Gonbad Kavous University
Journal of New Approaches in
Water Engineering and Environment
Volume 1, Issue 1

Improving the quality of urban Wastewater using combination of phytoremediation and porous concrete

Jahangir Abedi-Koupai*, Afshin Baniasadi [2], Mohammad Mehdi Dorafshan [3]

[1] Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
[2] Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
[3] Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 19.02.2022; Accepted:30.04.2022

Abstract

The combination of phytoremediation and porous concrete is a new technology used as a natural purification of porous concrete and resistant plants to remove or reduce the concentration of pollutants. In this study, the performance of porous concrete as a bed and plant on reduction of urban effluent pollution has been investigated. A channel with dimensions of 9 meters length, 30 cm wide and 20 cm height was constructed along with the wastewater treatment lagoon of Isfahan University of Technology. Then, blocks were made of porous concrete with dimensions of 30 × 30 × 15 cm, and were placed in the channel. The vetiver grass with two different densities (12 and 27 plants) were placed between the porous concrete blocks. After 5, 7 and 9 hours, the wastewater samples were taken from the inlet and outlet basins. The reduction of BOD, COD, TSS and total coliform during the 5 hours retention time were 16.1, 27.5, 20.6, and 19.1 percent, respectively. In the retention time of 7 hours, reduction was equal to 20.5, 33, 26.1 and 25.3 percent, respectively. The reduction of BOD, COD, TSS and total coliform during the 9 hours retention time were 25.9, 38.5, 31.9 and 30.5 percent, respectively. In general, this research showed the performance of system was optimistic in reduction of BOD, COD, TSS and Total coliform.

Keywords: **Bioremediation, Wastewater, Porous concrete, Vetiver**

* Corresponding author, Email:koupai@cc.iut.ac.ir

دانشگاه گنبد کاووس
نشریه "رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست"
دوره اول، شماره اول
http:// Nawee.gonbad.ac.ir

بهبود کیفیت فاضلاب شهری با استفاده از روش توأم گیاه‌پالایی و بتن متخلخل

جهانگیرعابدی‌کوپایی[۱*]، افشین بنی اسدی[۲]، محمدمهدی درافشان[۳]

[۱] استاد گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
[۲] دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی آب- سازه‌های آبی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
[۳] دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی آب- مهندسی منابع آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

چکیده

ترکیب گیاه‌پالایی و بتن متخلخل فناوری جدیدی است که در آن با عنوان تصفیه‌ی طبیعی از بتن متخلخل و گیاهان مقاوم برای حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش عملکرد بتن متخلخل همراه با مواد افزودنی، همچون پوکه معدنی و پرلیت به‌عنوان بستر و گیاه وتیور بر روی پساب شهری بررسی شده است. کانالی با ابعاد ۹ متر طول، ۳۰ سانتی‌متر عرض و ۲۰ سانتی‌متر ارتفاع، طراحی شد و در حاشیه‌ی لاگون تصفیه‌ی پساب دانشگاه صنعتی اصفهان ساخته شد. مکعب مستطیل‌هایی از بتن متخلخل با ابعاد ۳۰×۳۰×۱۵ سانتی‌متر (به‌ترتیب طول، عرض و ارتفاع) ساخته و در کانال مذکور قرار داده شدند. گیاه مورد نظر با دو تراکم متفاوت (۱۲ و ۲۷ بوته‌ی گیاه) در بین بتن‌ها قرار داده شد. پس از گذشت زمان‌های ماند مورد نظر (۵، ۷ و ۹ ساعت) جریان پساب از حوضچه‌ی ورودی و خروجی نمونه‌برداری شد و آزمایش‌های تعداد کل کلی‌فرم، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) و کل جامدات معلق (TSS) بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. اثر بتن متخلخل، تراکم گیاهی و زمان ماند با استفاده از طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. به‌طور متوسط در زمان ماند ۵ ساعت BOD، COD، TSS و کلی‌فرم به‌ترتیب ۱۶/۱، ۲۷/۵، ۲۰/۶ و ۱۹/۱ درصد کاهش یافت. همچنین به‌طور متوسط در زمان ماند ۷ ساعت BOD، COD، TSS و کلی‌فرم به‌ترتیب ۲۰/۵، ۳۳، ۲۶/۱ و ۲۵/۳ درصد کاهش یافت. در زمان ماند ۹ ساعت نیز به‌طور متوسط BOD، COD، TSS و کلی‌فرم به‌ترتیب ۲۵/۹، ۳۸/۵، ۳۱/۹ و ۳۰/۵ درصد کاهش یافت. در مجموع این طرح در حذف BOD، COD و TSS موفق عمل نمود و در حذف کلی‌فرم نیز عملکرد خوبی داشته است.

