه های نيزار در فصل سرد



نمودار شماره ۲: میزان غلظت های مختلف فلز کادمیوم در ورودی، خروجی نيزار و شاهد در فازهای مختلف

۲-۳ نقش گیاه نی در میزان حذف

همان طور که نمودار شماره ۱ میزان درصد حذف را برای گروه شاهد (بدون کاشت نی) و مورد (با کاشت نی) نشان می دهد. میانگین درصد حذف فلز سرب برای گروه شاهد در محدوده ۲۴ الی ۵۳ درصد قرار دارد و این در حالی است که درصد حذف این فلز برای گروه مورد در محدوده ۳۵/۶ الی ۷۵/۰ درصد قرار دارد که این تفاوت به حضور گیاه نی در حوضچه های مورد بر می گردد. به همین طریق میانگین درصد حذف فلز کادمیوم برای گروه شاهد در محدوده ۱۲/۵ الی ۴۶/۷ درصد قرار دارد و این در حالی است که درصد حذف این فلز برای گروه مورد برای نمونه هایی که در حد

یافته ها

۱-۳) میانگین غلظت فلزات سنگین:

همان طور که در نمودارهای شماره ۱ و ۲ نشان داد شده است میانگین غلظت خروجی هر یک از فلزات کم تر از مقادیر ورودی آن است. این مقادیر برای خروجی های سلول مورد (با کاشت نی) کم تر از خروجی های شاهد (بدون نی) بوده و ارتباط معنی داری بین آنها وجود دارد ($p < 0.05$) که نشان دهنده میزان حذف قابل ملاحظه در آن است. غلظت چهار فلز سنگین مورد نظر در پساب مجتمع دانشگاهی تقریباً متناسب با غلظت معمول آن در فاضلاب های شهری (خانگی) متوسط می باشد (۱۸). در این میان فلزات جیوه و کادمیوم دارای کمترین مقدار است. از آنجا که دستگاه جذب اتمی مورد استفاده در این تحقیق دارای حساسیت تا حد صدم میلی گرم در لیتر است لذا در برخی موارد غلظت فلزات موجود در نمونه های خروجی کمتر از دامنه تشخیص دستگاه بوده و اعداد به دست آمده خارج از محدوده دقت بود که نشان دهنده حذف فلز مورد نظر تا حد پایین تر از حد دقت دستگاه بوده است. به همین سبب در این مورد از اصطلاح غیر قابل تشخیص (n.d) استفاده شده است.



نمودار شماره ۴: کارایی حذف فلز کادمیوم در فازهای مختلف

بحث

۴-۱) نقش گیاه نی در میزان حذف

محققان در مورد حذف پارامترهای آلودگی در فاضلاب (نظیر BOD، COD، ازت، فسفر و...) با استفاده از گیاه نی (فراگمتیس استرالیس) مطالعه نموده‌اند و دریافته‌اند که گیاه نی توانایی مناسبی در حذف این پارامترها دارد (۲۱، ۲۲). مواد آلی با مکانیسم‌های متفاوتی نظیر تجزیه بیولوژیکی، فیلتراسیون، فساد، تجمع و استفاده به عنوان منبع غذایی میکروارگانیسم‌ها تجزیه می‌شوند. برخلاف مواد آلی، فلزات سنگین تجزیه بیولوژیکی نمی‌شوند. حذف فلزات در نیزارهای مصنوعی بیشتر توسط مکانیسم‌هایی نظیر جذب گیاهی، ته نشینی شیمیایی و طبیعی، تبادل یون و جذب بر روی خاک، ترکیبات آلی و معدنی و همچنین جذب توسط ریشه گیاه انجام خواهد شد (۱۶). فلزات جذب شده پس از جذب توسط ریشه و ریزوم‌های گیاه در بافت‌هایی نظیر ساقه و برگ نیز تجمع خواهد یافت (۲۳). به منظور مقایسه و نقش گیاه نی در نیزار، وجود سلول شاهد (بدون کاشت نی) ضروری است. به همین منظور در کلیه مراحل نمونه‌برداری از جریان خروجی نیزار، نمونه‌برداری از سلول شاهد نیز انجام شده است. Manyin Zhang و همکاران در مطالعه‌ای دریافته‌اند که میزان تجمع فلزات سنگین در خود بافت گیاه کمتر از رسوبات موجود در وتلد است (۲۴).

