

بررسی کارایی تالاب‌های مصنوعی زیرسطحی هیبریدی در کاهش بار آلی پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری با استفاده از گیاهان آبزی مختلف

امیر حق‌شناس آدرمنابادی^{۱*}، منوچهر حیدرپور^۱ و صالح ترکش اصفهانی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۲/۶)

چکیده

در این مقاله، کارایی چهار واحد تالاب هیبریدی افقی-عمودی زیرسطحی که به منظور حذف مواد آلی و تصفیه تکمیلی پساب خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان احداث شدند، مورد بررسی قرار گرفت. در این تالاب‌ها، سه گیاه مختلف نی معمولی، لویی و نی بزرگ کشت شد و یک تالاب نیز به عنوان شاهد (بدون کشت) در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از ۱۲ ماه نمونه‌برداری از خروجی تالاب‌های طرح نشان داد که نوع پوشش گیاهی از نظر آماری اثر معنی‌داری را بر حذف مواد آلی در تالاب‌های مصنوعی ندارد، هرچند که مقدار حذف مواد آلی در تالاب‌های دارای پوشش گیاهی بیشتر از تالاب شاهد بود. همچنین، راندمان حذف COD در تالاب‌های مختلف طرح بین ۷۷ تا ۸۳ درصد و مقدار حذف BOD_۵ بین ۸۴ تا ۸۶ درصد بود. نتایج این طرح نشان داد که مقدار حذف مواد آلی به مقدار تجزیه‌پذیری آنها بستگی دارد. ضرایب مدل مرتبه اول براساس غلظت‌های ورودی و خروجی واسنجی شدند (۳۵ متر بر سال برای BOD_۵ و ۳۳/۱ متر سال برای COD) تا برای طرح‌های اصلی استفاده شوند. غلظت مواد آلی در خروجی تالاب‌های طرح به زیر استانداردهای مصارف مختلف رسید، که این امر تناسب این فناوری برای شرایط کشور را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تالاب مصنوعی، پوشش گیاهی، بازیافت پساب، BOD_۵، COD

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی haghshenasamir@yahoo.com

مقدمه

تا چند دهه قبل، پساب‌های تولیدشده در بخش‌های مختلف شهری، صنعتی و کشاورزی به‌عنوان یکی از مخاطرات مهم بهداشتی و زیست محیطی در جوامع مختلف تلقی می‌شدند. اما امروزه، افزایش روزافزون جمعیت و نیاز غذایی بشر و فشار بیش‌ازحد به منابع آب شیرین و پاک سبب شده تا به پساب‌ها به‌عنوان یکی از منابع آب نامتعارف و جدید نگریده شده و تلاش‌ها برای بازیافت و استفاده مجدد از آنها در مصارف مختلف رو به افزایش باشد. این امر در مناطق خشک و نیمه‌خشکی مانند کشور ایران که با تغییرات اقلیمی و کمبود بارش مواجه هستند ضروری‌تر به‌نظر می‌رسد.

نکته مهمی که باید در بازیافت و استفاده مجدد از پساب‌ها مورد توجه قرار گیرد تصفیه مناسب آنها قبل از مصرف است تا خطرات بهداشتی و زیست محیطی مصرف آنها به حداقل رسیده و در آینده خود به معضل جدیدی بدل نشوند. متأسفانه در کشورهای درحال توسعه که با کمبود شدید منابع آب و مواد غذایی مواجه هستند، استانداردهای مصارف پساب کمتر رعایت شده و سخت‌گیری کمتری برای مصرف‌کنندگان پساب‌ها، به‌ویژه در بخش کشاورزی، اعمال می‌گردد که این امر ممکن است در آینده نه‌چندان دور سبب بروز مشکلات بهداشتی و زیست محیطی گردد.

تالاب‌های مصنوعی (Constructed Wetlands) یکی از فناوری‌های نسبتاً جدید برای تصفیه تکمیلی پساب‌ها است که کاربرد آنها در کشورهای پیشرفته و کشورهای درحال توسعه رو به افزایش است. تالاب‌های مصنوعی تنها برای تصفیه تکمیلی پساب‌های خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌کار نمی‌روند. بلکه این فناوری برای تصفیه انواع پساب‌های شهری و خانگی اولیه و ثانویه، پساب‌های صنعتی، پساب‌های کشاورزی، پساب‌های ناشی از لندفیل‌ها و رواناب‌های شهری و جاده‌ای نیز مورد استفاده قرار گرفته است (۲۲).

تالاب‌های مصنوعی به دو گروه عمده تالاب‌های با جریان سطحی (Free Surface Constructed Wetlands) و تالاب‌های

با جریان زیرسطحی (Subsurface Constructed Wetlands) تقسیم می‌گردند (۱۲). تالاب‌های زیرسطحی، خود براساس جهت غالب جریان در بستر، به دو نوع تالاب‌های زیرسطحی افقی (Horizontal Flow Constructed Wetlands) و تالاب‌های زیرسطحی عمودی (Vertical Flow Constructed Wetlands) تقسیم‌بندی می‌شوند. تالاب‌های سطحی به‌دلیل دارا بودن هزینه اندک و ارزش زیاد برای حیات وحش، بیشتر به‌منظور تصفیه‌های تکمیلی یا زلال‌سازی نهایی پساب‌ها مورد استفاده هستند. درحالی‌که تالاب‌های زیرسطحی به‌دلیل فیلترینگ بیشتر و کمتر بودن مشکلاتی مانند بو و تجمع حشرات و در معرض نبودن پساب با محیط، امروزه بیشتر مورد اقبال قرار گرفته‌اند (۱۳).

از دهه ۱۹۹۰، گونه جدیدی از تالاب‌های مصنوعی که ترکیبی از چند تالاب مصنوعی مختلف است بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این تالاب‌ها که با نام تالاب‌های "ترکیبی" یا "هیبریدی" شناخته می‌شوند، ممکن است از ترکیب چند تالاب سطحی و زیرسطحی و یا چند تالاب زیرسطحی عمودی و افقی تشکیل شده باشند (۱۷) و به این ترتیب می‌توان از مزایای انواع مختلف تالاب‌های مصنوعی بهره برد (۱۴).

یکی از ویژگی‌های تالاب‌های مصنوعی، وابستگی کارایی آنها به شرایط اقلیمی و آب و هوایی منطقه است، به همین منظور و برای کاهش هزینه‌های طرح لازم است قبل از اجرای طرح‌های بزرگ، ابتدا با استفاده از طرح‌های پایلوت، کارایی تالاب برای هر منطقه سنجیده شده و در واقع این فناوری برای شرایط موجود هر منطقه "بومی‌سازی" شود. یکی از مواردی که در بومی‌سازی تالاب‌های مصنوعی مورد توجه است شناسایی گیاهان رایج در منطقه است که با شرایط همیشه اشباع تالاب سازگار بوده و بتوانند به‌عنوان پوشش گیاهی در این تالاب‌ها مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از گیاهان بومی مزایایی از قبیل آسانی دسترسی، کاهش هزینه‌های طرح، رشد سریع و همچنین عدم برهم‌خوردگی اکوسیستم و پوشش گیاهی منطقه خواهد شد (۹). نی معمولی یا استرالیایی (*Phragmites australis*)

در دنیا برای تصفیه تکمیلی پساب‌های شهری مورد استفاده قرار گرفته است تالاب‌های ترکیبی افقی - عمودی است (۲۱).

هدف از مطالعه حاضر، بررسی کارایی تالاب‌های زیرسطحی هیبریدی در حذف تکمیلی مواد آلی از پساب‌های خروجی از تصفیه‌خانه‌های معمول فاضلاب کشور است. همچنین سعی خواهد شد تا اثر پوشش‌های گیاهی مختلف، که سازگار با شرایط اقلیمی خشک ایران باشند، بر راندمان این تالاب‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد تا گیاهان مناسب برای کشت در این تالاب‌ها شناسایی شوند. همچنین ضرایب مدل‌های مورد استفاده در طراحی تالاب‌ها واسنجی شده است.