کلمات کلیدی: زیست‌پالایی، پساب، بتن متخلخل، وتیور.

* نویسنده مسئول، Email:koupai@cc.iut.ac.ir

مقدمه

مدیریت صحیح و جامع آب و فاضلاب که برای سلامت انسان و توسعه‌ی اقتصادی لازم است، در بسیاری از کشورهای دنیا مسأله‌ای بسیار بحرانی است. اگرچه در کشورهای صنعتی کنترل آب و فاضلاب به حدی تقریباً استانداردی رسیده است، در کشورهای کم‌درآمد و با درآمد متوسط، هنوز مشکلات زیادی در مورد تأمین آب و مدیریت فاضلاب وجود دارد (Wilderer and Schreff, 2000). در کشورهای خاورمیانه که بیشتر آن‌ها در ناحیه‌ی خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، استفاده‌ی مجدد از فاضلاب تصفیه-شده در کشاورزی هر روز اهمیت بیشتری می‌یابد، زیرا در اغلب این کشورها، بخش کشاورزی مهم‌ترین مصرف‌کننده‌ی آب است. در حال حاضر در بسیاری از شهرهای ایران، فاضلاب‌های خانگی و روان‌آب‌های سطحی و بعضاً پساب‌های صنعتی پس از خروج از شهر، در زمین‌های کشاورزی پایین‌دست استفاده می‌شود (Siahi et al., 2010). امروزه استفاده از پساب حتی به‌عنوان یکی از منابع آب قابل استفاده در کشاورزی نیز حائز اهمیت است. پساب جزء آب‌های شیرین در جهان طبقه‌بندی می‌شود. ۹۹ درصد پساب را آب و فقط ۱ درصد آن را سایر موارد تشکیل می‌دهد (Abedi-Koupai and Mohri, 2012). استفاده از پساب تصفیه‌شده برای آبیاری، باعث کاهش استفاده از آب‌هایی است که علاوه بر مصرف در بخش آبیاری می‌توانند در صورت تصفیه بسیار پیشرفته به مصارف دیگری نظیر شرب برسند. علاوه بر این، کاهش هزینه‌ی استفاده از کودهای شیمیایی، از مزایای دیگر استفاده از پساب در آبیاری است. در صورتی که از پساب به‌طور صحیح استفاده شود، ضمن آن‌که می‌تواند مشکلات ناشی از شیوع آلودگی در سطح محیط‌زیست و منابع آب را کنترل نماید، به واسطه‌ی مواد مغذی موجود در آن، باعث بهبود رشد گیاهان نیز می‌شود. گیاه‌پالایی فن‌آوری نسبتاً جدیدی است که در آن از گیاهان مقاوم برای حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌های آلی، معدنی و ترکیبات خطرناک محیط‌زیست، از جمله فلزات سنگین، مواد نفتی و علف‌کش‌ها استفاده می‌شود. گیاه‌پالایی به‌دلیل مقرون بودن از لحاظ اقتصادی، مصرف انرژی کم و سازگاری با محیط مورد توجه است (Noshadi and Valizadeh, 2016). گونه‌ی گیاهی که برای گیاه‌پالایی استفاده می‌شود باید دارای تحمل زیاد در برابر آلاینده‌ی مورد نظر باشد. بتن متخلخل از نظر زیست-محیطی مزایای فراوانی دارد که امروزه توجه خاصی به آن شده است. از مزایای بتن متخلخل در روسازی می‌توان به روسازی سازگار با محیط‌زیست، کاهش آلودگی صوتی (جذب انرژی صوتی)، بهبود وضعیت ایمنی (ضریب اصطکاک) و ممانعت از پدیده‌ی آب سطحی، کاهش شیب حرارتی، کاهش خطر تورم در اثر یخبندان و جلوگیری از روان‌آب سطحی اشاره کرد (Teimori et al., 2016).