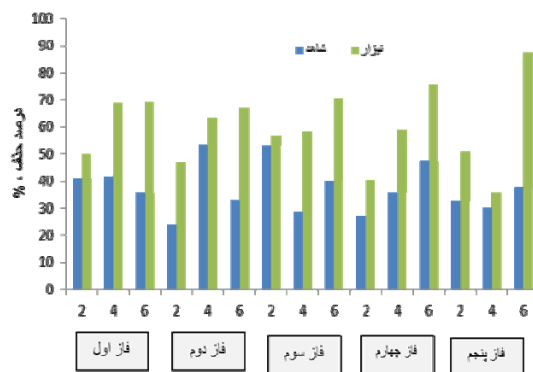
تشخیص دستگاه قرائت گردیدند در محدوده ۳۰/۷ الی ۶۶/۷ درصد قرار دارد و نمونه‌های زیادی از حد تشخیص دستگاه جذب پایین‌تر بودند که یقیناً کارایی حذف را به بیش از ۶۷ درصد می‌کشاند.

۳-۳) تأثیر زمان ماند هیدرولیکی در حذف فلزات

همان‌طور که در نمودار شماره ۳ نشان داده شده است با افزایش زمان ماند هیدرولیکی میزان درصد حذف افزایش یافته است به طوری که بیشترین میزان حذف فلز سرب در گروه مورد یا حوضچه دارای نی برای زمان ماند هیدرولیکی ۶ روز با میزان حذف ۷۵ درصد، و کمترین میزان برای زمان ماند هیدرولیکی ۲ روز با مقدار ۲۴ درصد برای حوضچه شاهد بوده است و یا برای فلز کادمیوم در نمودار شماره ۴، کمترین میزان برای زمان ماند هیدرولیکی ۲ روز با کارایی حذف ۳۰/۷ درصد و بیشترین کارایی حذف کادمیوم در زمان ماندهای هیدرولیکی ۴ و ۶ روزه و در محدوده ۶۶/۷ درصد می‌باشد.

۳-۴) اثر نوع فاز بر درصد حذف

با توجه به نمودارها بیشترین درصد میانگین حذف فلزات کادمیوم و سرب در فاز ۴ به ترتیب با میزان حذف ۶۶ و ۶۷ درصد و کمترین مقدار برای فاز ۱ با مقدار تقریبی ۴۵ و ۵۱ درصد بوده است (نمودار شماره ۵).



نمودار شماره ۳: کارایی حذف فلز سرب در فازهای مختلف

اما Maine و همکاران در تحقیقی عنوان کردند که بافت گیاهی درصد حذف بهتری نسبت به رسوبات وتلند داشته است (۲۵). نمودارهای ۱ تا ۴ و تحلیل آماری نشان داده است ارتباط معنی داری بین وجود گیاه نی و درصد حذف وجود داشته است ($p < 0.05$) به طوری که وجود گیاه نی باعث حذف بیشتر و چشم گیر فلزات شده است. این بدان معنی است که در نمونه های گرفته شده از خروجی سلول های با کاشت نی درصد حذف، بسیار بیشتر از نمونه های حاصل از سلول های بدون کاشت نی است.

اگرچه میانگین درصد حذف برای فلزات مختلف در نمونه های شاهد و مورد قابل ملاحظه بوده و در نمونه های خروجی از سلول های مورد نسبت به شاهد، درصد حذف هر یک از فلزات بیشتر بود، اما ارتباط معنی داری بین میانگین های حذف فلزات وجود نداشته است.