مواد و روش‌ها

محل اجرای طرح

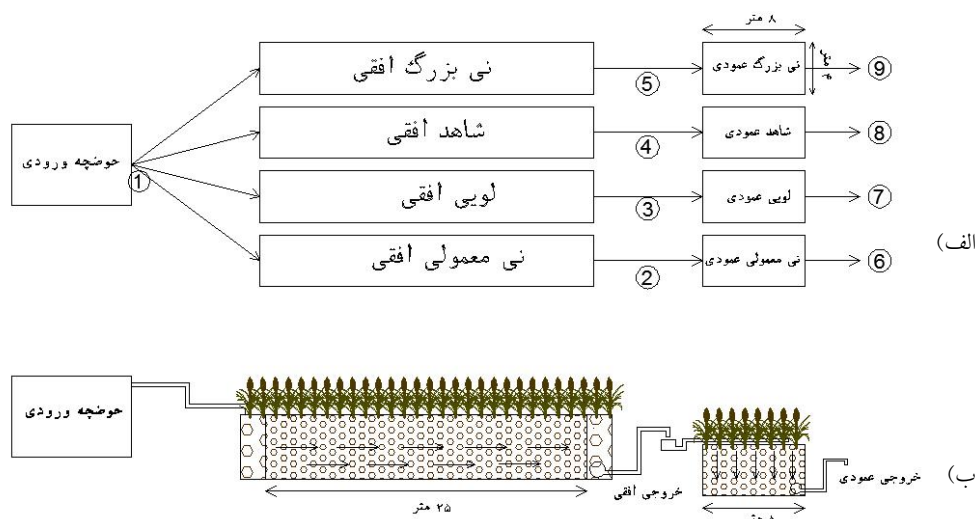
به منظور بومی‌سازی فناوری تالاب مصنوعی زیرسطحی جهت تصفیه تکمیلی پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان، در سال ۱۳۹۳ چهار واحد تالاب زیرسطحی هیبریدی در نزدیکی کانال خروجی این تصفیه‌خانه احداث گردید. تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان در دو فاز و برای تصفیه پساب جمعیتی معادل ۱۲۰۰۰۰۰ نفر طراحی شده است که هم‌اکنون فاز اول آن راه‌اندازی شده و پساب تولیدی ۷۰۰۰۰۰ نفر توسط این تصفیه‌خانه تصفیه می‌گردد. روش به‌کار گرفته شده در این تصفیه‌خانه، روش لجن فعال به‌همراه ضدعفونی نمودن با استفاده از تزریق کلر می‌باشد. دبی خروجی از این تصفیه بیش از ۱۴۶ هزار مترمکعب بر روز می‌باشد.

هر واحد تالاب مصنوعی ساخته شده متشکل از یک واحد تالاب زیرسطحی افقی به ابعاد ۴×۲۵ متر (۱۰۰ مترمربع) و یک واحد تالاب زیرسطحی عمودی به ابعاد ۴×۸ متر (۳۲ مترمربع) بود. عمق متوسط تالاب‌های افقی حدود ۱ متر و عمق تالاب‌های عمودی ۱/۲ متر در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از اتلاف آب بر اثر نشت و همچنین جلوگیری از نفوذ پساب به درون سفره‌های زیرزمینی، تمامی ۸ تالاب افقی و عمودی طرح با استفاده از ورق‌های ژئوممبران عایق‌بندی شدند. شیب

پرکاربردترین گیاه در میان گیاهان آبی است که در تالاب‌های مصنوعی زیرسطحی مورد استفاده است و پس از آن نیز گیاه لویی (*Typha latifolia*) قرار دارد (۲۰). گیاه نی بزرگ (*Arundo donax*) نیز از جمله گیاهانی است که اخیراً در تالاب‌های مصنوعی در نقاط مختلف دنیا مورد آزمایش قرار گرفته است تا کارایی آن در این تالاب‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد (۸-۱۰). هر سه این گیاهان از جمله گیاهانی است که در منطقه اقلیمی اصفهان و در اطراف رودخانه زاینده‌رود یافت می‌شوند (۹).

آلاینده‌های آلی موادی هستند که در پساب‌های شهری و خانگی و برخی پساب‌های صنعتی مانند کارخانجات دباغی و تولید شیر و صنایع غذایی به‌وفور یافت می‌شوند (۷). روند غالب حذف آلاینده‌های آلی درون تالاب‌های مصنوعی زیرسطحی را می‌توان در فیلتراسیون و ترسیب و تجزیه هوازی و بی‌هوازی این مواد خلاصه نمود (۲۳). البته به دلیل بارگذاری زیاد مواد آلی در تالاب‌های زیرسطحی افقی، روند بی‌هوازی غالب تر بوده و مناطق مساعد برای واکنش‌های هوازی محدود به لایه نازک سطحی تالاب و مناطق کوچک اطراف ریشه‌ها و ریزوم‌های پوشش گیاهی خواهد بود. مواد آلی موجود در پساب‌ها را می‌توان به دو گروه مواد تجزیه‌پذیر مانند کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و پروتئین‌ها و مواد تجزیه‌ناپذیر مانند لیگنین و همی سلولزها طبقه‌بندی نمود. میزان مواد تجزیه‌پذیر پساب را که به‌سرعت توسط بخش بیولوژیک تالاب مورد تصفیه قرار می‌گیرد، با پارامتر BOD_5 و مقدار کل مواد آلی موجود در پساب را با پارامتر COD مشخص می‌نمایند.

در کشورهای درحال توسعه خروجی تصفیه‌خانه‌های بزرگ و متمرکز فاضلاب معمولاً استاندارد مصارف گوناگون مانند کشاورزی و صنعتی را دارا نیست. به همین منظور، نیاز است تا با استفاده از فناوری‌های جدید و کم‌هزینه، این خروجی‌ها مورد تصفیه تکمیلی قرار گرفته تا غلظت آلاینده‌ها در آنها به استانداردهای مدنظر آیین‌نامه‌های زیست محیطی برای استفاده در مصارف مختلف برسد. یکی از روش‌هایی که به‌طور وسیع



شکل ۱. الف) پلان و ب) سطح مقطع تالاب‌های هیبریدی ساخته شده در تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان.

نقاط ۱ تا ۹ نقاط نمونه برداری می‌باشند

سبب یکنواختی عرضی ورود جریان پساب به بستر متخلخل تالاب می‌شدند. پس از ورود پساب به درون تالاب افقی، جریان در راستای افق بستر تالاب را طی نموده و در انتهای تالاب با استفاده از یک لوله زهکش عرضی که در کف تالاب قرار داده شده بود، پساب تصفیه شده جمع‌آوری و توسط یک سیفون U شکل به بیرون تالاب انتقال داده می‌شد (شکل ۱).

پساب خروجی از تالاب‌های افقی با استفاده از یک لوله مستقیم به تالاب‌های عمودی منتقل شده و با استفاده از دو لوله سوراخ‌دار که در سطح این تالاب‌ها تعبیه شده بود به آرامی روی سطح تالاب پخش شده تا جریان به صورت تقریباً یکنواخت شروع به نفوذ عمودی درون بستر این تالاب‌ها نماید. پس از عبور عمودی پساب از درون بستر متخلخل، با استفاده از یک لوله زهکش، پساب تصفیه شده در کف تالاب جمع‌آوری شده و توسط یک سیفون U شکل به بیرون تالاب انتقال داده می‌شد.

بر طبق برنامه نمونه‌برداری، در هر ماه یک نمونه از پساب ورودی به تالاب‌ها و هشت نمونه از خروجی تالاب‌های افقی و عمودی برداشت شد. پس از اتمام هر نمونه‌برداری، نمونه‌ها بلافاصله در مجاورت یخ قرار داده شده و در کمتر از یک ساعت به آزمایشگاه آلودگی محیط زیست دانشکده منابع طبیعی

کف تالاب به سمت خروجی برابر 0.2 متر بر متر تنظیم گردید. به منظور مقایسه اثر گیاهان مختلف بر راندمان تالاب هیبریدی در کاهش آلاینده‌های آلی، سه نوع گیاه تالابی نی معمولی یا استرالیایی (*Phragmites australis*)، نی بزرگ (*Arundo donax*) و لویی (*Typha latifolia*) که سازگار با شرایط اقلیمی اصفهان بوده و در نقاط مختلف قابل دسترسی بودند از حاشیه رودخانه زاینده‌رود و دره نی اصفهان جمع‌آوری شده و به محل تالاب‌ها انتقال داده شدند. هر گیاه به طور تصادفی با تراکم ۲ تا ۳ گیاه در هر مترمربع در یکی از واحدهای تالاب هیبریدی کشت شده و یک تالاب نیز به عنوان تالاب شاهد بدون کشت رها شد. پساب جاری در کانال تصفیه‌خانه توسط سیستم پمپاژ به استخر ذخیره سازی و متعادل سازی پساب در مجاورت طرح منتقل شده و سپس با استفاده از یک پمپ کف کش، پساب از درون استخر با دبی ثابت به درون حوضچه ورودی طرح پمپاژ می‌شد. پساب ورودی به حوضچه از طریق چهار سرریز روزنه‌ای به قطر $1/5$ سانتی‌متر به درون تالاب‌های افقی تزریق می‌گشت. در ابتدای ورودی تالاب‌های افقی، در منطقه‌ای به طول 0.5 متر، از قلوه‌سنگ بسیار درشت (قطر متوسط 60 میلی‌متر) استفاده شد. این قلوه سنگ‌های درشت با نفوذپذیری بسیار بالا نسبت به بستر تالاب،



شکل ۲. نمایی از تالاب‌های ساخته شده در تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان

ایجاد طرح‌های پایلوت واسنجی ضرایب مدل‌های کیفی در شرایط واقعی بهره‌برداری به منظور تخمین سطح لازم برای طرح‌های تالاب‌های مصنوعی در مقیاس اصلی است (۲۴). برای واسنجی این مدل‌ها نیاز است تا با داده‌های اندازه‌گیری شده در طرح، ثابت‌های معادلات واسنجی شوند تا برای طرح‌های اصلی با شرایط مشابه قابل توصیه باشند. برای آنالیز آماری نتایج به دست آمده از نرم‌افزار آماری SPSS ۱۹ استفاده شد. از آزمون تجزیه واریانس یا ANOVA برای تعیین اختلافات معنی‌دار بین تیمارها استفاده شده و برای تعیین اختلاف بین دو تیمار نیز آزمون توکی به کار گرفته شد. مقایسات آماری در سطح معنی‌دار ۵٪ انجام گرفت.