Taghizadeh et al (2007)درپژوهشی نشان دادند که تصفیه‌ی کند افقی با بتن متخلخل به‌دلیل رشد توده‌های بیولوژیکی برای از بین بردن باکتری‌ها مناسب است، به-طوری‌که استفاده از بتن متخلخل باعث کاهش ۱۰۰-۹۰ درصدی باکتری‌های کلی‌فرم می‌شود. در تحقیقی دیگر از پوکه معدنی پوشیده شده با دی‌اکسید تیتانیوم برای حذف باکتری‌های موجود در آب رودخانه استفاده کردند(Subrahmanyam et al., 2008). نتایج نشان داد که از بین بردن پاتوژن‌ها با نوع خاصی از رآکتور که در آن پوکه معدنی با دی‌اکسید تیتانیوم پوشش داده شده، روش مناسب و مفیدی برای تصفیه‌ی آب آشامیدنی و فاضلاب است. همچنین Choi et al (2010) در مطالعه‌ای نشان دادند که در صورت استفاده از بتن متخلخل به‌عنوان بیوفیلتر، BOD موجود در جریان خروجی به‌طور میانگین از ۱۰/۴ در جریان ورودی به ۲/۷ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. به این ترتیب بازده حذف BOD به‌طور متوسط ۷۴٪ بود.

در پژوهشی Oshunsanya et al (2012) به کاربرد گیاه وتیور در حذف عناصر سنگین پرداختند. نتایج نشان داد که میزان جذب کادمیوم توسط شاخه‌های وتیور (۳/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) از ریشه وتیور (۱/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) بیشتراست. اما میزان جذب سرب توسط ریشه (۳/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) بیشتر از شاخه‌ها (۱/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم)است. همچنین میزان سرب و کادمیوم، ۱۳ هفته پس از کشت وتیور به میزان ۷۵ تا ۸۲ درصد کاهش

می‌یابد. طی تحقیقاتی در کشور سوئیس، (Raman and Gnansounou, 2015) ارزیابی مزایای زیست‌محیطی سیستم پالایش زیستی توسط برگ‌های گیاه وتیور نسبت به سیستم‌های دیگر بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که در صورت استفاده از سیستم اتانول زیستی، انتشار دی‌اکسیدکربن و سوخت‌های فسیلی به میزان ۹۵ و ۲۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر (Maharjan and Pradhanag, 2017) نیز به بررسی قابلیت گیاه وتیور برای تصفیه‌ی پساب پرداختند. این مطالعه‌ی تجربی برای ارزیابی کارایی گیاهان وتیور در آب رودخانه بگماتی، در نپال انجام شد. نتایج نشان داد که در یک ماه، کل غلظت BOD، کلرید، نیترات، فسفات، سختی و قلیایی به‌ترتیب ۷۱/۰۳٪، ۴۲/۹۰٪، ۹۳/۹۳٪، ۸۸/۴٪، ۴۶/۴٪ و ۲۲/۲٪ کاهش یافت. در پژوهشی (Abedi-Koupai et al., 2020) حذف آلاینده‌ها از شیرابه‌ی زباله از گیاه وتیورگراس استفاده کردند. نتایج نشان داد کهمیزان کاهش COD، BOD، فسفات و نیترات پس از مدت ۲۱ روز برای مخزن حاوی گیاه وتیورگراس به‌ترتیب ۶۸، ۶۰، ۸۲ و ۸۳ درصد بود که حاکی از عملکرد خوب این گیاه در حذف آلاینده‌ها است.