۴-۲) تأثیر زمان ماند هیدرولیکی در حذف فلزات

به طور کلی با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۲ تا ۶ روز، درصد حذف فلزات نیز افزایش یافته است. Asheesh Kumar و همکاران در تحقیقی برای حذف فلزات کروم و نیکل با استفاده از وتلند مصنوعی عنوان کردند که با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۱۲ به ۲۴ ساعت، میزان درصد حذف نیز افزایش پیدا کرده است (۲۶). با افزایش زمان ماند هیدرولیکی میزان دبی جریان ورودی و خروجی کمتر خواهد بود و از این رو گیاه فرصت بیشتری برای حذف خواهد داشت. این افزایش در زمان ماند هیدرولیکی برای سلول شاهد نیز مؤثر بوده احتمالاً مکانیسم هایی نظیر فیلتراسیون و جذب سطحی بیولوژیکی نقش داشته اند. در تحقیق حاضر میزان درصد حذف فلزات با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از نظر آماری معنی دار می باشد. میزان حذف انواع فلزات با توجه به زمان ماند هیدرولیکی برای سلول های شاهد و مورد نیز قابل توجه است به

طوری که با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۲ به ۶ روز میزان حذف نیز افزایش یافته است اما ارتباط معنی داری بین حذف انواع فلزات در گروه های شاهد و مورد وجود نداشته است. این بدان معنی است که گروه های شاهد و مورد فلزات را بدون توجه به نوع شان حذف کرده و هیچ تفاوت معنی داری برای حذف آن در نظر نگرفته است و در واقع نقش بیوفیلیم در حذف فلزات بیش از نقش گیاه نی می باشد. از آن جایی که در گروه شاهد دو حوضچه وجود داشته که یکی از آنها با کاشت نی و دیگری گراول به تنهایی است لذا این عدم وجود ارتباط معنی دار می تواند به علت وجود یک سلول با کاشت نی در قبل از سلول بدون کاشت نی باشد (برای گروه شاهد). میانگین درصد حذف تمامی فلزات (بدون توجه به نوع فلز) در گروه شاهد و مورد معنی دار بوده و اختلاف چشمگیری بین آنها وجود دارد. این بدان معنی است که با افزایش زمان ماند هیدرولیکی، سلول مورد با اختلاف بیشتری توانسته است فلزات را حذف کرده و نسبت به سلول شاهد با فرصت بیشتر کارایی بهتری داشته است.

۴-۳) اثر نوع فاز بر درصد حذف

هدف اصلی این تحقیق، بررسی کارایی حذف فلزات در فازهای مختلف بوده است. نحوه حرکت جریان فاضلاب در توده وتلند می تواند در میزان درصد حذف مؤثر باشد. با توجه به داده ها و آنالیز به دست آمده از این تحقیق، بیشترین و کم ترین درصد حذف فلزات به ترتیب برای فاز ۴ و فاز ۱ می باشد. مسیر انتقال جریان فاضلاب در فاز ۴ برای هر ۴ سلول به صورت عمودی بوده است در حالی که در سایر فازها حداقل یک جریان با مسیر افقی وجود داشته است. ایجاد مسیر جریان عمودی (چه به صورت روبه بالا یا روبه پایین) سبب پخش کامل فاضلاب در تمامی نقاط حوضچه خواهد شد، از این رو گیاه بهتر می تواند در تماس با فلزات قرار گیرد. از طرفی پخش کامل فاضلاب سبب فیلتراسیون بهتر شده، احتمال

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد در فاز ۲ و ۵ شباهت‌های زیادی از نظر مسیر جریان وجود داشته است به طوری که جریان در هر دو فاز و در هر چهار حوضچه به صورت افقی بوده است اما در فاز ۲ جریان پس از عبور از حوضچه‌های ۱ و ۴ با اندازه گراول ۲۰ میلی‌متر وارد سلول‌های ۲ و ۳ شده که اندازه گراول در آن ۱۰ میلی‌متر است. در فاز ۵ یکی از جریان‌های خروجی از سلول‌های با اندازه ۲۰ میلی‌متر خارج شده و دیگری از حوضچه‌هایی با اندازه گراول ۱۰ میلی‌متر خارج می‌شود که به عنوان شاهد در نظر گرفته شده است. پس تفاوت این دو در اندازه گراول‌ها و تأثیر آن بر میزان حذف باشد. اما از نظر آماری تفاوت‌ها معنی‌دار نبوده است ($p = 0/537$).