نتایج

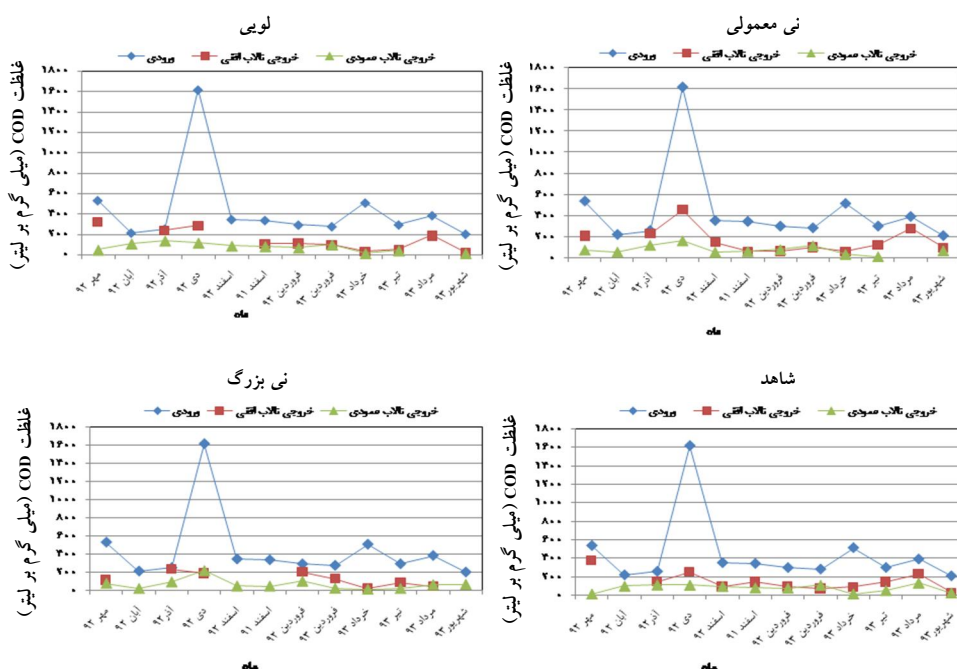
اندازه‌گیری دبی در ماه‌های مختلف نشان داد که مقدار دبی ورودی به تالاب‌ها بین ۵ مترمکعب بر روز در بهمن ۱۳۹۲ تا ۹ مترمکعب بر روز در مرداد ۱۳۹۳ متغیر بوده است. به‌طور متوسط، دبی ورودی به تالاب‌ها در کل طول دوره بهره‌برداری را می‌توان ۷ مترمکعب بر روز در نظر گرفت. براساس آزمایش‌های دانه‌بندی انجام گرفته روی تالاب که تخلخل بستر تالاب را ۴۰ درصد نشان داد و با توجه به سطح و عمق تالاب‌های افقی، می‌توان بیان نمود که بار هیدرولیکی ورودی به تالاب‌های افقی و عمودی به ترتیب ۷ و ۲۱ سانتی‌متر بر روز

دانشگاه صنعتی اصفهان منتقل شده و آنالیزهای کیفی در همان روز روی نمونه‌ها انجام می‌گرفت. به‌منظور مشاهده روند تغییرات کارایی تالاب در طول زمان و فصول مختلف، دوره نمونه‌برداری ۱۲ ماه در نظر گرفته شد. دبی ورودی به هر تالاب نیز در طول ۱۲ ماه به صورت هر دو یا سه روز یکبار با استفاده از پایش سطح آب پشت روزنه و همچنین با استفاده از ظرف مدرج و زمان‌سنج اندازه‌گیری و ثبت گردید. نمایی از پایلوت ساخته شده در شکل (۲) نمایش داده شده است.

مدل سینتیک مرتبه اول رایج‌ترین و ساده‌ترین مدل برای طراحی و تعیین مساحت مورد نیاز تالاب‌های زیرسطحی افقی است. یکی از اشکال این مدل توسط ویمازال به نقل از کیکاس به شرح زیر ارائه شده است (۱۸):

$$A_s = \frac{Q * \ln\left[\frac{C_{in}}{C_{out}}\right]}{K_{BOD}} \quad [1]$$

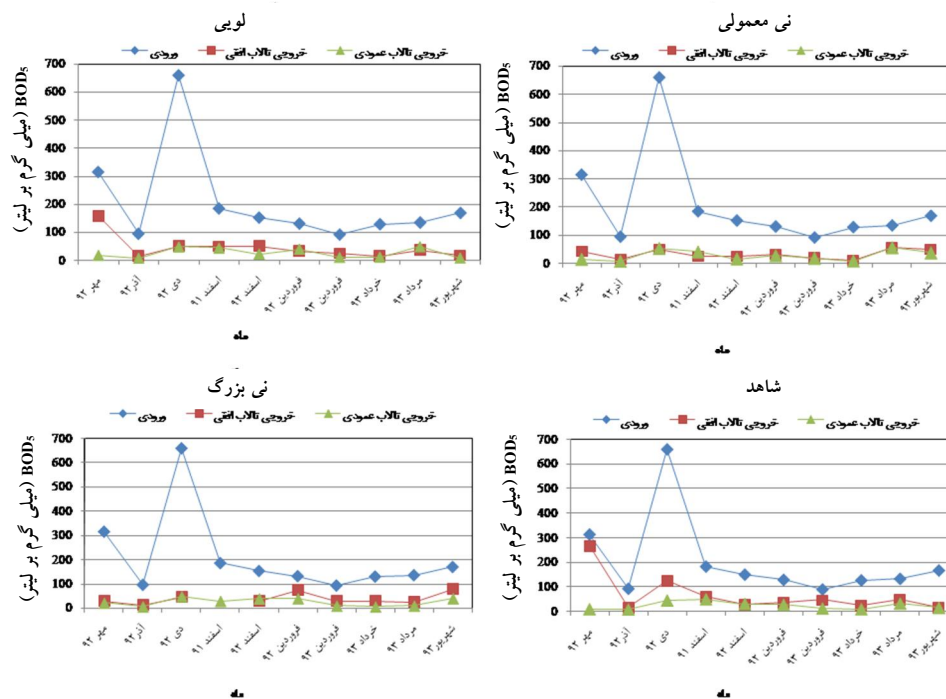
که در آن A_s سطح تالاب (مترمربع) و K_{BOD} ثابت معادله برحسب متر بر روز یا متر بر سال است. براساس نظر ویمازال (۱۹) مقدار ثابت K_{BOD} به نرخ بار هیدرولیک و نرخ بار جرمی آلاینده ورودی به تالاب وابسته بوده و با افزایش این پارامترها افزایش خواهد یافت. استفاده از ضریب مرتبه اول سبب خواهد شد تا اثرات تغییرات دبی و زمان ماند برای مقایسه شرایط مختلف حذف گردیده و امکان مقایسه کارایی تالاب‌های مختلف با یکدیگر فراهم گردد. همچنین یکی از اهداف اصلی



شکل ۳. مقایسه غلظت‌های COD اندازه‌گیری شده در ورودی و خروجی تالاب‌های طرح

می‌باشد. بیشترین غلظت COD در خروجی تالاب نی معمولی افقی در دی ماه ۱۳۹۲ و برابر ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین غلظت در خرداد ماه ۱۳۹۳ و برابر ۵۸ میلی‌گرم بر لیتر ثبت شد. در خروجی تالاب زیر سطحی افقی کشت شده با گیاه لویی، غلظت COD بین ۳۱۹ میلی‌گرم بر لیتر در مهر ماه ۱۳۹۲ تا ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر در شهریور ماه ۱۳۹۳ نوسان داشته و به‌طور متوسط غلظت COD خروجی از این تالاب 105 ± 144 میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد. نوسانات غلظت COD در خروجی تالاب افقی نی بزرگ بین ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر (خرداد ۱۳۹۳) تا ۲۳۹ میلی‌گرم بر لیتر (آذر ۱۳۹۲) بوده و متوسط غلظت COD در خروجی این تالاب 77 ± 130 میلی‌گرم بر لیتر ثبت گردید. متوسط غلظت خروجی در تالاب افقی شاهد بیشتر از تالاب‌های نی بزرگ و لویی و کمتر از تالاب نی معمولی بود. در این تالاب، متوسط غلظت COD در خروجی تالاب 99 ± 151 میلی‌گرم بر لیتر و بازه تغییرات بین ۲۷ میلی‌گرم بر لیتر در شهریور ماه ۱۳۹۳ تا ۳۷۳ میلی‌گرم بر لیتر در مهر ماه ۱۳۹۲ مشاهده شد. با ورود پساب به درون تالاب‌های عمودی، غلظت COD