توسعه‌ی شهرنشینی و صنعتی شدن، باعث تولید حجم عظیمی از پساب شده که مشکل اصلی در این زمینه، چگونگی دفع آن است؛ به‌طوری‌که مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی را به دنبال نداشته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که یکی از بهترین شیوه‌های دفع پساب، کاربرد آن در کشاورزی است. کاربرد پساب در کشاورزی نیازمند مدیریت خاصی است که ضمن بهره‌گیری مطلوب از آن مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی را در خاک، گیاه و منابع آبی سطحی و زیرزمینی نداشته باشد. هدف از این پژوهش بررسی عملکرد گیاه وتیور و بتن متخلخل به‌عنوان بستری متخلخل و با قابلیت جذب عناصر به‌منظور حذف آلاینده‌های پساب شهری است. به‌علت مقاومت زیاد گیاه وتیور در وضعیت نامساعد آب و هوایی، مهاجم نبودن و توانایی قابل توجه در جذب عناصر، این‌گونه گیاه انتخاب گردید. به‌عبارتی در این پژوهش پساب عبوری از بتن متخلخل و گیاه وتیور عبور کرده، با درنظرگرفتن زمان‌های ماند کوتاه‌تر، میزان حذف آلاینده‌ها در پساب خروجی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در محل تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب دانشگاه صنعتی اصفهان با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۸ دقیقه‌ی شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۲ دقیقه‌ی شمالی و ارتفاع ۱۶۰۴ متر از سطح دریا و در حاشیه‌ی لاگون‌های تصفیه‌ی پساب اجرا گردید. این پژوهش در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با هجده تیمار و سه تکرار در نظر گرفته شد. تیمارها طرح اختلاط بتن متخلخل بودند. برای این منظور از کانال نزدیک به تصفیه‌خانه به ابعاد ۹ متر طول، ۳۰ سانتی‌متر عرض و ۲۰ سانتی‌متر ارتفاع استفاده گردید. این کانال با سرامیک عایق‌بندی شده است. در ابتدا و انتهای کانال برای آرام شدن جریان ورودی و خروجی، دو حوضچه آرامش با ابعاد ۱/۵ m×۱/۵ m×۱/۵ m وجود دارد. جریان ورودی پساب به کمک یک سیفون معکوس از انتهای لاگون هوادهی ثانویه تأمین می‌شود که جریان را با شیر توپی پلیمری می‌توان قطع و وصل نمود. سپس مکعب مستطیل‌هایی از بتن متخلخل با طرح اختلاط‌های مفروض با ابعاد ۶۰×۳۰×۱۵ سانتی‌متر (به‌ترتیب ارتفاع، عرض و طول) ساخته شد. پس از عمل‌آوری، مکعب‌های بتنی در کانال مذکور قرار داده شدند. سپس گیاه مورد نظر با دو تراکم متفاوت (۱۲ و ۲۷ بوته گیاه) در بین بتن‌ها قرار داده شد. پس از گذشت زمان‌های ماند مورد نظر (۵، ۷ و ۹ ساعت) جریان پساب از حوضچه‌ی ورودی و خروجی نمونه‌برداری شد و آزمایش‌های تعداد کل کلی‌فرم، BOD، COD و TSS بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. به‌منظور رشد مجدد گیاهان وتیور، گیاهان از تالاب‌ها به آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان انتقال داده شدند. ابتدا گیاهان سرزنی شدند و به مدت یک ماه درون لاگون‌های پلاستیکی حاوی پساب قرار گرفتند. پس از این مدت، گیاهان مجدداً رشد نموده، آماده انتقال به مکان مورد نظر شدند. محل انتخاب‌شده حدود ۳ متر پایین‌تر از لاگون هوادهی تصفیه‌خانه بود، به‌همین دلیل با یک لوله‌ی

پلی‌اتیلنی ۶۳ میلی‌متری که به صورت سیفون معکوس درآورده شد، آبگیری از انتهای لاگون مذکور انجام گرفت. در انتهای لوله، یک عدد شیر توپی ۲ اینچی قرار گرفت تا آبگیری به آسانی صورت گیرد؛ سپس جریان پساب از طریق کمربند پلی‌اتیلنی ۱۶×۶۳ میلی‌متری به لوله‌ی پلی‌اتیلنی ۱۶ میلی‌متری انتقال یافت. انتهای لوله‌ی ۱۶ میلی‌متری با بست انتهایی مسدود شد و برای کنترل دبی، آب توسط قطره‌چکان وارد کانال گردید. در این پژوهش از قطره‌چکان‌های درون‌خط با دبی ثابت و با قابلیت خودشویندگی استفاده گردید. شکل‌های ۱ تا ۶، نمایی از فعالیت‌های مختلف را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش‌ها و ساخت نمونه‌ها از مصالحی نظیر سیمان، سنگدانه، پوکه معدنی، پرلیت و آب استفاده شده است. طرح اختلاط بتن شامل تعیین نسبت اجزای بتن (سیمان، آب، شن و ماسه) برای دستیابی به خواص مشخص است. در این پژوهش باید بتن بتواند به‌عنوان یک بستر برای رشد میکروارگانیسم‌ها بر روی خلل و فرج آن عمل کند. طرح اختلاط مذکور از آیین‌نامه ACI2113R که برای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن‌های با اسلامپ صفر تهیه شده است، انتخاب گردید (Abedi-Koupai, 2003). این طرح اختلاط مطابق جدول ۱ است.