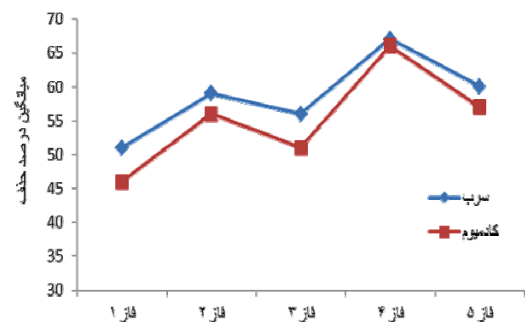
۴-۴ رفتار فلزات مختلف با توجه به میزان حذف

نمودارهای شماره ۶ روند تغییرات و میانگین درصد حذف هر یک از فلزات را در فازها و زمان ماند‌های هیدرولیکی مختلف برای گروه‌های شاهد و مورد نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودارها پیداست میانگین درصد حذف هر فلز در حوضچه‌های با کاشت‌نی بیشتر از نمونه‌های شاهد می‌باشد. سایر تفاسیر حاصل از این نمودار پیشتر به صورت جز به جز آورده شده است و هدف از ارائه آن نگاه اجمالی است.

در پایان می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از وتلند مصنوعی روشی کم‌هزینه و مؤثر در حذف انواع آلوده‌کننده‌های فاضلاب می‌باشد. در این تحقیق مقادیر فلزات سنگین خروجی تمامی نمونه‌ها کمتر از مقادیر ورودی بوده است. در گروه شاهد نیز غلظت فلزات در خروجی کمتر از ورودی بوده است و از نظر آماری ارتباط معنی‌داری بین این دو وجود داشته است. جریان هیبریدی (فازهای ۲ تا ۵) به طور کلی درصد حذف بهتری نسبت به جریان غیر هیبریدی (فاز ۱) داشته است. یافته‌های این تحقیق نشان داد که ترکیب رآکتورها به صورت سری جریان عمودی روبه پایین

جذب سطحی افزایش خواهد یافت و در حد امکان از ایجاد پدیده میانبر (short cut) جلوگیری خواهد شد. مسیر جریان در فاز ۱ به صورت غیر هیبریدی بوده و جریان پس از عبور ساده و افقی از هر سلول و بدون انتقال سری و ارتباط با سایر سلول‌ها از آن خارج می‌شود. دلیل کاهش درصد حذف در فاز ۱ نسبت به فازهای دیگر می‌تواند به علت عدم وجود جریان هیبریدی باشد. داده‌های به دست آمده از جریان خروجی از سلول شاهد در فاز ۱ فقط با عبور از یک سلول با اندازه گراول ۱۰ میلی‌متر به دست آمده است در حالی که در سایر فازها جریان پس از عبور از یک سلول با اندازه گراول ۲۰ میلی‌متر وارد سلول دیگری (با یا بدون کاشت‌نی) خواهد شد و سپس از آن خارج خواهد شد. بنابراین احتمال در تماس قرارگیری فاضلاب با گراول‌ها و ریشه‌های نی در فازهای ۲ تا ۵ بسیار بیشتر از فاز ۱ است و در نتیجه همان‌طور که از نمودار شماره ۳ نمایان است درصد حذف بیشتری وجود خواهد داشت. پس از فاز ۴، بیشترین درصد حذف مربوط به فاز ۵ می‌باشد که علی‌رغم نبود جریان عمودی در آن حذف مناسبی داشته است.

این درصد حذف مناسب می‌تواند به علت زمان اجرای این فاز در فصل رویش گیاه (بهار) باشد. درصد حذف فلزات مختلف در فازهای مختلف نیز از نظر آماری معنی‌دار بوده است به طوری که فلز سرب و کادمیوم در در فاز ۴ بیشترین درصد حذف و در فاز ۱ کمترین درصد را داشته است (نمودار شماره ۵).



نمودار شماره ۵: تأثیر فازها بر کارایی حذف فلز سنگین

پیشنهادات

۱- تحقیق حاضر برای تمامی فازها از پاییز ۱۳۹۰ تا بهار ۱۳۹۱ به طور پیوسته انجام شده است که در آن پارامتر دمای محیط نیز بر میزان حذف و اثر فازهای مختلف نسبت به فازهای قبلی و روند رشد و نمو گیاه تأثیر گذار بوده است. اگرچه تعیین میزان تأثیر دقیق آن به علت فازهای مختلف، امکان پذیر نبوده است. به عنوان مثال فاز ۳ در فصل زمستان و فاز ۵ در فصل بهار انجام شده است که شرایط محیطی می تواند بر درصد حذف مؤثر بوده است. بررسی فازهای مختلف در شرایط محیطی یکسان به عنوان یک گزینه انتخابی برای سایر تحقیقات می باشد.