می‌باشد. همچنین زمان ماند تئوری هر واحد تالاب هیبریدی حدود ۸ روز محاسبه گردید. نتایج حاصل از آنالیز پارامتر COD نمونه‌های اخذ شده از محل طرح در شکل (۳) نشان داده شده است. مقدار غلظت COD در ورودی تالاب بین ۲۰۴ میلی‌گرم بر لیتر (شهریور ماه ۱۳۹۳) تا ۱۶۱۷ میلی‌گرم بر لیتر در دی ماه ۱۳۹۲ تغییر نشان داد. البته چنین غلظت بالایی تنها در یک ماه مشاهده شد و در ۱۱ ماه دیگر سال غلظت COD همواره کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. با صرف‌نظر از غلظت COD در دی ماه ۱۳۹۲، به‌طور متوسط غلظت ورودی به تالاب‌های طرح در کل دوره ۱۲ ماهه 185 ± 332 میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. بر این اساس و با توجه به متوسط دبی ورودی به تالاب‌ها در کل دوره بهره‌برداری مقدار بار COD ورودی به تالاب‌های افقی طرح حدود ۳۱ گرم بر روز بر مترمربع و برای تالاب‌های هیبریدی ۲۴ گرم بر روز بر مترمربع به‌دست می‌آید. اندازه‌گیری غلظت COD در خروجی تالاب نی معمولی افقی نشان داد که متوسط غلظت خروجی 120 ± 160 میلی‌گرم بر لیتر



شکل ۴. مقایسه غلظت‌های BOD_5 اندازه‌گیری شده در ورودی و خروجی تالاب‌های طرح

بر اساس اختلاف غلظت‌های ورودی و خروجی به تالاب‌ها محاسبه گردید. راندمان تالاب‌های افقی طرح برای تالاب‌های نی معمولی $61 \pm 23\%$ ، تالاب لویی $65 \pm 26\%$ ، تالاب نی بزرگ $64 \pm 31\%$ و تالاب شاهد $63 \pm 19\%$ اندازه‌گیری شد. پس از عبور پساب از درون تالاب‌های عمودی طرح، مطابق انتظار، مقدار راندمان تالاب در حذف COD افزایش داشته و برای تالاب نی معمولی به‌طور متوسط به $79 \pm 14\%$ ، تالاب لویی به $77 \pm 17\%$ ، تالاب نی بزرگ به $83 \pm 11\%$ و تالاب شاهد به $77 \pm 15\%$ رسید. بر این اساس، راندمان حذف COD در تالاب‌های عمودی طرح برای تالاب نی معمولی $36 \pm 42\%$ ، تالاب لویی عمودی $36 \pm 42\%$ و تالاب شاهد $40 \pm 27\%$ ، تالاب نی بزرگ عمودی $36 \pm 43\%$ و تالاب‌های $36 \pm 42\%$ ثبت شد. بنابراین، مشاهده می‌گردد که تالاب‌های عمودی اثر مثبتی بر عملکرد تالاب‌ها در حذف COD داشته و راندمان کاهش این آلاینده در تالاب‌ها را افزایش داده است.

مقادیر اندازه‌گیری شده BOD_5 در ورودی و خروجی تالاب‌های مختلف طرح در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، مقدار غلظت ورودی BOD_5

پساب خروجی کاهش بیشتری را نشان داد. باید متذکر شد که غلظت COD در خروجی تالاب عمودی نمایانگر تأثیر هر دو تالاب افقی و عمودی و در واقع نشانگر عملکرد واحد هیبریدی تالاب‌ها خواهد بود. متوسط غلظت خروجی COD از تالاب عمودی نی معمولی 43 ± 72 میلی‌گرم بر لیتر، تالاب لویی عمودی 41 ± 74 میلی‌گرم بر لیتر، تالاب عمودی نی بزرگ 67 ± 56 میلی‌گرم بر لیتر و در تالاب شاهد عمودی 75 ± 40 میلی‌گرم بر لیتر بوده است. بیشترین غلظت ثبت شده COD در تالاب‌های عمودی نی معمولی، لویی، نی بزرگ و شاهد به ترتیب 161 میلی‌گرم بر لیتر (دی ماه ۱۳۹۲)، 139 میلی‌گرم بر لیتر (آذر ماه ۱۳۹۲)، 220 میلی‌گرم بر لیتر (دی ماه ۱۳۹۲) و 131 میلی‌گرم بر لیتر (مرداد ماه ۱۳۹۳) و کمترین غلظت اندازه‌گیری شده COD در این تالاب‌ها نیز به ترتیب 7 میلی‌گرم بر لیتر (تیر ماه ۱۳۹۳)، 13 میلی‌گرم بر لیتر (خرداد ماه ۱۳۹۳)، 13 میلی‌گرم بر لیتر (خرداد ماه ۱۳۹۳) و 12 میلی‌گرم بر لیتر (مهر ماه ۱۳۹۲) گزارش شد.

بر این اساس، راندمان تالاب‌های مختلف در حذف COD

راندمان تالاب‌های افقی طرح براساس اختلاف غلظت‌های ورودی و خروجی BOD_5 در هر ماه محاسبه شد. بر این اساس، متوسط راندمان حذف BOD_5 برای تالاب‌های افقی نی معمولی $81 \pm 1.0\%$ ، تالاب افقی لویی $77 \pm 1.3\%$ ، تالاب نی بزرگ افقی $74 \pm 1.1\%$ و تالاب شاهد افقی $68 \pm 2.2\%$ تعیین گردید. محاسبه راندمان در تالاب‌های عمودی طرح نشان داد که این تالاب‌ها اثر مثبتی بر راندمان کلی طرح در حذف آلاینده BOD_5 داشته، اما این تأثیر به‌ویژه در مورد تالاب‌های دارای پوشش گیاهی، معنی‌دار نیست. راندمان حذف BOD_5 در تالاب‌های عمودی طرح برای تالاب‌های نی معمولی $84 \pm 1.1\%$ ، تالاب لویی $86 \pm 1.1\%$ ، تالاب نی بزرگ عمودی $28 \pm 3.9\%$ ، تالاب نی بزرگ عمودی $38 \pm 3.6\%$ و تالاب شاهد عمودی $43 \pm 3.1\%$ محاسبه گردید.

مقایسه غلظت BOD_5 در خروجی تالاب‌های عمودی با غلظت‌های ورودی به تالاب‌ها نشان داد که متوسط راندمان هر واحد تالاب هیبریدی افقی-عمودی در حذف BOD_5 برای گیاه نی معمولی $84 \pm 1.1\%$ ، گیاه لویی $86 \pm 1.1\%$ ، گیاه نی بزرگ $86 \pm 9\%$ و تالاب شاهد $86 \pm 8\%$ بوده است. بنابراین تالاب عمودی شاهد بیشترین تأثیر را در افزایش راندمان حذف BOD_5 در میان تالاب‌های عمودی دارا بوده است.

بحث

برای مقایسات آماری نتایج به‌دست آمده از تالاب‌های مصنوعی، از نرم‌افزار SPSS 19 استفاده شد. مقایسات آماری نشان داد که غلظت COD خروجی از تالاب‌های افقی طرح با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند. همچنین، غلظت‌های COD خروجی از تالاب‌های عمودی نیز تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند. از اینرو، می‌توان نتیجه گرفت که وجود پوشش گیاهی و همین‌طور نوع پوشش گیاهی در حذف COD در تالاب‌های مصنوعی اثر معنی‌داری نداشتند. دلیل این امر را می‌توان در فرآیندهای حذف مواد آلی در تالاب‌های مصنوعی جستجو نمود. همان‌گونه که بیان گردید، فرآیندهای غالب حذف مواد آلی درون محیط تالاب‌های مصنوعی شامل فیلتراسیون، ترسیب

بین ۹۲ میلی‌گرم بر لیتر در فروردین ماه ۱۳۹۳ تا ۶۶۰ میلی‌گرم بر لیتر در دی ماه ۱۳۹۲ متغیر بود. متوسط غلظت BOD_5 ورودی به تالاب‌ها در طول ۱۲ ماه دوره بهره‌برداری 206 ± 171 میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد. به این ترتیب، مقدار بار آلاینده BOD_5 ورودی به تالاب‌های افقی طرح ۱۵ گرم بر روز بر مترمربع و بار ورودی به تالاب‌های هیبریدی ۱۱ گرم بر روز بر مترمربع اندازه‌گیری شد.

