

Investigating the Efficiency of Phosphate Removal from Wastewater from Sugar Cultivation Industry Using Baffled Subsurface-Flow Constructed Wetland

S. Ghasemi¹, E. Derikvand², S. Khoshnavaz³, S. Boroomand Nasab⁴, M. Solimani Babarsad⁵

1. PhD Candidate, Dept. of Civil Engineering-Water Resources Engineering and Management, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering-Water Resources Engineering and Management, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran (Corresponding Author) e.derikvand@yahoo.com

3. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering-Water Resources Engineering and Management, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

4. Prof., Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

5. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering-Water Resources Engineering and Management, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

(Received Dec. 25, 2018 Accepted Feb. 26, 2019)

To cite this article:

Ghasemi, S., Derikvand, E., Khoshnavaz, S., Boroomand Nasab, S., Solimani Babarsad, M. 2020, "Investigating the efficiency of phosphate removal from wastewater from sugar cultivation industry using baffled subsurface-flow constructed wetland" Journal of Water and Wastewater, 31(1), 61-75. Doi: 10.22093/wwj.2019.164326.2798. (In Persian)

Abstract

Phosphorus is recognized as a nutrient in aquatic environments, but increasing its concentration in water resources causes the occurrence of eutrophication in water and, as a result, causes the death of aquatic organisms. Therefore, removal of phosphate from water is very important. In this research, to remove phosphate from water resources, the baffled subsurface-flow constructed wetland was used. In order to increase the efficiency of the wetland system, experiments were designed in 3 different phases. In the first phase, in the form of batch experiments, the composite performance of cheap materials such as zeolite, bentonite and pumice aggregates (the stabilization of nanoparticles of zeolite/bentonite on the surface of Pumice aggregates) to absorb phosphate and select the preferred candidate for placement in the wetland was investigated. In the second phase, the performance of native plants of Khuzestan province such as salicornia, Typha, and Juncus, in the form of pot experimentation, to uptake phosphate and select the best candidate for cultivation in the bed of the wetland was investigated. Finally, in the third phase, with the placement of the selected bedding and plants (chosen from previous experiments) in the wetland system, experiments were carried out to study the effect of parameters such as the percentage of optimum mix of selected bed with gravel, hydraulic residence time and temperature changes on the phosphate removal efficiency. The results showed that among absorbent materials and candidate plants for placement and cultivation in the wetland, the maximum capacity to absorb and accumulate phosphate by Pumice aggregate coated with zeolite nanoparticles (1.08 mg/g) and salicornia (9.68 mg/g of plant dry weight) was observed. In this experiment, the use of a combination of 10% of the selected bed with 90% of the gravel was obtained as the best and most economical option for removal of phosphate. Also, the efficiency of removal of phosphate in the 1-day hydraulic residence time was achieved at the highest intensity (99.60%) and was selected as the optimum time to remove phosphate. Finally, the results of the effect of temperature changes on the efficiency of the wetland system showed that the removal efficiency from March 2018 (20 °C) to July 2018 (40 °C) increased to about 1 percent, which indicates the effect of temperature changes on the performance of the wetland system. According to the results, in the case of adequate land availability, the use of subsurface-flow constructed wetland systems to wastewater treatment of agricultural and industrial units is very convenient and cost-effective.

Keywords: Phosphate Removal, Baffled Constructed Wetland, Phytoremediation.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۱، صفحه: ۶۱-۷۵

بررسی کارایی حذف فسفات از زهاب صنایع کشت و صنعت نیشکر با استفاده از سیستم تالاب بافل‌دار ساختگی با جریان زیر سطحی

صادق قاسمی^۱، احسان دریکنوند^۲، صائب خوشنواز کومله^۳، سعید برومند نسب^۴، محسن سلیمانی بایرصاد^۵

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد شوشتر،

دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد شوشتر،

دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

e.derikvand@yahoo.com (نویسنده مسئول)

۳- استادیار گروه مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد شوشتر،

دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۴- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۵- استادیار گروه مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد شوشتر،

دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

(دریافت ۹۷/۱۰/۴ پذیرش ۹۷/۱۲/۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

قاسمی، ص.، دریکنوند، ا.، خوشنواز کومله، ص.، برومند نسب، س.، سلیمانی بایرصاد، م.، ۱۳۹۹، "بررسی کارایی حذف فسفات از زهاب صنایع کشت و صنعت نیشکر با استفاده از سیستم تالاب بافل‌دار ساختگی با جریان زیر سطحی" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۱)، ۶۱-۷۵.

Doi: 10.22093/wwj.2019.164326.2798.

چکیده

فسفر در محیط‌های آبی به‌عنوان یک ماده مغذی ضروری شناخته می‌شود اما افزایش غلظت آن در منابع آبی باعث بروز پدیده یوتروفیکاسیون در آب و در نتیجه مرگ آبزیان می‌شود. بنابراین حذف فسفات از آب بسیار مهم است. در این پژوهش به‌منظور حذف فسفات از منابع آب از سیستم تالاب بافل‌دار ساختگی با جریان زیر سطحی استفاده شد. در همین راستا برای افزایش کارایی سیستم تالاب ساخته شده در حذف بهینه فسفات، آزمایش‌هایی در ۳ فاز مختلف طراحی شد. در فاز اول در قالب آزمایش‌های ناپیوسته، عملکرد کامپوزیت مواد ارزان قیمتی همچون زئولیت، بنتونیت و سنگدانه پامیس به‌صورت تثبیت نانوذرات زئولیت/ بنتونیت بر روی سطح سنگدانه‌های پامیس به‌منظور جذب فسفات و انتخاب کاندید برتر به‌منظور قرارگیری در بستر تالاب مورد بررسی قرار گرفت. در فاز دوم در قالب آزمایش‌های گلدانی، عملکرد گیاهان بومی استان خوزستان همچون سالیکورنیا، لویی و سازو به‌منظور جذب فسفات و انتخاب کاندید برتر جهت کشت در بستر تالاب مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت در فاز سوم با قرارگیری بستر و گیاه منتخب در سیستم تالاب ساخته شده، آزمایش‌هایی به‌منظور بررسی اثر پارامترهایی همچون درصد ترکیب بهینه بستر منتخب با شن، زمان ماند هیدرولیکی و تغییرات دمایی بر راندمان حذف فسفات انجام و تحلیل شد. از بین مواد جاذب و گیاهان کاندید شده برای قرارگیری و کشت در بستر تالاب، بیشترین ظرفیت جذب و انباشت فسفات در سنگدانه‌های پامیس پوشش داده شده نانوذرات زئولیت ۱/۰۲ میلی گرم بر گرم و گیاه سالیکورنیا (۹/۶۸ میلی گرم در گرم وزن خشک گیاه) مشاهده شد. در این آزمایش استفاده از ترکیب ۱۰ درصد بستر منتخب با ۹۰ درصد شن به‌عنوان بهترین و اقتصادی‌ترین گزینه در حذف فسفات به‌دست آمد. همچنین راندمان حذف فسفات در زمان ماند هیدرولیکی ۱ روزه در بیشترین شدت، ۹۹/۶۰ درصد به‌دست آمد و به‌عنوان زمان ماند بهینه مناسب برای حذف فسفات انتخاب شد. در نهایت بررسی نتایج اثر تغییرات دمایی در کارایی سیستم تالاب نشان داد که راندمان حذف از اسفندماه ۱۳۹۶ (دمای ۲۰ درجه سلسیوس) تا تیرماه ۱۳۹۷ (دمای ۴۰ درجه سلسیوس) به میزان ۱ درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده تأثیر تغییرات دمایی بر کارایی سیستم تالاب است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در صورت در دسترس بودن زمین کافی، استفاده از سیستم‌های تالاب مصنوعی با جریان زیر سطحی برای تصفیه پساب واحدهای کشاورزی و صنعتی بسیار مناسب و مقرون به صرفه است.

واژه‌های کلیدی: حذف فسفات، تالاب بافل‌دار ساختگی، گیاه‌پالایی



۱- مقدمه

فسفر معمولاً در محیط به صورت فسفات وجود دارد. منابع اصلی انسانی ورود فسفات به محیط زیست شامل فعالیت‌های کشاورزی (کودهای فسفاته، آفت کش‌ها، ذخیره غذایی دام‌ها و غیره)، صنعت (انواع شوینده‌ها، افزودنی‌های غذایی و غیره) و فاضلاب‌های شهری و خانگی است (Zhang et al., 2018, Li et al., 2017).