۲- به منظور بررسی بهتر کارایی و تلند هیبریدی در فازهای مختلف می توان غلظت فلزات سنگین را به صورت دستی افزایش داد.

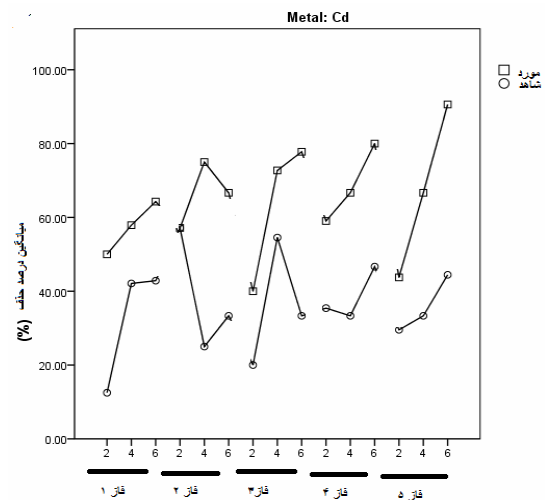
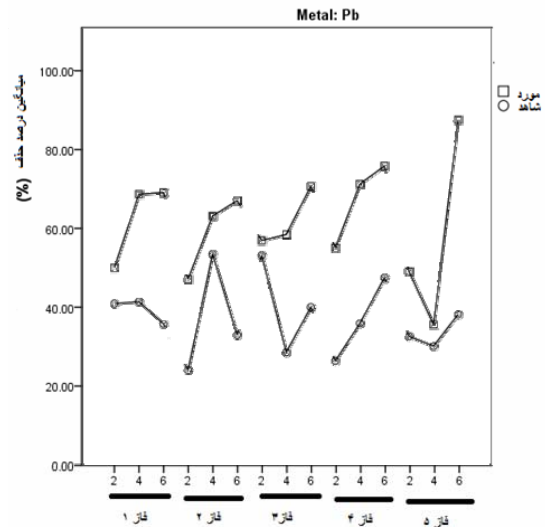
به منظور بررسی دقیق عملکرد گیاه و سیستم می توان غلظت فلزات را در بافت و رسوبات و تلند اندازه گیری کرده و به نقش مؤثر هر یک پی برد.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی مازندران انجام گردید که بدین وسیله نویسندگان تشکر خود را ابراز می دارند. همچنین از همکاری گروه شیمی دارویی دانشکده داروسازی دانشگاه در قرائت نمونه ها توسط دستگاه جذب اتمی تشکر و قدردانی می شود. این مقاله حاصل از طرح مصوب دانشگاه و پروژه دوره کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط می باشد.

References

1. Cheng S, Grosse W, Karrenbrock F, Thoennessen M. Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals. Ecological Engineering



نمودار شماره ۶: روند تغییرات و میانگین درصد حذف هر یک از فلزات را در فازها و زمان ماندهای مختلف برای گروه های شاهد و مورد

(Down flow) و در ادامه جریان عمودی روبه بالا (Up flow) و زمان ماند هیدرولیکی ۴ الی ۶ روز و سائز گراول ۱۰ الی ۲۰ مناسب ترین وضعیت و تلندهای زیرسطحی برای حذف فلزات مورد آنالیز در فاضلابهای شهری و صنعتی می باشد.