در خروجی تالاب نی معمولی افقی، مقدار غلظت BOD_5 در کل دوره نمونه‌برداری بین ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در خرداد ماه ۱۳۹۳ تا ۵۷ میلی‌گرم بر لیتر در مرداد ماه ۱۳۹۳ متغیر بود. این تغییرات برای تالاب لویی افقی بین ۱۴ تا ۱۶۰ میلی‌گرم بر لیتر (آذر ۱۳۹۲ - مهر ۱۳۹۲)، برای تالاب نی بزرگ افقی بین ۱۳ تا ۷۹ میلی‌گرم بر لیتر (آذر ۱۳۹۲ - شهریور ۱۳۹۳) و برای تالاب شاهد افقی بین ۱۷ تا ۲۶۷ میلی‌گرم بر لیتر (شهریور ۱۳۹۳ - مهر ۱۳۹۲) ثبت گردید. بر این اساس، متوسط غلظت خروجی BOD_5 برای تالاب‌های افقی نی معمولی، لویی، نی بزرگ و شاهد به ترتیب 32 ± 16 ، 45 ± 42 ، 39 ± 22 و 68 ± 77 میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد.

با عبور پساب از درون تالاب‌های عمودی، بر اثر افزایش فیلتراسیون و زمان ماند و فعل و انفعالات بیولوژیک، آلاینده‌های آلی بیشتری از پساب تصفیه شده و به این ترتیب غلظت BOD_5 در خروجی تالاب‌های عمودی کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. متوسط غلظت خروجی BOD_5 از تالاب عمودی نی عمودی 27 ± 17 میلی‌گرم بر لیتر، تالاب لویی 25 ± 17 میلی‌گرم بر لیتر، تالاب نی بزرگ 25 ± 16 میلی‌گرم بر لیتر و تالاب شاهد 24 ± 15 میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. بیشترین غلظت BOD_5 در خروجی تالاب‌های عمودی نی معمولی، لویی، نی بزرگ و شاهد به ترتیب ۵۵ (مرداد ۱۳۹۳)، ۴۹ (مرداد ۱۳۹۳)، ۴۸ (دی ۱۳۹۲) و ۵۱ (اسفند ۱۳۹۲) میلی‌گرم بر لیتر و کمترین غلظت‌ها نیز برای این تالاب‌ها به ترتیب ۸ (آذر ۱۳۹۲ - خرداد ۱۳۹۳)، ۷ (آذر ۱۳۹۲)، ۶ (آذر ۱۳۹۲ و خرداد ۱۳۹۳) و ۸ (آذر ۱۳۹۲) میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد.

در مورد غلظت‌های BOD_5 چنین تفاوتی مشاهده نمی‌گردد. این امر نشان می‌دهد که با ورود به ماه‌های گرم سال سیستم ریشه‌ای و بافت‌های زیرزمینی توسعه بیشتری یافته و این امر سبب افزایش فیلتراسیون و ترسیب مواد معلق می‌گردد و به این ترتیب مقدار حذف مواد آلی افزایش نیز خواهد یافت. در مقابل، حذف BOD_5 بیشتر وابسته به فعالیت میکروارگانیسم‌های تالاب خواهد بود. چون تالاب‌های طرح از نوع زیرسطحی بوده و در این تالاب‌ها تبادل گرمایی بستر تالاب و اتمسفر حداقل بوده و شرایط بیشتر از نوع بی‌هوایی است افزایش سیستم ریشه‌ای پوشش گیاهی اثر معنی‌داری را بر افزایش فعالیت این باکتری‌ها نداشته و به این ترتیب می‌توان بیان نمود که اثرات سیستم ریشه‌ای بیشتر بر افزایش ترسیب و فیلتراسیون است تا بر افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های تالاب‌ها.

یکی از پارامترهایی که مقدار تجزیه‌پذیری مواد آلی درون پساب را نشان می‌دهد نسبت BOD_5 به COD موجود در پساب است. هرچه این نسبت در پساب بیشتر باشد نشانگر این است که مقدار مواد تجزیه‌پذیر درون پساب بیشتر بوده و تجزیه بیولوژیک نقش بیشتری را در حذف مواد آلی درون پساب برعهده خواهد داشت (۱۱). حداکثر مقدار این نسبت یک خواهد بود. محاسبات نشان داد که مقدار این نسبت در پساب ورودی به‌طور متوسط $0/47$ بوده که با عبور از تالاب‌های افقی طرح به $0/3$ رسیده است. این کاهش نشانگر تجزیه مواد آلی درون تالاب افقی می‌باشد. همین امر سبب می‌گردد تا راندمان حذف BOD_5 در تالاب‌های عمودی نسبت به تالاب‌های افقی کمتر باشد. رابطه میان نسبت BOD_5 به COD ورودی نسبت به غلظت خروجی BOD_5 از تالاب‌های هیبریدی مختلف طرح در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل نیز مشاهده می‌گردد، با افزایش نسبت BOD_5 به COD در پساب ورودی مقدار غلظت BOD_5 در خروجی تالاب افزایش می‌یابد. بیشترین غلظت خروجی BOD_5 در نسبت‌های $0/35$ تا $0/45$ مشاهده شد و با افزایش این نسبت به مقادیر بالاتر از $0/55$ ، مجدداً غلظت BOD_5 در خروجی کاهش یافته است. دلیل این

درون محیط متخلخل و تجزیه‌پذیری و بی‌هوایی می‌باشند. چون غالب مواد آلی موجود در پساب‌های شهری از نوع مواد معلق هستند روند فیلتراسیون و ترسیب نقش مهم‌تری را در حذف مواد آلی برعهده خواهند داشت. وجود سیستم زیرزمینی پوشش گیاهی سبب کاهش بیشتر سرعت جریان درون بستر متخلخل شده و میزان ترسیب مواد آلی را افزایش خواهد داد. نتایج حاصل از تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که هرچند وجود پوشش گیاهی سبب افزایش حذف COD از درون پساب درون تالاب‌های طبیعی می‌گردد اما این تأثیر از نظر آماری یک اثر معنی‌دار نخواهد بود و همچنین شکل اندام‌های زیرزمینی و مقدار نفوذ ریشه در حذف COD اثر معنی‌داری را نداشت.

نتایج آنالیز آماری در مورد پارامتر BOD_5 نیز نشان داد که مقدار غلظت خروجی از تالاب‌های افقی و عمودی و در نتیجه در مقیاس تالاب‌های هیبریدی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. پارامتر BOD_5 نشانگر مواد آلی تجزیه‌پذیر در تالاب بوده و نشانگر فعالیت باکتری‌های هوایی و بی‌هوایی در تالاب هستند. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که محیط هوایی در تالاب‌های مصنوعی زیرسطحی محدود به یک لایه نازک در نزدیکی سطح تالاب و یک قشر نازک در اطراف ریشه‌های گیاهی خواهد بود (۱۸). بنابراین تجزیه هوایی نقش مهمی را در کاهش مواد آلی نخواهد داشت. همین امر سبب خواهد شد تا مقدار کاهش BOD_5 در تالاب‌های مصنوعی زیرسطحی دارای پوشش گیاهی و تالاب شاهد و همچنین بین تالاب‌های دارای پوشش گیاهی تفاوت معنی‌داری ایجاد نگردد. معنی‌دار نبودن تفاوت‌ها در مقایسات بین درصد حذف BOD_5 بین تالاب‌ها نیز مشاهده گردید.

یکی دیگر از تفاوت‌های مشاهده شده از نظر کارایی تفاوت عملکرد تالاب‌ها در فصول گرم و سرد سال است. در صورتی که شش ماه مهر تا اسفند را فصل سرد و شش ماه فروردین تا شهریور را فصل گرم سال در نظر بگیریم، مقایسات آماری نشان داد که بین غلظت‌های COD در ماه‌های سرد و ماه‌های گرم سال تفاوت معنی‌دار مشاهده می‌گردد. در حالی که

امر شاید این باشد که با افزایش مواد آلی تجزیه پذیر، محیط برای رشد و تغذیه میکروارگانیزمها بیشتر فراهم شده و با توسعه آنها مقدار مواد آلی بیشتری مورد مصرف قرار گرفته و غلظت این مواد در خروجی تالاب کاهش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مقدار حذف مواد آلی در تالاب های مصنوعی به ماهیت این مواد و مقدار تجزیه پذیری آنها وابسته است. این نتایج با مشاهدات سعید و همکاران (۱۵) و ویمازال و کراپفلوا (۲۳) مطابقت بالایی دارد. مورد دیگری که باید در مورد کارایی تالاب ها به آن توجه نمود مقدار زمان ماند تالاب است. به دلیل تفاوت در اندازه تالاب های افقی و عمودی، مقدار زمان ماند در تالاب های افقی حدود ۵/۱ روز و در تالاب های عمودی حدود ۲/۹ روز محاسبه گردید. همین امر سبب تفاوت معنی دار کارایی بین دو تالاب افقی و عمودی در حذف مواد آلی شده است. مقدار راندمان تالاب افقی در حذف مواد آلی حدود دو برابر تالاب های عمودی بوده است. چون اکثر فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی حذف آلاینده های آلی در تالاب ها وابسته به زمان هستند، با افزایش زمان ماند، فرصت بیشتری برای انجام این فرآیندها فراهم شده و به این ترتیب مقدار حذف آلاینده ها نیز افزایش خواهد داشت. بنابراین در صورت نیاز به حذف مقدار بیشتر آلاینده ها، می توان از طریق افزایش اندازه تالاب و یا کاهش دبی ورودی، زمان ماند تالاب را افزایش داد. همان گونه که قبلاً نیز بیان گردید مواد آلی درون پساب ها را می توان به دو گروه تجزیه پذیر و تجزیه ناپذیر تقسیم بندی نمود. مواد تجزیه پذیر با ورود به تالاب افقی اول با زمان ماند بالاتر از درون پساب حذف می شوند و به این ترتیب مواد آلی که به تالاب عمودی خواهند رسید بیشتر از نوع مقاوم هستند که برای حذف آنها نیاز به زمان طولانی خواهد بود. مشاهدات این تحقیق نشان داد که با افزایش مقدار غلظت BOD_5 در خروجی تالاب های افقی، راندمان حذف آن در تالاب عمودی نیز افزایش خواهد داشت. به همین دلیل تالاب شاهد که در قسمت

افقی کارایی کمتری از دیگر تالاب ها در حذف BOD_5 داشته در قسمت عمودی راندمان بالاتری را نشان داده است.