یکی از این فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در استان خوزستان واحدهای کشت و صنعت نیشکر است. استان خوزستان، از قطب‌های اصلی تولید شکر در ایران و جهان محسوب می‌شود و واحدهای کشت و صنعت نیشکر بسیاری از شمال تا جنوب این استان گسترش یافته‌اند. فاضلاب‌های صنعتی و کشاورزی این شرکت‌ها، معمولاً حاوی مقدار زیادی از مواد مغذی، املاح محلول و مواد آلی هستند که مستقیماً به آب‌های سطحی و رودخانه‌ها وارد می‌شوند (Khoshnava et al., 2014).

هنگامی که غلظت فسفر در محیط‌های آبی بیش از ۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر شود، پدیده یوتروفیکاسیون^۱ اتفاق می‌افتد که کیفیت آب را از طریق افزایش رشد جلبک‌های دریایی، کاهش اکسیژن و کاهش انتقال نور تحت تأثیر قرار می‌دهد (Huang et al., 2018, Kim et al., 2018, Li et al., 2016).

تاکنون روش‌های مختلفی برای حذف فسفات از محیط‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفته است، مانند رسوب شیمیایی (Wang et al., 2015)، حذف بیولوژیکی (Jiang et al., 2018)، اسمز معکوس (Luo et al., 2016)، غشا (Nir et al., 2018)، تالاب‌های ساخته شده (Lan et al., 2018) و جذب (Xue et al., 2018).

از میان این روش‌ها امروزه استفاده از تکنولوژی ساخت تالاب‌های ساختگی در تصفیه انواع فاضلاب‌ها در سراسر جهان رشد بسیاری نموده است (Yakar et al., 2018).

تالاب ساخته شده^۲ یک تکنولوژی کارآمد برای مدیریت و تصفیه فاضلاب با مزایایی همچون: هزینه پایین احداث، شرایط عملیاتی ساده و نگهداری آسان است (de Rozari et al., 2018).

پژوهش‌های پیشین نشان داده است که تالاب‌های ساختگی معمولی از لحاظ حذف جامدات معلق و مواد آلی دارای راندمان

بسیار بالا و رضایت بخشی در حدود از ۷۰ تا ۸۰ درصد هستند (Babatunde et al., 2010)، اما از نظر حذف نیترژن و فسفر راندمان کمتری در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد دارند (Sheng-Bing et al., 2007, Zhao et al., 2016). بنابراین امروزه یافتن راه‌حلی به‌منظور افزایش کارایی و راندمان حذف آلاینده‌ها به‌ویژه نیترات و فسفات از مسائل مهم در استفاده از تالاب‌های ساختگی است.

در پژوهش‌های اخیر، به غیر از استفاده از بسترهای معمول در تالاب‌ها از جمله خاک، شن و ماسه، از بسترهای مختلفی برای افزایش کارایی حذف آلاینده‌ها در تالاب‌های ساختگی استفاده می‌شود که از جمله می‌توان به زئولیت (Andrés et al., 2018)، بوکسیت (Higgins et al., 2018)، آهک (Postila et al., 2017)، ورمیکولیت (Wen et al., 2016)، بیو-سرامیک (Fang et al., 2018)، آلوم (Austin et al., 2018)، سرباره فولاد (Barca et al., 2018) و خاکستر بادی (Cheng et al., 2018) اشاره نمود.

استفاده از مواد محلی علاوه بر افزایش کارایی حذف آلاینده‌ها، هزینه‌های ساختمانی را نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. نوع پوشش گیاهی متناسب با شرایط محیطی و نوع آلاینده نیز از پارامترهای مؤثر دیگر در سیستم‌های تالابی است (Kasak et al., 2018). همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهد استفاده و نصب ترکیبی از بافل‌ها (موانع) در تالاب‌های ساختگی با جریان زیر سطحی با توجه به هدایت حرکت آب به صورت جریان رو به بالا و جریان رو به پایین، طول مسیر حرکت فاضلاب را در سیستم افزایش می‌دهد و به این ترتیب موجب افزایش کارایی حذف آلاینده‌ها می‌شود (Chang et al., 2017, Tee et al., 2015).

با توجه به موارد اشاره شده، در این پژوهش ابتدا به‌منظور افزایش کارایی و راندمان حذف فسفات از محیط‌های آبی توسط سیستم تالاب ساختگی، در فاز اول در قالب آزمایش‌های ناپیوسته، عملکرد کامپوزیت مواد ارزان‌قیمتی همچون زئولیت، بنتونیت و سنگدانه پامیس به صورت تثبیت نانوذرات زئولیت/بنتونیت بر روی سطح سنگدانه‌های پامیس و انجام مقایسه با سنگدانه‌های رایج شن مورد استفاده در تالاب‌های معمول، به‌منظور جذب فسفات و انتخاب کاندید برتر برای قرارگیری در بستر تالاب مورد بررسی قرار گرفت، در فاز دوم در قالب آزمایش‌های گلدانی، عملکرد گیاهان بومی استان خوزستان همچون سالیکورنیا، لویی و

¹ Ultrification² Constructed Wetlands (CWs)

۲-۱-۲- طراحی آزمایش برای بررسی ظرفیت جذب بسترهای کاندید شده

برای بررسی ظرفیت جذب بسترهای آماده شده و انتخاب کاندید برتر، آزمایش‌هایی به صورت ناپیوسته با متغیر قرار دادن مقدار غلظت آلاینده و ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها انجام شد. به این منظور ابتدا با استفاده از نمک KH_2PO_4 و آب دیونیزه محلول‌های ۱ لیتری فسفات با غلظت ۷، ۱۰، ۱۸ و ۲۸ میلی‌گرم در لیتر و با pH برابر با ۷ تهیه شد. سپس به مقدار ۱۰ گرم از هر بستر تهیه شده به محلول‌ها اضافه شد و به مدت ۳ ساعت در دمای آزمایشگاه (۲۲/۵ درجه سلسیوس) به وسیله میکسر به هم زده شد. در نهایت سنگدانه‌ها توسط کاغذ صافی از محلول‌ها کاملاً جدا شدند و غلظت باقیمانده فسفات با روش اسپکتروفتومتری و در طول موج ۸۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌ها حداقل سه بار تکرار شد و میانگین داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱-۳- طراحی آزمایش‌ها به منظور بررسی پتانسیل جذب فسفات توسط گیاهان کاندید شده

در این بخش از پژوهش که در اردیبهشت ماه ۱۳۹۶ انجام شد، به منظور بررسی و انتخاب گیاه برتر با پتانسیل جذب فسفات بیشتر برای کشت در تالاب‌های ساختگی، از سه گونه گیاه آبیزی شامل سالیکورنیا (پرسیکا)، لویی و سازو با توجه به سازگاری و تطبیق با آب و هوای منطقه، رشد سریع، ایجاد زی توده انبوه، عدم ایجاد رنگ، طعم و بو در آب و برخورداری از فیزیولوژی مناسب برای انجام آزمایش استفاده شد. به همین منظور پس از استخراج گیاهان از زیستگاه‌های طبیعی و آماده‌سازی بستر کشت (شن و ماسه) در گلدان‌های تهیه شده، هر یک از گیاهان کاندید با تراکم ۲۵ بوته در متر مربع در گلدان‌ها کشت شد. برای ایجاد شرایط اشباع محیط کشت، ابتدا آبیاری گلدان‌ها به میزان ۲۰ لیتر (متناسب با میزان تخلخل اندازه‌گیری شده شن و ماسه مصرفی در بستر کشت) و با استفاده از پساب شبیه‌سازی شده (KH_2PO_4) در سه سطح مختلف غلظت فسفات (۷، ۱۸ و ۲۸ میلی‌گرم در لیتر) انجام شد و در ادامه با توجه به تبخیر و تعرق ۵/۲۱ میلی‌متر بر روز به دست آمده از لایسیمتر، دور آبیاری با فاصله ۷ روز برای تأمین شرایط اشباع محیط کشت در نظر گرفته شد.

سازو به منظور جذب فسفات و انتخاب کاندید برتر برای کشت در بستر تالاب بررسی شد و در نهایت در فاز سوم با قرارگیری بستر و گیاه منتخب در سیستم تالاب‌های بافل‌دار ساختگی با جریان زیر سطحی، آزمایش‌هایی برای بررسی اثر پارامترهایی همچون درصد ترکیب بهینه بستر منتخب با شن، زمان ماند هیدرولیکی و تغییرات دمایی بر راندمان حذف فسفات انجام و تحلیل شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱-۲- طرح آزمایش‌های انتخاب بستر و گیاه منتخب

۲-۱-۱- آماده‌سازی مواد کاندید مورد استفاده در بستر تالاب

در این پژوهش چهار ماده کاندید مختلف بر اساس دسترسی آسان و هزینه کم برای استفاده در بستر تالاب در نظر گرفته شد. جنس‌های مختلف بستر شامل: سنگدانه‌های پامیس و شن طبیعی، سنگدانه‌های پامیس پوشش داده شده توسط نانوذرات زئولیت و سنگدانه‌های پامیس پوشش داده شده توسط نانوذرات بنتونیت بودند.