پس از انتخاب طرح پایه، با توجه به مطالعات پیشین و توصیه‌های تجربی پژوهشگران، برای به‌دست‌آوردن طرح‌های اختلاط دیگر، ۱۰ درصد وزنی پوکه معدنی و ۱۰ درصد وزنی پرلیت به طرح اختلاط پایه افزوده می‌شود. به این ترتیب سه طرح اختلاط بتن برای انجام آزمایش‌ها در اختیار قرار دارد. در جدول ۲ مشخصات این طرح‌های اختلاط آمده‌است (Saghaeiyan nejad, 2012).

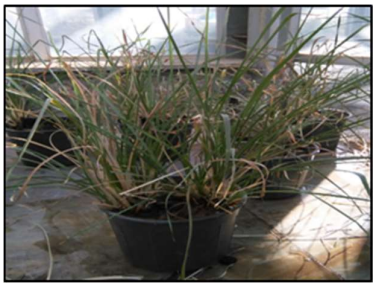
شکل ۱- نمایی از محل اجرای طرح

شکل ۲- لاگون هوادهی

شکل ۳- کانال آزمایش

شکل ۴- حوضچه‌ی ماند

شکل ۵- آبگیری از لاگون هوادهی تصفیه‌خانه به کانال



شکل ۶- نمونه‌ای از گیاه وتیور نگهداری‌شده در آزمایشگاه

جدول ۱- طرح اختلاط بتن

مقدار سنگدانه (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	W/C	تخلخل (٪)

۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳	۲۶

جدول ۲- مشخصات طرح اختلاط

شماره طرح اختلاط	مقدار سنگدانه (kg/m^3)	پوکه‌ی معدنی (kg/m^3)	پرلیت (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	W/C	تخلخل (درصد)
۱	۱۴۰۰	۰	۱۴۰	۳۳۰	۰/۳۵	۲۱
۲	۱۴۰۰	۱۴۰	۰	۳۳۰	۰/۳۵	۲۷
۳	۱۴۰۰	۰	۰	۳۳۰	۰/۳۵	۱۸

برای ساخت نمونه‌ها از یک دستگاه مخلوط‌کن مکانیکی متعلق به دفتر فنی دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد. بتن در سه لایه، داخل قالب ریخته شد و هر لایه با ۲۵ ضربه میله‌ی استاندارد متراکم گردید، همچنین به کمک ماله‌ی بنایی سطح قالب مسطح گردید. از هر طرح اختلاط ۶ مکعب نمونه تهیه شد. دوره‌ی عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آب ۲۸ روزاست. ایجاد بیوفیلم یا لایه‌ی زیستی بر روی خلل و فرج مکعب‌های بتنی را فرآوری می‌گویند. در واقع میکروارگانیسم‌های موجود در این لایه‌ی زیستی مواد غذایی موجود در پساب را مصرف می‌کنند، علاوه بر آن به‌علت آن‌که سطح لزج و چسبناک دارد، موجب جذب مواد و میکروارگانیسم‌های دیگر موجود در پساب می‌شود (Borghei and Kavousi, 2005). در این پژوهش روش قطع و وصل جریان پساب انتخاب گردید. به این ترتیب یک شوک رطوبتی به میکروارگانیسم‌های پساب وارد می‌شود؛ با این شوک میکروارگانیسم‌ها برای بقاء رو به تشکیل بیوفیلم می‌آورند (Torkan and Ahmadi, 2005). شکل‌های ۷ تا ۹ به‌ترتیب ساخت بتن با پوکه‌ی معدنی، پرلیت و فراوری بتن را نشان می‌دهد.

شکل ۷- آماده‌سازی ساخت بتن با پوکه‌ی معدنی

شکل ۸- آماده‌سازی ساخت بتن با پرلیت

شکل ۹- فراوری بتن متخلخل

زمان ماند اسمی در کانال مربوط که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، با استفاده از معادله‌ی ۱ محاسبه می‌گردد.

$$t=\frac{L\,W\,y\,n}{Q} \qquad (1)$$

در این معادله t زمان ماند بر حسب ساعت، L طول کانال بر حسب متر، W عرض کانال بر حسب متر، y عمق کانال بر حسب متر، n تخلخل بستر مورد استفاده در تالاب و Q دبی براساس مترمکعب در ساعت است (Crites et al., 2014). فرمول (۱)، زمان ماند هیدرولیکی را محاسبه می‌کند که با زمان ماند واقعی اندکی تفاوت دارد؛ زیرا باید تبخیر و تعرق گیاهان و همچنین باران و نشت احتمالی تالاب‌ها در محاسبات لحاظ گردند. اما از میان موارد مذکور تنها تبخیر و تعرق گیاهان قابل توجه است که در این پژوهش زمان ماند اسمی استفاده شده است.