به منظور ارزیابی نتایج حاصله در این طرح، سعی شد تا این نتایج با نتایج به دست آمده با طرح های مشابه در دیگر نقاط دنیا مورد مقایسه قرار گیرد. هرچند که کارایی تالاب مصنوعی به عوامل گوناگونی مانند شرایط آب و هوایی، نوع پساب، بار آلاینده ورودی، ابعاد تالاب و زمان ماند آن، نوع تالاب ها و ترتیب قرارگیری آنها و عوامل مختلف دیگر وابسته است اما مقایسه نتایج حاصل از شرایط مختلف کارکرد تالاب ها می تواند در یافتن شرایط بهینه راهگشا باشد. در یکی از جدیدترین پژوهش ها، توسکانو و همکاران (۱۶) مقدار حذف COD در تالاب های زیرسطحی افقی کشت شده با نی معمولی و نی بزرگ در ایتالیا را به ترتیب ۶۳٪ و ۵۹٪ گزارش نمودند که با کارایی تالاب های افقی طرح مطابقت کامل دارد. همچنین کارایی تالاب شاهد در این تحقیق ۵۳٪ بوده که در مقایسه با تالاب افقی شاهد طرح کارایی کمتری را دارا بوده است. کمتر بودن کارایی تالاب های پژوهش توسکانو و همکاران (۱۶) را می توان در بار ورودی بیشتر (۴۰ گرم بر روز بر مترمربع) نسبت به طرح حاضر جستجو نمود. نتایج تحقیق بلمونت و همکاران (۶) در یک تالاب افقی - عمودی در مکزیک نیز مقدار حذف COD را بین ۷۷٪ تا ۸۰٪ نشان داد. در این تالاب ها از گیاه لویی و گل های زینتی به عنوان پوشش گیاهی استفاده شده بود که تفاوت معنی داری بین راندمان گیاهان مختلف مشاهده نشد که هر دو این نتایج با نتایج حاصله در این طرح مطابقت بالایی دارد.

مطالعات عبیدی و همکاران (۴) نشان داد که ترتیب قرارگیری تالاب های هیبریدی افقی و عمودی تفاوت معنی داری را در حذف COD و BOD_5 نشان نداده است. در این مطالعات، متوسط راندمان حذف BOD_5 از تالاب های افقی کشت شده با نی معمولی شصت و شش درصد ثبت شد که در مقایسه با تالاب افقی نی معمولی طرح کمتر است. اما راندمان حذف

جدول ۱. مقایسه ضرایب مدل مرتبه اول BOD₅ محاسبه شده برای تالاب‌های طرح

تالاب	مقدار متوسط ضریب مدل کنتیک مرتبه اول BOD ₅ (متر بر سال)		
	تالاب‌های افقی	تالاب‌های عمودی	تالاب‌های هیبریدی
نی معمولی	36/2 ± 15/4	4/7 ± 14/2	32/2 ± 16/2
لویی	27/2 ± 8	14/7 ± 21/1	32/7 ± 15/2
نی بزرگ	23/2 ± 10/9	15/7 ± 19/8	35 ± 14
شاهد	20/4 ± 9/68	16/5 ± 16/9	31/2 ± 10

شد (۱۲). با بررسی این تالاب که متشکل از دو تالاب عمودی و یک تالاب افقی بود، مشاهده شد که دبی ورودی به این تالاب ۷/۳ مترمکعب بر روز بوده اما سطح کلی این تالاب‌ها ۴۳۲ مترمربع در نظر گرفته شده بود که این امر سبب شده بود تا بار ورودی به این سیستم یک‌چهارم طرح حاضر گردد.

محاسبه ضریب مدل مرتبه اول

مقدار ضریب مدل کنتیک مرتبه اول براساس دبی ورودی به سیستم و غلظت‌های ورودی و خروجی ثبت شده BOD₅ و COD در هر ماه محاسبه شده و نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه گردید (جدول ۱). برای آلاینده BOD₅ مقدار متوسط ضریب مدل کنتیک مرتبه اول براساس دبی ورودی به هر تالاب و غلظت‌های ورودی و خروجی در ماه‌های مختلف محاسبه گردیده و نتایج در قالب جدول (۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در مقیاس تالاب افقی مقدار ضریب در تالاب نی معمولی بالاتر از دیگر تالاب‌های طرح بوده است. مقایسات آماری نشان داد که مقدار ضریب مدل مرتبه اول در تالاب افقی نی معمولی در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار با تالاب شاهد دارد. همچنین در صورت استفاده از آزمون LSD برای مقایسه میانگین‌ها، مقدار متوسط ضریب در تالاب نی معمولی با تالاب‌های لویی و نی بومی نیز اختلاف معنی‌دار خواهند داشت.

عکس روند فوق در مورد تالاب‌های عمودی مشاهده می‌گردد. به این ترتیب که مقدار ضریب مدل برای تالاب شاهد بالاترین مقدار و برای تالاب نی معمولی کمترین مقدار را دارا

COD تالاب افقی حدود پنجاه و هشت درصد بود که بسیار به راندمان تالاب طرح نزدیک می‌باشد. همچنین در این تحقیق، مقدار راندمان حذف COD و BOD₅ در تالاب عمودی کشت شده با لویی به ترتیب بیست و پنج درصد و پنجاه درصد بوده که به ترتیب کمتر و بیشتر از تالاب عمودی لویی طرح بوده است. مقدار حذف COD و BOD₅ در تالاب هیبریدی متشکل از یک تالاب عمودی، یک تالاب افقی و یک تالاب سطحی در اسپانیا به ترتیب ۸۵ و ۹۴ درصد گزارش شد (۵). بار ورودی به این تالاب‌ها ۹ گرم BOD₅ بر مترمربع بر روز بوده که کمتر از بار ورودی به تالاب‌های طرح بوده و با توجه به سطح تالاب‌های مذکور که بیش از ۶ برابر تالاب‌های طرح حاضر بوده و بیشتر بودن زمان ماند، بالاتر بودن راندمان این تالاب‌ها را می‌توان توجیه نمود.

کامینو و همکاران (۷) مقدار حداکثر حذف COD و BOD₅ در یک تالاب هیبریدی عمودی-افقی در ایتالیا که با گیاه نی معمولی کشت شده بود را ۸۰٪ گزارش نمودند که کمتر از حداکثر راندمان‌های دست‌یافته در این طرح است. بیشترین راندمان حذف COD و BOD₅ در تالاب هیبریدی نی معمولی این طرح به ترتیب ۹۸٪ (تیر ماه ۱۳۹۳) و ۹۶٪ (مهر ماه ۱۳۹۲) اندازه‌گیری شد. در تحقیق ویمازال و کراپفلوا (۱۹) مقدار متوسط حذف COD و BOD₅ در یک تالاب هیبریدی سه قسمتی عمودی-عمودی-افقی کشت شده با نی معمولی به ترتیب ۸۴/۴ و ۹۴/۵ ذکر شده که اندکی بیشتر از متوسط درصد حذف این آلاینده‌ها در طرح حاضر می‌باشد. مقدار حذف BOD₅ در یک تالاب هیبریدی در استونی ۹۱٪ گزارش

جدول ۲. مقایسه ضرایب مدل مرتبه اول COD محاسبه شده برای تالاب های طرح

تالاب	مقدار متوسط ضریب مدل کنتیک مرتبه اول COD (متر بر سال)		
	تالاب های افقی	تالاب های عمودی	تالاب های هیبریدی
نی معمولی	۲۴ ± ۱۲/۴	۶۶/۳ ± ۷۴/۴	۳۳/۱ ± ۲۰/۷
لوبی	۲۸/۵ ± ۱۶/۵	۵۰ ± ۴۴/۲	۲۹/۵ ± ۱۶/۹
نی بزرگ	۳۱/۷ ± ۲۳/۱	۵۱ ± ۶۱	۳۲/۷ ± ۱۴/۳
شاهد	۲۷/۵ ± ۱۳	۵۹/۳ ± ۷۴/۴	۲۹/۲ ± ۱۸/۵

تالاب های افقی یا عمودی هستند. آنالیز آماری ضرایب محاسبه شده نشان داد که در سطح ۵ درصد هیچ اختلاف معنی داری بین تالاب های افقی، تالاب های عمودی و تالاب های هیبریدی مشاهده نشد.