برای آماده‌سازی و افزایش بازدهی سنگدانه‌های پامیس و شن پس از تهیه و دانه‌بندی آن‌ها در سایزهای ۴ تا ۶ میلی‌متری، سنگدانه‌ها ابتدا با اسید کلرید ۱ نرمال و سپس با آب مقطر شستشو داده شدند و به منظور کلسینه شدن به مدت ۳ ساعت در کوره و در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند.

همچنین در این پژوهش نانوذرات زئولیت و بنتونیت تهیه شده از معادن محلی استان سمنان، بر روی سنگدانه‌های پامیس (تهیه شده از اهواز) تثبیت شدند (Ghasemi et al., 2019). به همین منظور ابتدا نانوذرات زئولیت و بنتونیت با محلول سورفکتانت CTAB با مقدار $\text{CMC} = 0.92$ میلی‌مولار اصلاح شدند و سپس با بارگذاری ۱۰ درصد وزنی نسبت به سنگدانه‌ها، با روش غوطه‌وری محلول کلوییدی و استفاده از دستگاه شکر، با سنگدانه‌های پامیس مخلوط شدند. پس از صاف کردن محلول به منظور تثبیت نانوذرات بر روی سطح سنگدانه‌های پامیس، نمونه تهیه شده به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۴۵۰ درجه و ۹۰ دقیقه در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس در کوره قرار گرفت.

در نهایت به منظور بررسی ساختار بسترهای انتخابی از روش آنالیز عنصری EDAX (Model: ZEISS, SIGMA VP-500) استفاده شد.



۲-۲-۲- آماده‌سازی و خصوصیات هیدرولیکی تالاب‌های ساختگی

در این مرحله از پژوهش مطابق شکل ۱ با توجه به معیارهای طراحی و در نظر گرفتن نسبت طول به عرض ۱:۳ (Allende et al., 2014, Khoshnavaz et al., 2014) اقدام به ساخت تالاب‌های ساختگی در مقیاس آزمایشگاهی از جنس شیشه به طول ۱۲۰ سانتی‌متر و عرض ۴۰ سانتی‌متر در مزرعه آزمایشی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز شد. عمق قرارگیری مواد بستر جذب کننده ۴۰ سانتی‌متر و یک لایه ۵ سانتی‌متری از جنس ماسه نیز جهت حمایت از ریشه گیاهان در قسمت بالایی تالاب‌ها در نظر گرفته شد. به جهت نفوذ پساب به داخل بستر و جلوگیری از مسدود شدن مجراهای ورودی و خروجی جریان آب، از سنگدانه‌های درشت شن به قطر ۱۹ میلی‌متر در ناحیه‌های ابتدایی و انتهایی تالاب به طول ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد (نواحی Z1 و Z6). همچنین برای هدایت حرکت آب به صورت جریان رو به بالا و جریان رو به پایین از ۳ عدد بافل استفاده شد که طول تالاب ساختگی را به ۴ بلوک مساوی تقسیم می‌نمود (نواحی Z2, Z3, Z4 و Z5).

به منظور ترسیم خطوط کنتور ۲ بعدی (عمق، فاصله) روند حذف فسفات توسط روش درون‌یابی کریجینگ و با استفاده از نرم‌افزار surfer9، تعداد ۹ عدد شیر خروجی برای نمونه‌برداری در طول و ارتفاع‌های مختلف قرار داده شد (SP-A الی SP-I). برای تنظیم دبی مورد نیاز آزمایش‌ها، ابتدا پساب مورد نظر توسط پمپ به مخزنی به حجم ۲۰۰۰ لیتر (واقع در ارتفاع ۲ متری) منتقل شد سپس جریان خروجی از مخزن اولیه توسط یک لوله ۱ اینچ به مخزن ثانویه به حجم ۱۰۰ لیتر (واقع شده در ارتفاع ۱ متری) که مجهز به یک شیر شناور برای ثابت نگه‌داشتن سطح آب بود، انتقال یافت.

در نهایت برای تنظیم دبی و برقراری جریان به تالاب‌ها با استفاده از لوله ۱ اینچ و نصب شیرهای آبیاری قطره‌ای، دبی مورد نیاز (با کمک یک استوانه مدرج و در نظر گرفتن زمان) برای هر کدام از تالاب‌های ساختگی با توجه به تخلخل بستر، حجم تالاب، زمان ماند هیدرولیکی و میزان تبخیر و تعرق روزانه تنظیم شد. شکل ۲ نمایی از تالاب‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

در این آزمایش برای هر یک از سطح‌های آلاینده و نوع گونه گیاهان مورد مطالعه، ۳ گلدان تکرار حاوی گیاه و ۳ گلدان تکرار شاهد (بدون گیاه) اختصاص داده شد که در مجموع ۳۶ گلدان به عنوان محیط کشت در نظر گرفته شد. سپس به منظور بررسی میزان قابلیت جذب فسفات در سه گونه گیاهی مورد مطالعه، بعد از مدت ۲۸ روز، کل پساب موجود در گلدان‌ها توسط شیرهای زهکش تعبیه شده در قسمت تحتانی آن‌ها تخلیه شد و پس از اندازه‌گیری میزان حجم آب خروجی توسط ظروف مدرج و اندازه‌گیری غلظت فسفات (توسط دستگاه اسپکترومتری در طول موج ۸۸۰ نانومتر) موجود در پساب خروجی گلدان‌های حاوی گیاه و مقایسه با آنالیز خروجی گلدان‌های شاهد، میزان جذب هر یک از گیاهان در پایان دوره آزمایش با استفاده از روش بیلان جرمی (مقدار فسفات ورودی و خروجی) و با توجه به وزن توده خشک اندام‌های گیاه (ساقه و ریشه) بر حسب میلی‌گرم در گرم بافت خشک گیاهان محاسبه شد.

۲-۲-۲- آماده‌سازی و طرح آزمایش‌های تالاب مصنوعی زیر سطحی بافل‌دار

۲-۲-۱- آماده‌سازی پساب مورد استفاده در تالاب‌های ساختگی پساب مصنوعی مورد استفاده در این پژوهش مشابه خروجی زهکش کشت و صنعت‌های نیشکر واقع در شرق اهواز به دلیل بالا بودن مقدار غلظت فسفات و تخلیه مستقیم به تالاب شادگان تهیه شد.

نتایج آزمایش‌های انجام شده در طول ماه‌های مختلف از خروجی زهکش‌های کشت و صنعت‌های شرق اهواز نشان می‌دهد که کیفیت زهاب‌های خروجی در طی ماه و فصول مختلف کاملاً متغیر است و بستگی به عوامل مختلفی همچون فصل کشت، کوددهی و میزان آبیاری دارد. به همین دلیل برای جلوگیری از تداخل نوسان غلظت آلاینده‌های ورودی بر روی فاکتورهای مؤثر دیگر، با استفاده از KH_2PO_4 پساب شبیه‌سازی شده‌ای با غلظت ثابت فسفات ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و pH برابر با ۷ تهیه شد. همچنین در این آزمایش برای اندازه‌گیری غلظت فسفات در پساب خروجی تالاب‌ها از روش اسپکترومتری با طول موج ۸۸۰ نانومتر استفاده شد.



۲-۲-۳- طرح آزمایش تالاب مصنوعی زیرسطحی بافل دار

به منظور بررسی اثر ۳ پارامتر درصد ترکیب بستر منتخب با شن، زمان ماند هیدرولیکی و تغییرات دمایی ناشی از تغییر فصل در عملکرد تالاب در حذف آلاینده فسفات، مطابق جزئیات درج شده در جدول ۱، طرح آزمایش A، B و C در سیستم تالاب ساختگی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه پیش‌بینی می‌شود استفاده از مواد جذب کننده کاندید شده به مقدار قابل توجهی کارایی و راندمان حذف آلاینده در تالاب را افزایش دهد، به منظور به دست آوردن درصد بهینه و اقتصادی ترکیب بستر منتخب (مطابق نتایج فاز اول) با شن در تناسب با طول مدت انجام آزمایش‌ها در تالاب (۱۵ روز)، آزمایش‌هایی در قالب طرح A طراحی شد که به ترتیب از ترکیب بستر: ۵ درصد بستر منتخب - ۹۵ درصد شن، ۱۰ درصد بستر منتخب - ۹۰ درصد شن و ۱۵ درصد بستر منتخب - ۸۵ درصد شن، بدون کشت گیاه استفاده شد. در طرح B پس از کشت گیاه منتخب (مطابق نتایج فاز دوم) در ۷ ردیف ۵۰ تایی و در نظر گرفتن ترکیب بستر بهینه به دست آمده از طرح A، چهار زمان ماند هیدرولیکی ۱، ۳، ۵ و ۱۰ روز با فرض حجم تخلیه تئوری برابر با ۷ لیتر و متغیر قرار دادن مقدار دبی ورودی به تالاب‌ها آزمایش و بررسی شد.