در ابتدای کانال پنج‌عدد قطره‌چکان دبی ثابت درون خط، با دبی ۲۴ لیتر بر ساعت برای زمان ماند اسمی پنج ساعت، چهارعدد قطره‌چکان برای زمان ماند اسمی هفت

ساعت و سه‌عدد قطره‌چکان برای زمان ماند اسمی نه‌ساعت نصب گردید. در ابتدای کانال، یک شیر پلی‌اتیلنی به‌منظور قطع جریان قطره چکان‌ها در هنگام تغییر زمان ماند نصب گردید. پس از انتقال گیاهان به محل مورد نظر و نگهداری و پرورش آن‌ها، گیاهان با کود شیمیایی تقویت شدند. این کار باعث شد تا پس از چند هفته گیاه رشد زیادی کرده، سیستم ریشه‌ای آن شروع به پنجه زدن کند. سپس چندبوته با یکدیگر جدا شدند و پس از قرار گرفتن در یونولیت با دو تراکم چهار و نه بوته در هر یونولیت در کانال قرار گرفتند. سپس جریان پساب به داخل سیستم وارد شد تا علاوه بر آبیاری گیاهان، فرصت لازم برای تشکیل بیوفیلم در کانال اعمال شده، سیستم برای تصفیه‌ی پساب آماده شود. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ مراحل کار دیده می‌شود.

شکل ۱۰- آماده سازی بوته‌های وتیور برای جای‌گذاری در یونولیت

شکل ۱۱- آماده سازی یونولیت‌ها برای جای‌گذاری بوته‌های گیاه وتیور

شکل ۱۲- قرار دادن بوته‌های گیاه وتیور در یونولیت

شکل ۱۳- بتن‌ریزی در کانال

شکل ۱۴- قرار دادن گیاهان در کانال با تراکم دوازده

شکل ۱۵- قرار دادن گیاهان در کانال باتراکم بیست و هفت بوته

نمونه‌های آب ورودی و خروجی در آزمایشگاه آزمون صنعت آتیه‌گستران سبز اندازه‌گیری شد. این نمونه‌ها شامل BOD، COD، TSS و تعداد کل کلی‌فرم است. برای تعیین کلی‌فرم از روش تخمیر چند لوله‌ای براساس استاندارد (Apha, 2005) استفاده شد. اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) موجود در نمونه‌ها به روش اسپکتروفتومتری و با استفاده از دستگاه اسپکترومتری (مدل Jasco V-530) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقدار اکسیژن بیوشیمیایی (BOD) از بطری‌های مخصوص استفاده شد. اکسیژن محلول نمونه‌ی بعد از رقیق‌سازی و افزودن مواد مغذی، به روش وینکار اندازه‌گیری شد و پس از آن درون دستگاه انکوباتور (مدل Fan Azma Gostar) به مدت ۵ روز و در وضعیت محیطی مشخص، مجددا مقدار اکسیژن محلول قرائت شد. از روش وزنی نیز به‌منظور تعیین جامدات کل معلق استفاده گردید (Lettinga,1995). راندمان خذف با استفاده از اختلاف مقادیر پساب ورودی و پساب خروجی تقسیم بر مقدار پساب ورودی به‌دست می‌آید. نتایج آزمایش با نرم‌افزار IMB SPSS 21 و برای حصول اطمینان کافی، نتایج نیز با نرم‌افزار SAS 9.4 نیز بررسی شد. برای آزمون نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپیرو ویلک (Shapiro-wilk) و برای آزمون یکنواختی و همگنی واریانس‌ها از آزمون لون (Leven) استفاده شد. مقایسات با استفاده از آزمون حداقل تفاوت

معنی‌دار (Least Significant Difference LSD) در سطح اطمینان ۹۵ درصد صورت پذیرفت. همچنین نمودارهای مرتبط با هر پارامتر مورد بررسی، توسط نرم‌افزار Excel 2013 ترسیم گردیدند.