مقدار ضریب مدل کنتیک مرتبه اول BOD_v برای تالاب هیبریدی عمودی- عمودی- افقی در استونی ۲۰/۱ متر بر سال به دست آمده است (۱۴) که در مقایسه با ضریب تالاب هیبریدی نی معمولی طرح کمتر بوده است. همچنین در این مطالعه بین ضرایب محاسبه شده در فصول گرم و سرد سال تفاوت معنی داری مشاهده نشد که این امر با نتایج حاصله در این طرح مطابقت دارد. زوریتا و همکاران (۲۴) مقدار ضریب مدل مرتبه اول برای پارامترهای BOD_۵ و COD را برای یک تالاب هیبریدی زیرسطحی در مکزیک به ترتیب ۳۱/۹ و ۲۷/۳ به دست آوردند که با نتایج این طرح کاملاً مطابقت دارد.

قابلیت بازیافت پساب تصفیه شده از نظر غلظت مواد آلی

همان گونه که بیان گردید، رشد جمعیت و افزایش مصارف آب و همچنین کاهش منابع آب شیرین و پاک موجود سبب شده تا به پساب های تصفیه شده به عنوان یکی از منابع جدید آب نگریسته شود. بازیافت پساب ها علاوه بر برطرف نمودن نیاز آبی بخش های مختلف و کاهش فشار بر منابع آب های سطحی و زیرزمینی، خطرات رها سازی آنها در محیط زیست را نیز کاهش خواهد داد. برای استفاده از پساب های تصفیه شده در مصارف گوناگون، غلظت آلاینده ها در آنها باید به زیر حدود استاندارد مورد نیاز در آن مصرف برسد. دستورالعمل "ضوابط

بوده است. دلیل این امر بالاتر بودن غلظت BOD_۵ ورودی به تالاب عمودی شاهد در مقایسه با دیگر تالاب های عمودی به ویژه تالاب نی معمولی است. البته از نظر آماری مقادیر ضریب محاسبه شده برای تالاب های عمودی با یکدیگر تفاوت معنی دار نداشتند. مقایسه ضرایب مربوط به تالاب های هیبریدی نشان می دهد که مقدار این ضرایب برای تالاب های مختلف بسیار به یکدیگر نزدیک شده و اختلاف معنی داری بین عملکرد تالاب های مختلف مشاهده نمی گردد. این امر مزیت پوشش عملکرد تالاب های هیبریدی را نشان می دهد، به این ترتیب که تالاب های تکمیلی می توانند نواقص و یا عملکرد پایین تالاب های قبلی را جبران نموده و عملکرد کل سیستم را به یک مقدار قابل قبول ارتقاء دهند.

به همین ترتیب مقادیر میانگین ضریب مدل مرتبه اول برای آلاینده COD برای تالاب های مختلف طرح در جدول (۲) نمایش داده شده است. در مورد COD در میان تالاب های افقی، تالاب شاهد بالاترین مقدار و تالاب نی معمولی پایین ترین مقدار ضریب مدل مرتبه کنتیک را به خود اختصاص داده اند. این روند در مورد تالاب های عمودی معکوس بوده و تالاب نی معمولی در مقایسه با دیگر تالاب های عمودی بیشترین مقدار ضریب مدل کنتیک را دارا بود که این امر به غلظت بالاتر ورودی COD به این تالاب مربوط می باشد. در مقیاس تالاب های هیبریدی نیز مقادیر ضرایب مدل کنتیک بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و اختلافات مشاهده شده در مورد تالاب های عمودی و افقی با کاهش روبرو بوده است که این امر دلیلی دیگر بر عملکرد پایدار تالاب های هیبریدی در مقایسه با

بر اساس استانداردهای آیین‌نامه، غلظت بیشینه COD برای پساب‌های گروه "الف" ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، پساب‌های گروه "ب" ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر و پساب‌های گروه "ج" بالاتر از ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر باید باشد. بر این اساس، پساب خروجی از تالاب‌های هیبریدی طرح در گروه "ب" قرار گرفته و از نظر مصارف صنعتی دارای کیفیت متوسط بوده و برای مصارف با حساسیت کم و مصارف غیرحساس به کیفیت آب قابل استفاده است. برای مصارف بسیار حساس صنعتی نیاز به تصفیه بیشتر این پساب خواهد بود.

استانداردهای غلظت BOD₅ برای استفاده پساب‌ها در آبیاری محصولات کشاورزی و فضای سبز ۳۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، شرب دام و طیور ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، تخلیه به آب‌های سطحی ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و تغذیه مصنوعی ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر (لحظه‌ای ۵۰) است. در مورد پساب‌های صنعتی استاندارد در دستورالعمل بازیافت پساب‌ها ذکر نشده است. بر این اساس، می‌توان بیان نمود که غلظت پارامتر BOD₅ پساب‌های خروجی کمتر از استانداردهای مورد نظر در تمامی مصارف یاد شده بوده است. البته باید توجه نمود که برای استفاده از پساب بازیافتی در یک مصرف خاص باید تمامی پارامترهای مورد نظر در دستورالعمل (به‌ویژه پارامترهای فلزات سنگین و میکروبیولوژیک) به زیر استانداردهای ارائه شده برسند تا بتوان پساب را با اطمینان برای آن مصرف توصیه نمود. تصفیه مناسب مواد آلی در تالاب‌های مصنوعی می‌تواند نمایانگر کارایی بالای این روش در تصفیه دیگر آلاینده‌های موجود در پساب نیز باشد که این امر باید با توجه به نتایج آنالیز کیفی پساب‌های خروجی مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

تالاب‌های مصنوعی یکی از فناوری‌های نسبتاً جدید تصفیه طبیعی پساب‌ها است که در کشورهای پیشرفته به‌طور وسیع مورد استفاده است. یکی از ویژگی‌های این روش وابستگی کارایی آن به شرایط اقلیمی و محلی است، به همین منظور قبل

زیست محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها (۳) مقادیر غلظت پارامترهای مختلف پساب برای استفاده در مصارف گوناگون را ارائه نموده است. بر اساس این دستورالعمل، استاندارد غلظت COD برای مصارف شرب دام و طیور ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و تخلیه به آب‌های سطحی و تغذیه مصنوعی ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر (لحظه‌ای ۱۰۰) می‌باشد. برای آبیاری و فضای سبز، استاندارد برای آلاینده COD در آیین‌نامه "ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها" ارائه نشده است. در برخی از تحقیقات داخلی، استاندارد پارامتر COD در آبیاری کشاورزی را ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته‌اند (۱ و ۲). ولی به نظر می‌رسد که این استاندارد تا حدودی دست بالا باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت خروجی تالاب‌های هیبریدی طرح از نظر آلاینده COD برای مصارف کشاورزی و آبیاری فضای سبز و شرب دام و طیور بلامانع بوده و برای مصارف تخلیه به درون آب‌های سطحی و تغذیه مصنوعی تنها در فصل گرم سال می‌توان بدون محدودیت از خروجی آن بهره برد. برای مصارف اخیر در فصل سرد نیاز است تا غلظت COD حدود ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یابد.

همچنین در این دستورالعمل برای استفاده از پساب‌های تصفیه‌شده در مصارف صنعتی، این پساب‌ها به سه گروه "الف"، "ب" و "ج" تقسیم شده‌اند. پساب‌های گروه "الف" پساب‌هایی هستند که کیفیت بالا داشته و در مصارفی که نسبت به کیفیت آب حساسیت بالایی دارند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای استفاده در مصارف بسیار حساس ممکن است نیاز به تصفیه این پساب‌ها باشد. پساب‌های گروه "ب" پساب‌هایی هستند که کیفیت متوسط داشته و برای مصارف با حساسیت کم در صنعت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. پساب‌های گروه "ج" دارای کیفیت بسیار پایین بوده و برای فرآیندهایی مانند خنک‌کننده‌ها توصیه شده است. برای استفاده از این گروه پساب‌ها در مصارف حساس‌تر نیاز به تصفیه مجدد آنها خواهد بود.