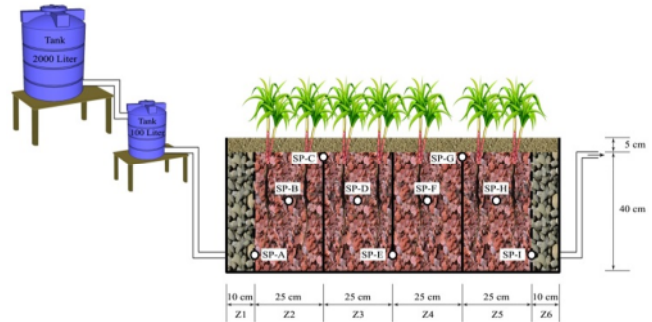


Fig. 1. Schematic of the constructed wetland

شکل ۱- شماتیک تالاب ساخته شده

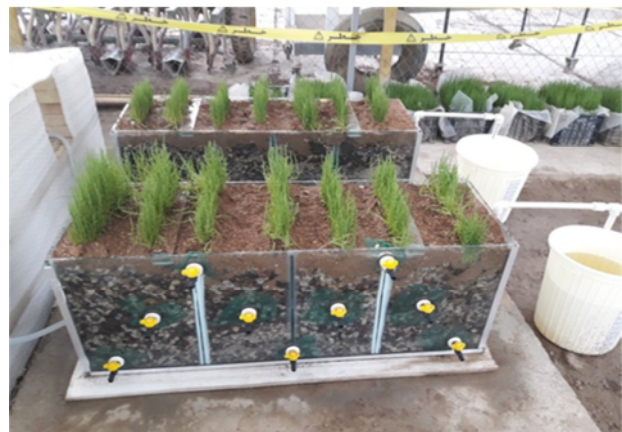


Fig. 2. View of constructed wetland

شکل ۲- نمایی از تالاب‌های ساخته شده

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های طرح شده در سیستم تالاب ساختگی

Table 1. Specifications of experiments designed in constructed wetland system

Plan	Plan A			Plan B ¹				Plan C ¹		
The time of experiment	January 2018			February 2018				March 2018	May 2018	July 2018
Percentage of used absorbent bed	5	10	15	Optimum amount obtained from plan A				Optimum amount obtained from plan A		
Period of time (day)	15			1	3	5	10	15		
Hydraulic residence time (day)	1			1	3	5	10	Optimum amount obtained from plan B		
Average temperature (°C)	16			17				20	29	40
Average evapotranspiration rate (mm/day)	2.3			2.9				3.6	5.17	6.71
Required flow (ml/sec)	1.07	1.09	1.11	1.18	0.4	0.25	0.13	1.101	1.110	1.118

¹Flow values of experiments of plan B and C were calculated after determining the optimal parameters and considering the porosity of selected bed composition percentage, hydraulic residence time and daily evapotranspiration.

²All experiments designed in constructed wetland system were performed to evaluate the effective parameters in 3 replications.



میلی گرم بر گرم به دست آمد که کمترین مقدار مربوط به سنگدانه های شن و بیشترین مقدار مربوط به سنگدانه های پامیس پوشش داده شده توسط نانوذرات زئولیت بود.

کارایی و راندمان بسیار پایین فسفات توسط سنگدانه های شن به دلیل سطح صاف، تخلخل پایین و داشتن بار سطحی منفی آن در پژوهش ها گزارش شده است (Hua et al., 2018, Hua and Haynes, 2016) در عوض در ترکیب کامپوزیتی سنگدانه های پامیس و زئولیت، پامیس یک سنگ آتشفشانی است که امروزه به دلیل ساختار متخلخل و غیر متبلور و همچنین داشتن مقدار زیادی اکسید سیلیس و آلومینیوم، در حذف آلاینده های محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است (Saltan and Fındık, 2008). همچنین زئولیت ها گروهی از مواد معدنی آلومینوسیلیکات میکروپروس هستند که با سطح ویژه بالا می توانند به صورت بالقوه برای مواردی چون جذب سطحی آلاینده ها به کار روند (Nakhaeipour et al., 2017). علاوه بر این با توجه به اینکه که برای آماده سازی این ترکیب کامپوزیتی از سورفکتانت کاتیونی استفاده می شود، این عمل موجب کاهش بار سطحی منفی آن ها شده و ظرفیت تبادل آنیونی آن ها را افزایش می دهد (Bowman, 2003). بنابراین در این پژوهش با توجه به نتایج، ترکیب کامپوزیتی سنگدانه های پامیس و زئولیت به عنوان بستر منتخب به منظور استفاده در بستر تالاب های ساختگی در نظر گرفته شد.

همچنین در این طرح جهت محاسبات بیلان جرمی، حجم آب خروجی از تالاب ها با استفاده از سطوح های مدرج اندازه گیری شد. در طرح C نیز به منظور بررسی عملکرد تالاب ساختگی در شرایط دمایی متفاوت، پس از آماده سازی تالاب ها و کشت گیاهان منتخب (۷ ردیف ۵۰ تایی)، با در نظر گرفتن بهینه ترکیب بستر و زمان ماند هیدرولیکی به دست آمده از نتایج طرح های A و B، آزمایش ها در طول دوره های ۱۵ روزه در ۳ فصل زمستان، بهار و تابستان طراحی و انجام شد. علاوه بر این در پایان دوره آزمایش های طرح های B و C، نمونه های گیاهی از بستر خارج شدند و پس از خشک شدن در آون، اندام های هوایی و زمینی آن ها با ترازوی الکتریکی توزین و آسیاب شد و مقدار فسفات جذب شده توسط اندام های هوایی و زمینی گیاهان با استفاده از عصاره گیری به روش هضم تر (Zafari et al., 2014) بر حسب میلی گرم بر گرم وزن خشک ریشه و اندام های هوایی اندازه گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ظرفیت جذب بسترهای کاندید شده

جدول ۲ نتایج آنالیز عنصری EDAX و برخی از خصوصیات فیزیکی بسترهای انتخابی را نشان می دهد. همچنین نتایج حاصل از بررسی ظرفیت جذب فسفات ۴ بستر کاندید شده در شکل ۳ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده، حداکثر ظرفیت جذب فسفات در بسترهای کاندید شده در محدوده بین ۰/۰۹۵ تا ۱/۰۲

جدول ۲- آنالیز عنصری و برخی از خصوصیات فیزیکی بسترهای انتخابی

Table 2. Elementary analysis and some physical properties of selected substrates

The name of the bed	Diameter (mm)	Porosity percentage	Weight percentage of constituents											
			O	N	Si	Au	Al	Na	C	Ca	Mg	Fe	K	F
Natural pumice	4-6	75	61	7.9	7.4	6.3	4.5	4.4	3.1	2.1	1.9	1.4	-	-
Composite of Zeolite/Pumice	4-6	72	60.4	3.6	13	3.3	6.2	5	2.5	1.5	1.4	1.6	1.5	-
Composite of Bentonite/Pumice	4-6	72	56.2	3.5	11.9	5.2	5.8	3.5	1.4	3	1.3	2.8	1.2	4.2
Gravel	4-6	48	52.7	-	1.6	-	1.6	-	11.2	30.7	2.2	-	-	-



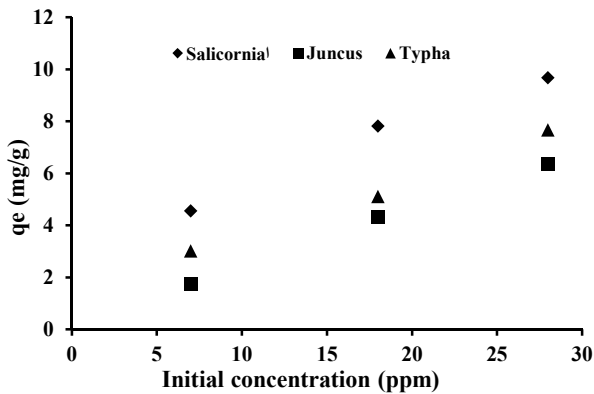


Fig. 4. Comparison of the amount of phosphate absorbed by the candidate plants

شکل ۴- مقایسه مقدار فسفات جذب شده توسط گیاهان کاندید

حالت جریان پیوسته به مدت ۱۵ روز و با زمان ماند هیدرولیکی ۱ روزه نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده، استفاده از ترکیب ۵ درصدی کامپوزیت سنگدانه‌های پامیس و زئولیت فاقد کارایی لازم برای حذف فسفات در طول مدت انجام آزمایش است و مقدار پایین راندمان حذف فسفات در انتهای روز ۱۵ ام نشان دهنده اشباع شدن ظرفیت جذب بستر است در حالی که نتایج اندازه‌گیری غلظت خروجی فسفات برای ترکیب‌های ۱۰ و ۱۵ درصدی کامپوزیت سنگدانه‌های پامیس و زئولیت در انتهای روز ۱۵ ام گویای عملکرد قابل قبول سیستم در حذف فسفات است.