- Proceeding of the 9th National congress on Environmental Health on 7-9 Nov 2006, Esfahan, Iran, p143, 1-4.
3. Üstün GE. Occurrence and removal of metals in urban wastewater treatment plants. *J Hazard Mater* 2009; 172(2): 833-838.
 4. Chanpiwat P, Sthiannopkao S, Kim K-W. Metal content variation in wastewater and biosludge from Bangkok's central wastewater treatment plants. *Microchemical Journal* 2010; 95(2): 326-332.
 5. Khoramabadi SH, Jamshidi A. Removal of mercury from polluted wastewater by zigenmaphanicum. 10th congress of environmental health. 2007.
 6. Yeh TY, Chou CC, Pan CT. Heavy metal removal within pilot-scale constructed wetlands receiving river water contaminated by confined swine operations. *Desalination* 2009; 249(1): 368-373.
 7. Yousefi Z, Mohseni-Bandpei A. Nitrogen and phosphorus removal from wastewater by subsurface wetlands planted with *Iris pseudacorus*. *Ecological Engineering* 2010; 36(6): 777-782.
 8. 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, Iranian. *J Mazan Univ Med Sci* 2001; 11(31): 7-15.
 9. Manshouri M, Vosoghi M. Removal of heavy metal by constructed. *Wetland*. 10th congress of environmental health; 2006: 254-256.
 10. Lim PE, Tay MG, Mak KY, Mohamed N. The effect of heavy metals on nitrogen and oxygen demand removal in constructed wetlands. *Sci Total Environ* 2003; 301(1-3): 13-21.
 11. Saeed T, Sun G. Enhanced denitrification and organics removal in hybrid wetland columns: Comparative experiments. *Bioresource Technology* 2001; 102(2): 967-974.
 12. Ye F, Li Y. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. *Ecological Engineering* 2009; 35(7): 1043-1050.
 13. Obarska-Pempkowiak H, Klimkowska K. distribution of nutrients and heavy metals in a constructed wetland system. *Pergamon Chemosphere* 1999; 39(2): 303-312.
 14. Vymazal J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 2005; 25(5): 478-490.
 15. Abidi S, Kallali H, Jedidi N, Bouzaiane O. Comparative pilot study of the performances of two constructed wetland wastewater treatment hybrid systems. *Desalination* 2009; 248(1-2): 49-56.
 16. Manios T, Stentiford EI, Millner P. Removal of heavy metals from a metaliferous water solution by *Typha latifolia* plants and sewage sludge compost. *Chemosphere* 2003; 53(5): 487-94.
 17. Masi F, Martinuzzi N. Constructed wetlands for the Mediterranean countries: hybrid systems for water reuse and sustainable sanitation. *Desalination* 2007; 215(1-3): 44-55.
 18. Serrano L, Varga Ddl, Ruiz I, Soto M. Winery wastewater treatment in a hybrid constructed wetland. *Ecological Engineering* 2011; 37(5): 744-753.
 19. 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. *Ecological Engineering* 2008; 34(1): 23-29.

20. Galletti A, Verlicchi P, Ranieri E. Removal and accumulation of Cu, Ni and Zn in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Contribution of vegetation and filling medium. *Sci Total Environ* 2010; 408(21): 5097-5105.
21. Yalcuk A, Pakdil NB, Turan SY. Performance evaluation on the treatment of olive mill waste water in vertical subsurface flow constructed wetlands. *Desalination* 2010; 262(1-3): 209-214.
22. Dunne EJ, Culletonb N, O'Donovanc G, Harringtond R, Daly K. Phosphorus retention and sorption by constructed wetland soils in Southeast Ireland. *Water Res* 2005; 39(18): 4355-4362.
23. Bragato C, Schiavon M, Polese R, Ertani A, Pittarello M, Malagoli M. Seasonal variations of Cu, Zn, Ni and Cr concentration in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex steudel in a constructed wetland of North Italy. *Desalination* 2009; 246(1-3): 35-44.
24. Zhanga M, Cui L, Shenga L, Wang Y. Distribution and enrichment of heavy metals among sediments, water body and plants in Hengshuihu Wetland of Northern China. *Ecological Engineering* 2009; 35(4): 563-569.
25. Maine MA, ne NS, Hadad H, Nchez GS, Bonetto C. Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland. *Journal of Environmental Management* 2009; 90(1): 355-63.
26. Yadava AK, Kumarb N, Sreekrishnanc TR, Satyad S, Bishnoi NR. Removal of chromium and nickel from aqueous solution in constructed wetland: Mass balance, adsorption-desorption and FTIR study. *Chemical Engineering Journal* 2010; 160(1): 122-128.