COD در تالاب‌های مختلف با مقدار حذف BOD₅ نشان داد که هر چه مقدار مواد آلی تجزیه پذیر در پساب ورودی به تالاب بیشتر باشد مقدار حذف مواد آلی در تالاب‌ها نیز افزایش یافته و غلظت آلاینده‌ها در خروجی کاهش می‌یابد. همچنین مقادیر ضرایب مدل مرتبه اول برای تالاب‌های مختلف واسنجی شده و با یکدیگر مقایسه شدند. این مقایسات نشان داد که علی‌رغم وجود تفاوت‌هایی در تالاب‌های افقی و عمودی، در مقیاس تالاب هیبریدی به دلیل پوشش تالاب‌ها روی یکدیگر، مقادیر ضرایب در تالاب‌های مختلف به یکدیگر نزدیک شده و با یکدیگر تفاوت معنی‌دار ندارند. براساس استانداردهای بازیافت پساب کشور، خروجی تالاب‌های پایلوت ساخته شده برای مصارف مختلف کشاورزی و فضای سبز، شرب دام و طیور، تخلیه به منابع سطحی و تغذیه زیرزمینی و برخی از مصارف صنعتی با حساسیت اندک از نظر آلاینده‌های آلی مناسب است. تالاب‌های مصنوعی یکی از فناوری‌های مناسب برای تصفیه تکمیلی پساب‌ها در کشور بوده هزینه بهره‌برداری و مدیریت آن اندک بوده و برای پساب‌های شهرهای اندک و روستایی قابل گسترش است.

از کاربرد این طرح‌ها در مقیاس اصلی باید با استفاده از طرح‌های پایلوت کارایی آنها را در شرایط واقعی مورد ارزیابی قرار داده تا نواقص و نقطه ضعف‌های احتمالی آنها مشخص شده و در طرح‌های اصلی برطرف گردند. همچنین ضرایب مدل‌های رایج برای طراحی تالاب‌های مصنوعی در این طرح‌های پایلوت واسنجی می‌گردد تا براساس آنها طرح‌های اصلی طراحی شوند. در این مقاله، با استفاده از یک طرح پایلوت تالاب مصنوعی زیرسطحی در اندازه بزرگ، پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان مورد تصفیه تکمیلی قرار گرفت و مقدار تصفیه مواد آلی موجود در پساب مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تالاب‌ها سه گیاه مختلف نی معمولی، لویی و نی بزرگ کشت شد و یک تالاب نیز به‌عنوان شاهد بدون کشت در نظر گرفته شد.

نتایج حاصل از این طرح پایلوت نشان داد که نوع پوشش گیاهی در غلظت خروجی مواد آلی در تالاب‌های مصنوعی زیرسطحی تفاوت معنی‌داری را ایجاد نمی‌کند. همچنین راندمان حذف COD در تالاب‌های مختلف طرح بین ۷۷ تا ۸۳ درصد و مقدار حذف BOD₅ بین ۸۴ تا ۸۶ درصد بود که از نظر آماری تفاوت‌های مشاهده شده معنی‌دار نبود. مقایسه نسبت BOD₅ به

منابع مورد استفاده

۱. پیرصاحب، م.، ت. خدادادی شرفی و ک. دوگوهر. ۱۳۸۸. امکان‌سنجی استفاده مجدد از پساب تصفیه‌خانه اولنگ مشهد برای آبیاری کشاورزی. سومین همایش ملی آب و فاضلاب، تهران.
۲. شرفی، ک.، م. پیرصاحب، ح. مسکینی، ح. طاهری، ع. درگاهی و ت. خدادادی. ۱۳۸۹. مقایسه کارایی سیستم لجن فعال متعارف و برکه تثبیت در حذف مواد آلی، جامدات معلق، کل کلی‌فرم، کسیت تک‌یاخته و تخم انگل فاضلاب شهری به‌منظور استفاده مجدد در آبیاری کشاورزی. همایش ملی آب با رویکرد آب پاک، تهران، دانشگاه صنعت آب و برق، ۱۱ و ۱۲ اسفند ماه.
۳. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. ۱۳۸۹. ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها. نشریه شماره ۵۳۵.

4. Abidi, S., H. Kallali, N. Jedidi, O. Bouzaiane and A. Hassen. 2009. Comparative pilot study of the performances of two constructed wetland wastewater treatment hybrid systems. *Desalination* 246: 370-377.
5. Avila, C., J. J. Salas, I. Martin, C. Aragon and J. Garcia. 2013. Integrated treatment of combined sewer wastewater and stormwater in a hybrid constructed wetland system in southern Spain and its further reuse. *Ecol. Eng.* 50: 13-20.
6. Belmont, M. A., E. Cantellano, S. Thompson, M. Williamson, A. Sanchez and C. D. Metcalf. 2004. Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico. *Ecol. Eng.* 23: 299-311.

7. Comino, E., V. Riggio and M. Rosso. 2011. Mountain cheese factory wastewater treatment with the use of a hybrid constructed wetland. *Ecological Eng.* 37: 1673-1680.
8. Calheiros, C. S. C., P. V. B. Quitério, G. Silva, L. F. C. Crispim, H. Brix, S. C. Moura and P. M. L. Castro. 2012. Use of constructed wetland systems with *Arundo* and *Sarcocornia* for polishing high salinity tannery wastewater. *J. Environ. Manage.* 95: 66-71.
9. Haghshenas-Adarmanabadi, A., M. Heidarpour and S. Tarkesh-Esfahani. 2016. Evaluation of Horizontal-Vertical subsurface hybrid constructed wetlands for tertiary treatment of conventional treatment facilities effluents in developing countries. *Water, Air & Soil Pollut.* 227(1): 1-18.
10. Idris, S. M., P. L. Jones, S. A. Salzman, G. Croatto and G. Allinson. 2012. Evaluation of the giant reed (*Arundo donax*) in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of dairy processing factory wastewater. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 19: 3525-3537.
11. Justin, M. Z., D. Vrhovsek, A. Stuhlbacher and T. G. Bulc. 2009. Treatment of wastewater in hybrid constructed wetland from the production of vinegar and packaging of detergents. *Desalination* 246: 100-109.
12. Kadlec, R. H. 2009. Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecol. Eng.* 35: 159-174.
13. Masi, F. and N. Martinuzzi. 2007. Constructed wetlands for the Mediterranean countries: hybrid systems for water reuse and sustainable sanitation. *Desalination* 215: 44-55.
14. Oovel, M., A. Tooming, T. Mairing and U. Mander. 2007. Schoolhouse wastewater purification in a LWA-filled hybrid constructed wetland in Estonia. *Ecol. Eng.* 29: 17-26.
15. Saeed, T., R. Afrin, A. Al Mueyed and G. Sun. 2012. Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh. *Chemosphere* 88: 1065-1073.
16. Toscano, A., A. Marzo, M. Milani, G. L. Cirelli and S. Barbagallo. 2015. Comparison of removal efficiencies in Mediterranean pilot constructed wetlands vegetated with different plant species. *Ecol. Eng.* 75: 155-160.
17. Vymazal, J. 2002. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecol. Eng.* 18: 633-646.
18. Vymazal, J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecol. Eng.* 25: 478-490.
19. Vymazal, J. 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecol. Eng.* 35: 1-17.
20. Vymazal, J. 2011. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia.* 674: 133-156.
21. Vymazal, J. 2013. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Res.* 47: 4795-4811.
22. Vymazal, J. and L. Kröpfelová. 2009. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Sci. Total Environ.* 407: 3911-3922.
23. Vymazal, J. and L. Kröpfelová. 2011. A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage: First 2 years of operation. *Ecol. Eng.* 37: 90-98.
24. Zurita, F., J. De Anda and M. A. Belmont. 2009. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 35: 861-869.

Study of the Efficiency of Hybrid Subsurface Constructed Wetlands in Reducing the Organic Loading of Municipal Wastewater Treatment Plants Using Various Aquatic Plants

A. Haghshenas-Adarmanabadi^{1*}, M. Heidarpour¹ and S. Tarkesh-Esfahani²

(Received: July 11-2015 ; Accepted :. April 25-2016)

Abstract

In this paper, the efficiency of four hybrid horizontal-vertical subsurface constructed wetlands which have been built for the tertiary treatment of Isfahan North Wastewater Treatment Facility and removal of organic matters was evaluated. In these constructed wetlands three plants including *Phragmites australis*, *Typha latifolia* and *Arundo donax* were planted and one unit left unplanted. The results of 12 months of sampling showed that the type of vegetation has no significant influence on the organic matter removal in the subsurface constructed wetlands, although the removal efficiencies in the planted constructed wetlands were more than unplanted control one. The COD and BOD₅ removal efficiency in the constructed wetlands changes between 77% to 83% and 84% to 86%, respectively, during the operation period. The results of this research also showed that the organic matter removal was dependent on the influent organics nature and biodegradability. The first order model constants were calibrated in different wetlands for designing main projects. The organic concentration in the wetland effluents met the Iranian regulation limits for different reuse applications that shows the constructed wetland is a suitable technology for wastewater treatment in Iran.

Keywords: Constructed wetland, COD, BOD, plant, wastewater recycling.

1. Dept. of Water Eng., College of Agr., Isfahan Univ. of Technol., Isfahan, Iran.

2. Dept. of Civil Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad Univ., Tehran, Iran.

*: Corresponding Author, Email: haghshenasamir@yahoo.com