همچنین شکل ۵ خطوط کنتور ۲ بعدی حذف فسفات در تالاب ساختگی توسط مدل درونیایی کریجینگ را در انتهای روز ۱۵ ام نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، غلظت آلاینده در ابتدا و انتهای تالاب در ترکیب بستر ۵ درصد کامپوزیت سنگدانه‌های پامیس و زئولیت دارای تغییرات اندکی است در حالی که غلظت فسفات در ورودی و خروجی تالاب‌ها در ترکیب بسترهای ۱۰ و ۱۵ درصدی به ترتیب گویای راندمان حذف ۹۷/۴۰ و ۹۹/۱۰ درصد است.

همچنین مقایسه خطوط کنتور در ترکیب بسترهای ۱۰ و ۱۵ درصد نشان می‌دهد که در پایان مدت ۱۵ روز، عمده میزان حذف فسفات به ترتیب در بلوک‌های سوم و چهارم انجام شده است و با توجه به استفاده از حداکثر ظرفیت جذب فسفات در ترکیب بستر ۱۰ درصدی و نزدیک به حد استاندارد بودن مقدار غلظت پساب خروجی، این ترکیب به‌عنوان بهترین و اقتصادی‌ترین گزینه در حذف فسفات به‌منظور انجام آزمایش‌های بعدی انتخاب شد.

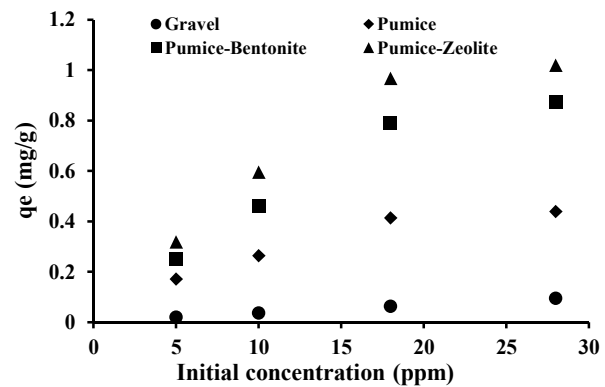


Fig. 3. Investigation of phosphate adsorption capacity by candidate substrates

شکل ۳- بررسی ظرفیت جذب فسفات توسط بسترهای کاندید شده

۲-۳- پتانسیل جذب فسفات توسط گیاهان کاندید

شکل ۴ روند تأثیر غلظت‌های متفاوت فسفات را بر روی پتانسیل جذب گیاهان سالیکورنیا، لویی و سازو در طی مدت ۲۸ روز بر حسب میلی‌گرم در گرم بافت خشک گیاهان نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که میزان فسفات جذب شده در هر سه گیاه مورد مطالعه با افزایش غلظت اولیه آلاینده از یک روند افزایشی برخوردار بود به طوری که بیشترین میزان ظرفیت جذب در تیمارهای سطح بالای غلظت فسفات (۲۸ میلی‌گرم در لیتر) برای هر یک از گیاهان مشاهده شد که این مقدار برای گیاهان سالیکورنیا، سازو و لویی به ترتیب ۹/۶۸، ۶/۳۷ و ۷/۶۸ میلی‌گرم در گرم خشک گیاه به دست آمد. طبق نتایج به دست آمده، گیاه سالیکورنیا بیشترین مقدار انباشت فسفات را در اندام‌های خود داشت که این موضوع را می‌توان به تعداد بیشتر ریزوم‌ها، گسترش بیشتر سیستم ریشه و تمایل به جذب و خصوصیات فیزیولوژی در گیاه سالیکورنیا که یک گیاه هالوفیت است، دانست. پژوهش‌های پیشین نشان داده است که گیاهان هالوفیتی کاربرد مناسبی در گیاه‌پالایی منابع آب دارند. کومار و همکاران در بررسی ویژگی‌های بیولوژیکی گیاه سالیکورنیا بیان نمود که سالیکورنیا پتانسیل اقتصادی و بهره‌وری بالایی در شرایط نامساعد دارد و می‌تواند رشد بسیار خوبی در آب‌های غنی از مواد مغذی داشته باشد (Kumar et al., 2018).

۳-۳- ترکیب بهینه و اقتصادی بستر منتخب با شن

جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری روزانه غلظت باقیمانده فسفات پساب خروجی از لوله انتهایی تالاب‌ها را برای ۳ ترکیب مختلف بستر، در



جدول ۳- نتایج اندازه گیری روزانه غلظت باقیمانده فسفات پساب خروجی از لوله انتهایی تالاب ها را برای ۳ ترکیب مختلف بستر

Table 3. Results of Daily Measurement of the residual concentration of phosphate effluent from the end pipe of the wetlands for 3 different bedding compositions

Day	Percentage of use of pumice and zeolite aggregates in bed					
	5%		10%		15%	
	Residual concentration	Removal percentage	Residual concentration	Removal percentage	Residual concentration	Removal percentage
1	0.09	99.1	0.05	99.5	0.02	99.8
2	0.11	98.9	0.05	99.5	0.02	99.8
3	0.16	98.4	0.05	99.5	0.02	99.8
4	0.25	97.5	0.06	99.4	0.02	99.8
5	0.36	96.4	0.07	99.3	0.02	99.8
6	0.49	95.1	0.08	99.2	0.03	99.7
7	0.66	93.4	0.09	99.1	0.03	99.7
8	0.84	91.6	0.11	98.9	0.03	99.7
9	1.05	89.5	0.13	98.7	0.04	99.6
10	1.34	86.6	0.15	98.5	0.04	99.6
11	1.76	82.4	0.17	98.3	0.05	99.5
12	2.76	72.4	0.19	98.1	0.06	99.4
13	4.14	58.6	0.21	97.9	0.07	99.3
14	6.48	35.2	0.23	97.7	0.08	99.2
15	9.50	5	0.26	97.4	0.09	99.1

بیولوژیکی مؤثر در راندمان حذف فسفات در زمان ماند ۱ روز در بیشترین شدت (۹۹/۶۰ درصد) قرار دارد و همین دلیل به عنوان زمان ماند بهینه مناسب برای حذف فسفات در تالاب ساختگی در نظر گرفته شد. مجیری و همکاران در پژوهشی مشابه، اثر زمان ماند هیدرولیکی بر حذف فسفات را در یک تالاب با جریان زیر سطحی با لایه‌هایی از ژئولیت و صدف مورد آزمایش قرار دادند و بیشترین راندمان حذف را برابر با ۸۱/۴ درصد و در زمان ماند حدود ۲/۵ روز گزارش نمودند (Mojiri et al., 2017). همچنین دو و همکاران در پژوهشی با عنوان حذف فسفر توسط سیستم تالاب مصنوعی با بستر ماسه‌ای، بیشترین راندمان حذف فسفر را برابر با ۷۷ درصد و در زمان ماند هیدرولیکی برابر با ۳ روز گزارش نمودند (Du et al., 2017).

۳-۴- اثر زمان ماند هیدرولیکی بر راندمان حذف

نتایج بررسی اثر زمان ماند هیدرولیکی بر راندمان حذف فسفات در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق نتایج اندازه‌گیری‌های به عمل آمده، غلظت فسفات در نمونه خروجی در کلیه زمان ماندهای هیدرولیکی کمتر از حد مجاز تخلیه فسفات طبق استاندارد آژانس حفاظت از محیط زیست و کمتر از ۰/۱۵ میلی‌گرم در لیتر است. همچنین با بررسی نتایج به دست آمده با انجام آزمون آماری آنالیز واریانس و مقایسه با روش Tukey، هر چند که با افزایش زمان ماند درصد راندمان حذف افزایش یافت، اما زمان ماند ۱ روز با زمان ماندهای بعد از آن اختلاف معنی‌داری نداشت، بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که سینتیک فرایندهای فیزیکی و



۳-۴-۱- بررسی بیلان جرمی و سهم گیاه در حذف فسفات در زمان ماندنهای هیدرولیکی متفاوت

به منظور بررسی بیلان جرمی فسفات، مقدار فسفات ورودی و خروجی تالابها بر اساس حجم و غلظت پساب ورودی و خروجی محاسبه شد و با توجه به مقدار فسفات اندازه گیری شده در بافت گیاهان به روش هضم تر، سهم هر کدام از عوامل بستر و گیاه محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

بررسی نتایج نشان می دهد که بخش قابل توجهی (بیشتر از ۹۰ درصد) از مقدار فسفات توسط بستر جذب می شود و بخش کمتری نیز توسط گیاهان (در محدوده ۱/۲۲ - ۹/۱۴ درصد) جذب و یا به صورت پساب خروجی از تالابها خارج می شود. همچنین بررسی نتایج سهم گیاه نشان داد که با افزایش زمان ماند، درصد سهم گیاه در جذب فسفات افزایش می یابد که این در نتیجه افزایش تماس ریشه گیاهان انتخابی با آلاینده و افزایش تبادل یون بین گیاهان و محلول آبی است. با این حال با توجه به نتایج به دست آمده غلظت خروجی تالابها در جدول ۴، این افزایش سهم گیاه تأثیر معنی داری در غلظت ثانویه آلاینده خروجی از تالابها ندارد. بنابراین جذب بستر به عنوان فرایند اصلی حذف فسفات در این سیستم شناخته می شود. نتایج مشابهی توسط Zhao و همکاران و سایر محققان در این زمینه گزارش شده است (Allende et al., 2014, Zhao et al., 2016).