نتایج و بحث

جدول ۳ و ۴ به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای پساب ورودی به محیط و تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقادیر اندازه‌گیری‌شده پارامترهای پساب ورودی به محیط

تراکم گیاهی	طرح اختلاط	زمان ماند (ساعت)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	کلی فرم (mg/L)
۱۲	پوکه‌ی معدنی	۵	۱۳/۲۳	۵۱/۲۳	۱۱۰	۳۳۰۰۰
۱۲	پوکه‌ی معدنی	۷	۹/۳۴	۵۸/۴۵	۹۸	۴۶۰۰۰
۱۲	پوکه‌ی معدنی	۹	۱۲/۵۶	۴۷/۳۲	۸۶	۲۸۰۰۰
۱۲	پرلیت	۵	۱۳/۴۶	۴۸/۸۷	۵۴	۲۴۰۰۰
۱۲	پرلیت	۷	۷/۲۳	۵۲/۳۹	۶۷	۳۸۰۰۰
۱۲	پرلیت	۹	۸/۴۵	۵۳/۴۴	۹۹	۳۶۰۰۰
۲۷	پوکه‌ی معدنی	۵	۱۱/۳۵	۵۷/۹۵	۱۱۲	۳۹۰۰۰
۲۷	پوکه‌ی معدنی	۷	۱۲/۸۶	۴۴/۵۶	۹۳	۴۱۰۰۰
۲۷	پوکه‌ی معدنی	۹	۸/۲۱	۴۳/۸۷	۸۹	۴۳۰۰۰
۲۷	پرلیت	۵	۱۱/۱۶	۴۸/۴۲	۷۶	۴۸۰۰۰
۲۷	پرلیت	۷	۱۳/۷۶	۴۲/۶۷	۵۹	۳۹۰۰۰
۲۷	پرلیت	۹	۹/۴۵	۵۱/۳۲	۸۱	۴۲۰۰۰
۱۲	بتن بدون پوکه و پرلیت	۵	۱۲/۹۵	۵۳/۹۴	۹۸	۳۷۰۰۰
۱۲	بتن بدون پوکه و پرلیت	۷	۸/۳۴	۵۰/۱۲	۷۹	۴۶۰۰۰
۱۲	بتن بدون پوکه و پرلیت	۹	۱۳/۵۴	۴۸/۶۵	۶۴	۴۹۰۰۰
۲۷	بتن بدون پوکه و پرلیت	۵	۱۱/۲۱	۴۷/۳۸	۱۲۴	۴۲۰۰۰
۲۷	بتن بدون پوکه و پرلیت	۷	۹/۳۱	۵۷/۳۹	۱۳۹	۳۵۰۰۰
۲۷	بتن بدون پوکه و پرلیت	۹	۱۳/۵۶	۵۸/۲۴	۱۴۰	۲۹۰۰۰

جدول ۴- تجزیه‌ی واریانس پارامترهای اندازه‌گیری شده

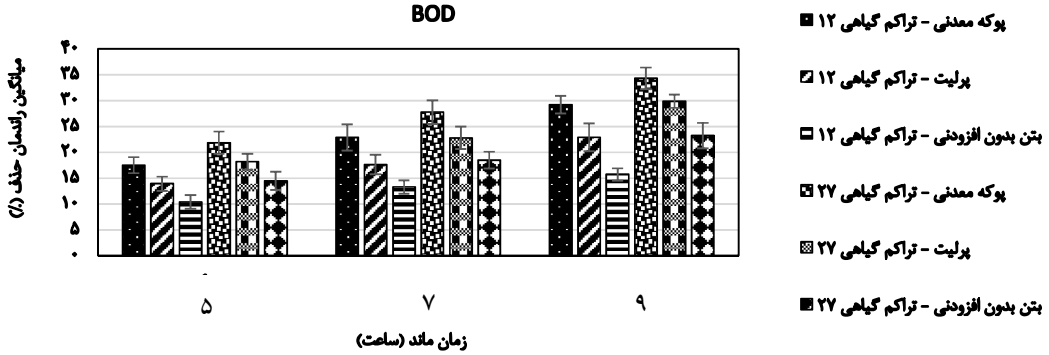
منابع تغییرات	درجه‌ی آزادی	میانگین مربعات			
		COD (mg/L)	TSS (mg/L)	BOD (mg/L)	کلی فرم کل (mg/L)
بتن	۲	۵۵۸/۱۴*	۷۱۰/۹۷*	۴۱۹/۳۷*	۵۹۴/۰۷*
تراکم	۱	۲۹۶/۴۷*	۷۵۰/۹۹*	۳۷۶/۹۳*	۱۶۳۶/۶۹*
زمان	۲	۵۴۶/۲۰*	۵۷۸/۷۷*	۴۳۵/۱۷*	۵۹۳/۱*