علاوه بر این، میزان فسفات جذب شده توسط گیاهان سالیکورنیا در هر یک از بلوک های تالاب با توجه به غلظت فسفات

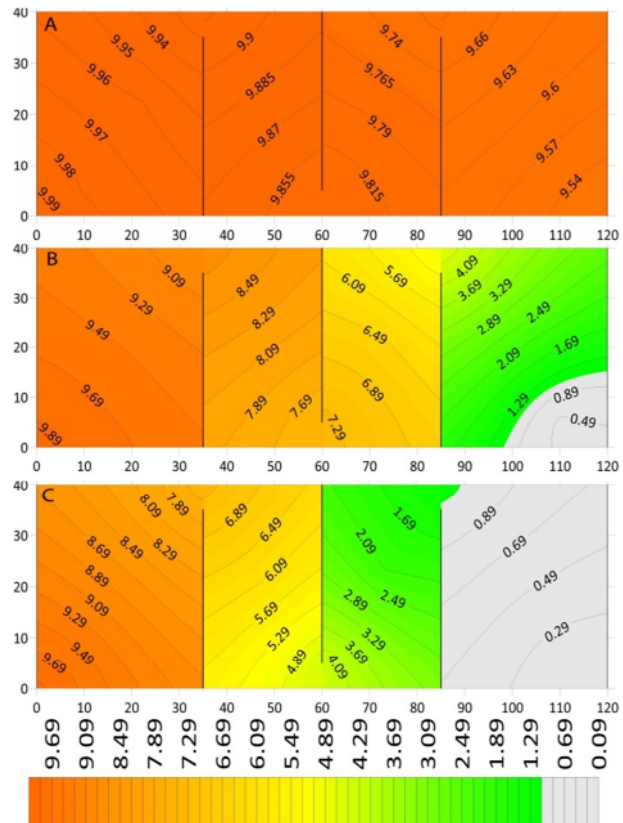


Fig. 5. 2-D contour plot (depth, distance) of phosphate removal in the constructed wetland at the end of the 15th day (A: Combination of 5% of the selected bedding - 95% of the gravel, B: Combination of 10% of the selected bedding - 90% of the gravel, C: Combination of 15% of the selected bedding - 85% of the gravel)

شکل ۵- خطوط کنتور ۲ بعدی (عمق، فاصله) حذف فسفات در تالاب ساختگی در انتهای روز ۱۵ ام (A: ترکیب ۵ درصد بستر منتخب - ۹۵ درصد شن، B: ترکیب ۱۰ درصد بستر منتخب - ۹۰ درصد شن، C: ترکیب ۱۵ درصد بستر منتخب - ۸۵ درصد شن)

جدول ۴- اثر تغییرات زمان ماند هیدرولیکی بر راندمان حذف فسفات

Table 4. Effect of changes in hydraulic residence time on the phosphate removal

Removal percentage *	Secondary concentration (mg/L)*	Initial concentration (mg/L)	Hydraulic residence time (day)
0.20 a ± 99.60	0.020 a ± 0.04	10	1
0.17 a ± 99.70	0.020 a ± 0.03	10	3
0.10 a ± 99.80	0.020 a ± 0.02	10	5
0.11 a ± 99.83	0.020 a ± 0.016	0	40

*Each mean ± standard deviation value was obtained from the three repetitions. Various letters in each specific column indicate significant difference in confidence level of 0.95 ($P < 0.05$).



جدول ۵- بررسی بیلان جرمی در تالاب ساختگی

Table 5. Investigation of mass balance in constructed wetland

Total phosphate removed (mg)	Percentage share of the substrate	Percentage share of plant	Amount of phosphate remaining in the wetland bed (mg)	Amount of phosphate absorbed by the plant (mg)	Amount of phosphate output (mg)	Amount of phosphate inlet (mg)	Hydraulic residence time (day)
1018.40	98.74	1.22	1005.88	12.52	026	1018.67	1
1046.99	96.65	3.32	1012.13	34.86	0.21	1047.21	3
1075.60	94.80	5.17	1019.91	55.69	0.14	1075.75	5
1147.03	90.85	9.14	1042.15	104.88	0.068	1147.10	10

جدول ۶- میزان فسفات جذب شده توسط اندام های هوایی و زمینی گیاهان در هر بلوک

Table 6. Amount of phosphate absorbed by the aerial and terrestrial organs of plants per block

Hydraulic residence time (day)	Aerial and terrestrial plant	The amount of phosphate absorbed (mg/g)			
		Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
1	Aerial parts	0.092	0.028	0.014	0.002
	Terrestrial parts	0.066	0.022	0.011	0.001
3	Aerial parts	0.259	0.080	0.034	0.005
	Terrestrial parts	0.192	0.067	0.029	0.004
5	Aerial parts	0.419	0.127	0.049	0.006
	Terrestrial parts	0.318	0.109	0.044	0.005
10	Aerial parts	0.799	0.233	0.084	0.010
	Terrestrial parts	0.627	0.210	0.078	0.009

مناسب، مقدار فتوسنتز بیشتر و جذب آلاینده‌ها بیشتر است (Smith, 2007).

۳-۵- اثر تغییرات دمایی بر راندمان حذف

نتایج بررسی اثر تغییرات دمایی بر راندمان حذف فسفات در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین شکل ۶ خطوط کنتور ۲ بعدی حذف فسفات در تالاب ساختگی توسط مدل درونیایی کریجینگ را در انتهای روز ۱۵ ام و با زمان ماند ۱ روزه نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان داد که با تغییرات فصلی و افزایش دما، راندمان و کارایی حذف فسفات در سیستم تالاب افزایش می‌یابد به طوری که راندمان حذف از اسفند ۹۶ (دمای ۲۰ درجه سلسیوس) تا تیرماه ۹۷ (دمای ۴۰ درجه سلسیوس) به میزان ۱ درصد افزایش یافت که نشان دهنده تأثیر تغییرات دمایی بر کارایی سیستم تالاب است. علاوه بر آن میزان فسفات جذب شده توسط گیاه سالیکورنیا در هر یک از بلوک‌های تالاب با توجه به شرایط دمایی و غلظت فسفات انباشت شده در اندام هوایی و زمینی بر حسب میلی‌گرم در گرم

انباشت شده در اندام هوایی و زمینی بر حسب میلی‌گرم در گرم بافت خشک اندام هوایی و زمینی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان داد که مقدار فسفات جذب شده در اندام‌های هوایی و زمینی گیاهان واقع در بلوک‌های ابتدایی نسبت به بلوک‌های انتهایی دارای افزایش قابل ملاحظه‌ای است که علت آن را می‌توان به افزایش زمان تماس ریشه گیاهان با محلول و بیشتر بودن غلظت آلاینده در بلوک‌های ابتدایی ذکر نمود. نتایج مشابهی تاکنون توسط سایر پژوهشگران در خصوص رابطه مستقیم جذب فسفات با زمان ماند و افزایش غلظت آلاینده توسط گیاهان ارائه شده است (Lu et al., 2018, Shardendu et al., 2012). همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که در هر چهار زمان ماند، بیشترین انباشت فسفات در اندام هوایی گیاه سالیکورنیا ذخیره می‌شود. یکی از دلایل عنوان شده در این زمینه این است که اندام‌های هوایی دارای مقدار آب بیشتر و واکوئل‌های بزرگ‌تری هستند، بنابراین میزان فسفات بیشتری در این قسمت انباشت می‌شود (Shengxiu, 1996). دلیل دیگر این است که در شدت نور



جدول ۷- اثر تغییرات دمایی بر راندمان حذف فسفات

Table 7. Effect of temperature variations on phosphate removal efficiency

Time of the experiment	Average temperature (°C)	Initial concentration (mg/L)	Secondary concentration (mg/L)	Removal percentage
March 2018	20	10	0.18	98.20
May 2018	29	10	0.12	98.80
July 2018	40	10	0.08	99.20

جدول ۸- میزان فسفات جذب شده توسط اندام‌های هوایی و زمینی گیاهان در هر بلوک در فصل‌های مختلف

Table 8. Phosphate absorbed by the aerial and terrestrial organs of plants per block in different seasons

Hydraulic residence time (day)	Aerial and terrestrial plant	The amount of phosphate absorbed (mg/g)			
		Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
March 2018	Aerial parts	1.61	0.82	0.41	0.20
	Terrestrial parts	1.11	0.63	0.32	0.16
May 2018	Aerial parts	1.68	0.84	0.41	0.21
	Terrestrial parts	1.19	0.66	0.34	0.17
July 2018	Aerial parts	1.80	0.89	0.42	0.21
	Terrestrial parts	0.31	0.71	0.34	0.18

بافت خشک اندام هوایی و زمینی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش تدریجی دما ناشی از تغییر فصل‌ها، میزان انباشت فسفات در گیاهان کشت شده در سیستم تالاب به‌خصوص در بلوک‌های ابتدایی افزایش یافته است. در نهایت با توجه به نتایج به‌دست آمده، علت افزایش راندمان حذف فسفات توسط افزایش دما در سیستم تالاب ساختگی را می‌توان با ۲ عامل توجیه نمود: ۱- گرم‌گیر بودن فرایند جذب فسفات توسط بستر تهیه شده ۲- افزایش تخرق در گیاهان و در نتیجه جذب بیشتر آلاینده توسط گیاهان.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌طور خلاصه نتایج زیر حاصل شد:

۱- حداکثر ظرفیت جذب فسفات در بسترهای کاندید شده در محدوده بین ۰/۰۹۵ تا ۱/۰۲ میلی‌گرم بر گرم به‌دست آمد که کمترین مقدار مربوط به سنگدانه‌های شن و بیشترین مقدار مربوط سنگدانه‌های پامیس پوشش داده شده توسط نانوذرات ژئولیت بود که به‌عنوان بستر منتخب برای قرارگیری در سیستم تالاب انتخاب شد.

۲- بیشترین ظرفیت جذب فسفات در گیاهان کاندید شده در تیمارهای سطح بالای غلظت فسفات (۲۸ میلی‌گرم در لیتر)

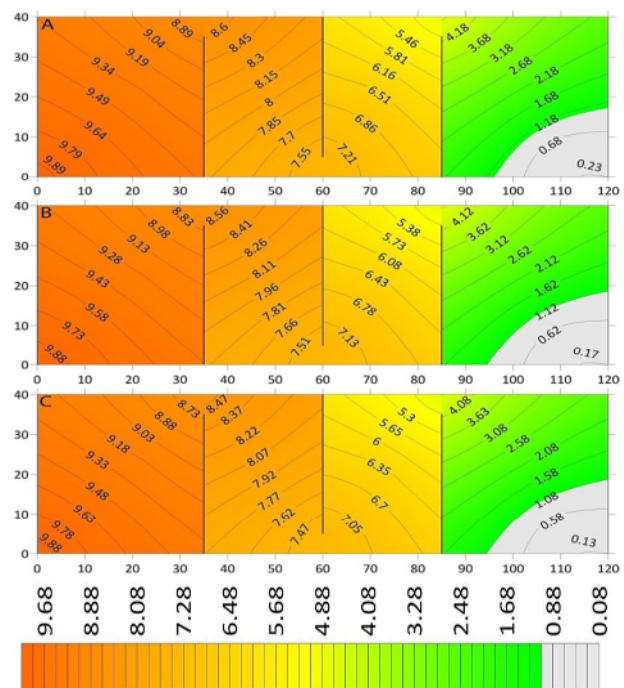


Fig. 6. 2-D contour plot (depth, distance) of phosphate removal in the constructed wetland at the end of the 15th day and different temperature conditions (A: March, Temperature= 20°C; B: May, Temperature= 29°C; C: July, Temperature= 40°C)

شکل ۶- خطوط کنتور ۲ بعدی (عمق، فاصله) حذف فسفات در تالاب ساختگی در انتهای روز ۱۵ ام و شرایط دمایی متفاوت (A: اسفندماه- دمای ۲۰ درجه سلسیوس، B: اردیبهشت‌ماه- دمای ۲۹ درجه سلسیوس، C: تیرماه- دمای ۴۰ درجه سلسیوس)



دمایی بر کارایی سیستم تالاب است.

۶- یکی از دلایل دیگر راندمان بالای حذف فسفات در سیستم تالاب ساخته شده در این پژوهش را نیز می توان به نصب ترکیبی از بافل ها (موانع) در تالاب های ساختگی نسبت داد که با توجه به هدایت حرکت آب به صورت جریان رو به بالا و جریان رو به پایین، طول مسیر حرکت فاضلاب را در سیستم افزایش می دهد و به این ترتیب موجب افزایش کارایی حذف آلاینده ها می شود.

در پایان کاربرد سیستم های مرسوم تصفیه فاضلاب در واحدهای کشاورزی و صنعتی بسیار پرهزینه است، بنابراین در صورت در دسترس بودن زمین کافی، استفاده از سیستم های تالاب مصنوعی با جریان زیر سطحی مناسب و مقرون به صرفه است.

۵- قدردانی

مقاله حاضر بخشی از رساله دوره دکترای مهندسی و مدیریت منابع آب مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر است که نویسندگان از حمایت این دانشگاه تشکر می کنند.

مشاهده شد که این مقدار برای گیاهان سالیکورنیا، سازو و لویی به ترتیب ۹/۶۸، ۶/۳۷ و ۷/۶۸ میلی گرم در گرم خشک گیاه به دست آمد که گیاه سالیکورنیا بیشترین مقدار انباشت فسفات را در اندام های خود داشت و به عنوان گیاه منتخب به منظور کشت در سیستم تالاب انتخاب شد.

۳- با توجه به استفاده از حداکثر ظرفیت جذب فسفات در ترکیب بستر ۱۰ درصدی بستر منتخب، این ترکیب بستر به عنوان بهترین و اقتصادی ترین گزینه در حذف فسفات انتخاب گردید.

۴- نتایج بررسی اثر زمان ماند هیدرولیکی در جذب فسفات نشان داد که سینتیک فرایندهای فیزیکی و بیولوژیکی مؤثر در راندمان حذف فسفات در زمان ماند ۱ روزه در بیشترین شدت (۹۹/۶۰ درصد) قرار دارد و به عنوان زمان ماند بهینه مناسب برای حذف فسفات انتخاب شد.

۵- بررسی نتایج اثر تغییرات دمایی در کارایی سیستم تالاب نشان داد که با تغییرات فصلی و افزایش دما، راندمان حذف فسفات افزایش می یابد به طوری که راندمان حذف از اسفند ۹۶ تا تیرماه ۹۷ به میزان ۱ درصد افزایش یافت که نشان دهنده تأثیر تغییرات

References

- Allende, K. L., McCarthy, D. & Fletcher, T. 2014. The influence of media type on removal of arsenic, iron and boron from acidic wastewater in horizontal flow wetland microcosms planted with *Phragmites australis*. *Chemical Engineering Journal*, 246, 217-228.
- Andrés, E., Araya, F., Vera, I., Pozo, G. & Vidal, G. 2018. Phosphate removal using zeolite in treatment wetlands under different oxidation-reduction potentials. *Ecological Engineering*, 117, 18-27.
- Austin, D., Madison, M., Chakraborti, R., Mecham, J. & Baird, J. 2018. Improving phosphorus removal in a surface flow wetland and land application system by geochemical augmentation with alum. *Science of the Total Environment*, 643, 1091-1097.
- Babatunde, A., Zhao, Y. & Zhao, X. 2010. Alum sludge-based constructed wetland system for enhanced removal of P and OM from wastewater: concept, design and performance analysis. *Bioresource Technology*, 101, 6576-6579.
- Barca, C., Roche, N., Troesch, S., Andres, Y. & Chazarenc, F. 2018. Modelling hydrodynamics of horizontal flow steel slag filters designed to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 206, 349-356.
- Bowman, R. S. 2003. Applications of surfactant-modified zeolites to environmental remediation. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61, 43-56.
- Chang, J., Ma, L., Chen, J., Lu, Y. & Wang, X. 2017. Greenhouse wastewater treatment by baffled subsurface-flow constructed wetlands supplemented with flower straws as carbon source in different modes. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 1578-1587.
- Cheng, G., Li, Q., Su, Z., Sheng, S. & Fu, J. 2018. Preparation, optimization, and application of sustainable ceramsite substrate from coal fly ash/waterworks sludge/oyster shell for phosphorus immobilization in constructed wetlands. *Journal of Cleaner Production*, 175, 572-581.



- De Rozari, P., Greenway, M. & El Hanandeh, A. 2018. Nitrogen removal from sewage and septage in constructed wetland mesocosms using sand media amended with biochar. *Ecological Engineering*, 111, 1-10.
- Du, L., Chen, Q., Liu, P., Zhang, X., Wang, H., Zhou, Q., et al. 2017. Phosphorus removal performance and biological dephosphorization process in treating reclaimed water by Integrated Vertical-flow Constructed Wetlands (IVCWs). *Bioresource Technology*, 243, 204-211.
- Fang, C., Zhang, X., Lei, Y., Yuan, Y. & Xiang, Y. 2018. Nitrogen removal via core-shell bio-ceramic/Zn-layer double hydroxides synthesized with different composites for domestic wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 181, 618-630.
- Ghasemi, S., Derikvand, E., Khoshnavaz, S., Boroomand Nasab, S. & Solimani Babarsad, M. 2019. Investigating the efficiency of surfactant-modified Zeolites@Pumice to remove phosphate from synthetic wastewater using Box-Behnken design. *Desalination and Water Treatment*, 139, 254-267.
- Higgins, D., Curtin, T., Burke, I. & Courtney, R. 2018. The potential for constructed wetland mechanisms to treat alkaline bauxite residue leachate: carbonation and precipitate characterisation. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 1-8.
- Hua, T., Haynes, R. & Zhou, Y.-F. 2018. Potential use of two filter media in constructed wetlands for simultaneous removal of As, V and Mo from alkaline wastewater-batch adsorption and column studies. *Journal of Environmental Management*, 218, 190-199.
- Hua, T. & Haynes, R. J. 2016. Constructed wetlands: fundamental processes and mechanisms for heavy metal removal from wastewater streams. *International Journal of Environmental Engineering*, 8, 148-178.
- Huang, Y., Lee, X., Grattieri, M., Macazo, F. C., Cai, R. & Minter, S. D. 2018. A sustainable adsorbent for phosphate removal: modifying multi-walled carbon nanotubes with chitosan. *Journal of Materials Science*, 53, 12641-12649.
- Jiang, L., Wang, M., Wang, Y., Liu, F., Qin, M., Zhang, Y., et al. 2018. The condition optimization and mechanism of aerobic phosphorus removal by marine bacterium *Shewanella sp.* *Chemical Engineering Journal*, 345, 611-620.
- Kasak, K., Truu, J., Ostonen, I., Sarjas, J., Oopkaup, K., Paiste, P., et al. 2018. Biochar enhances plant growth and nutrient removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 639, 67-74.
- Khoshnavaz, S., Boroomand Nasab, S. & Moazed, H. 2014. Investigation on nitrate removal efficiency of Karun agro-industry agricultural wastewater at surface flow constructed wetland with cultivated vetiver grass. *Wetland Ecology*, 6, 5-14.
- Kim, K., Kim, K., Asaoka, S., Lee, I.-C., Kim, D.-S. & Hayakawa, S. 2018. Quantitative measurement on removal mechanisms of phosphate by class-F fly ash. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, doi: 10.1080/19392699.2018.1428192.
- Kumar, A., Abraham, E. & Gupta, A. 2018. Alternative biomass from saline and semiarid and arid conditions as a source of biofuels: Salicornia. *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming*, New Delhi: Springer India.
- Lan, W., Zhang, J., Hu, Z., Ji, M., Zhang, X., Zhang, J., et al. 2018. Phosphorus removal enhancement of magnesium modified constructed wetland microcosm and its mechanism study. *Chemical Engineering Journal*, 335, 209-214.
- Li, R., Wang, J. J., Zhou, B., Awasthi, M. K., Ali, A., Zhang, Z., et al. 2016. Recovery of phosphate from aqueous solution by magnesium oxide decorated magnetic biochar and its potential as phosphate-based fertilizer substitute. *Bioresource Technology*, 215, 209-214.
- Li, R., Wang, J. J., Zhou, B., Zhang, Z., Liu, S., Lei, S., et al. 2017. Simultaneous capture removal of phosphate, ammonium and organic substances by MgO impregnated biochar and its potential use in swine wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 147, 96-107.



- Lu, B., Xu, Z., Li, J. & Chai, X. 2018. Removal of water nutrients by different aquatic plant species: An alternative way to remediate polluted rural rivers. *Ecological Engineering*, 110, 18-26.
- Luo, W., Hai, F. I., Price, W. E., Guo, W., Ngo, H. H., Yamamoto, K., et al. 2016. Phosphorus and water recovery by a novel osmotic membrane bioreactor–reverse osmosis system. *Bioresource Technology*, 200, 297-304.
- Mojiri, A., Ahmad, Z., Tajuddin, R. M., Arshad, M. F., & Gholami, A. 2017. Ammonia, phosphate, phenol, and copper (II) removal from aqueous solution by subsurface and surface flow constructed wetland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 337.
- Nakhaeipour, M., Shojaee Farah Abadi, H., Najarian, F., Safinezhad, M. & Irvani, H. 2017. Determining the efficiency of zsm5-zeolite impregnated with nanoparticles of titanium dioxide in the photocatalytic removal of styrene vapors. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*, 3, 61-67.
- Nir, O., Sengpiel, R. & Wessling, M. 2018. Closing the cycle: phosphorus removal and recovery from diluted effluents using acid resistive membranes. *Chemical Engineering Journal*, 346, 640-648.
- Postila, H., Karjalainen, S. M. & Kløve, B. 2017. Can limestone, steel slag or man-made sorption materials be used to enhance phosphate-phosphorus retention in treatment wetland for peat extraction runoff with low phosphorous concentration? *Ecological Engineering*, 98, 403-409.
- Saltan, M. & Findik, F. S. 2008. Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement. *Building and Environment*, 43, 415-421.
- Shardendu, S., Sayantan, D., Sharma, D. & Irfan, S. 2012. Luxury uptake and removal of phosphorus from water column by representative aquatic plants and its implication for wetland management. *ISRN Soil Science*, 2012, 1-9.
- Sheng-Bing, H., Li, Y., Hai-Nan, K., Zhi-Ming, L., De-Yi, W. & Zhan-Bo, H. 2007. Treatment efficiencies of constructed wetlands for eutrophic landscape river water. *Pedosphere*, 17, 522-528.
- Shengxiu, W. Z. L. 1996. Relationships between nitrate contents and water, total N as well as total P in different organs of vegetable plants. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2, 144-152.
- Smith, E. N. 2007. Water cress (*Nasturtium officinale*) production utilizing brook trout (*Salvelinus fontinalis*) flow-through aquaculture effluent. MSc Thesis, West Virginia University, USA.
- Tee, H.-C., Lim, P.-E., Seng, C.-E., Nawi, M. A. M. & Adnan, R. 2015. Enhancement of azo dye Acid Orange 7 removal in newly developed horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Journal of Environmental Management*, 147, 349-355.
- Wang, H., Dong, W., Li, T. & Liu, T. 2015. A modified BAF system configuring synergistic denitrification and chemical phosphorus precipitation: examination on pollutants removal and clogging development. *Bioresource Technology*, 189, 44-52.
- Wen, Z.-D., Wu, W.-M., Ren, N.-Q. & Gao, D.-W. 2016. Synergistic effect using vermiculite as media with a bacterial biofilm of *Arthrobacter sp.* for biodegradation of di-(2-ethylhexyl) phthalate. *Journal of Hazardous Materials*, 304, 118-125.
- Xue, R., Xu, J., Gu, L., Pan, L. & He, Q. 2018. Study of phosphorus removal by using sponge Iron adsorption. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229, 161.
- Yakar, A., Türe, C., Türker, O. C., Vymazal, J. & Saz, Ç. 2018. Impacts of various filtration media on wastewater treatment and bioelectric production in up-flow constructed wetland combined with microbial fuel cell (UCW-MFC). *Ecological Engineering*, 117, 120-132.
- Zafari, F., Amiri, M. & Vatanpour Azghandi, A. 2014. Physiological response of pear (*Pyrus Communis* cv.Dargazi) to salinity stress under in vitro conditions. *Journal of Horticulture Science*, 28, 594-599.
- Zhang, L., Liu, J. & Guo, X. 2018. Investigation on mechanism of phosphate removal on carbonized sludge adsorbent. *Journal of Environmental Sciences*, 64, 335-344.
- Zhao, J., Zhao, Y., Xu, Z., Doherty, L. & Liu, R. 2016. Highway runoff treatment by hybrid adsorptive media-baffled subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 91, 231-239.