بتن× تراکم	۲	۳/۰۴^{ns}	۴/۶۴^{ns}	۰/۸۶^{ns}	۲۶/۷۰*
تراکم× زمان	۲	۰/۱۲^{ns}	۳/۱۴^{ns}	۶/۱۴^{ns}	۳/۸۳^{ns}
بتن× زمان	۴	۷/۰۱^{ns}	۱/۳۴^{ns}	۱۰/۲۵**	۴/۱۸^{ns}
بتن× تراکم × زمان	۴	۰/۳۴^{ns}	۲/۸۵^{ns}	۰/۷۸^{ns}	۲/۹۷^{ns}
ضریب تغییرات (cv)		۶/۰۲	۷/۹۶	۹/۰۷	۹/۹۵

* : معنادار در سطح ۱ درصد **: معنادار درسطح ۵ درصد **ns** :فاقد معنا

- تغییرات اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD) پساب:

اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی نرخ مصرف اکسیژن در داخل آب توسط میکروارگانیسم‌ها است. اگر BOD کم باشد آب پاک و فاقد ارگانیسم است، یا آن‌که ارگانیسم‌های داخل آب مرده و نیازی به مصرف اکسیژن ندارند. شکل ۱۶ میانگین راندمان حذف BOD در حالات مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶– راندمان حذف اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی

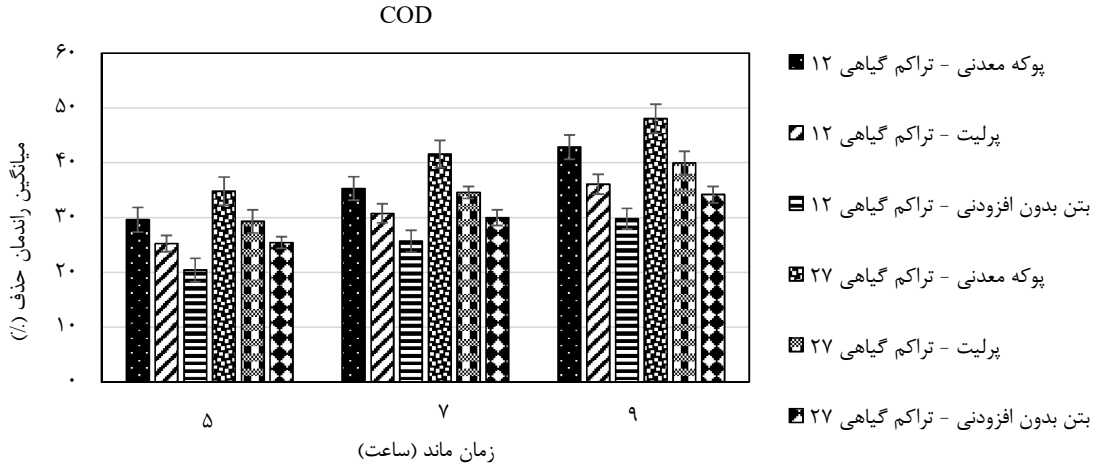
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌های بتن متخلخل ساخته‌شده با پوکه‌ی معدنی نسبت به پرلیت تأثیر بیشتری در میزان کاهش BOD دارند. دلیل این امر افزایش خلل و فرج و در نتیجه‌ی آن افزایش مساحت کل لایه‌ی زیستی و همچنین تماس بیشتر پساب با لایه‌ی زیستی است. همچنین با افزایش تراکم گیاهی میزان حذف BOD افزایش یافته است. زمان ماند نیز مؤثر واقع شده است؛ به گونه‌ای که افزایش زمان ماند در حدود ۱۰ درصد باعث افزایش راندمان حذف گردیده است. همچنین بیشترین تأثیر در راندمان حذف متاثر از طرح اختلاط است. بیشترین و کمترین درصد کاهش که مربوط به طرح پوکه‌ی معدنی با تراکم ۲۷ بوته (در زمان ماند ۹ ساعت) و طرح بتن بدون افزودنی با تراکم ۱۲ بوته (در زمان ماند ۵ ساعت) است، با تفاوت در حدود ۲۴ درصدی، نشان می‌دهد که افزودن پوکه‌ی معدنی به طرح باعث افزایش راندمان حذف BOD می‌گردد. راندمان حذف BOD در تحقیقات Javaheri (2013) در محدوده‌ی ۲۵ تا ۳۶ درصد گزارش شد که با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق همخوانی دارد. همچنین نتایج گرفته‌شده با نتایج (Taghizadeh, 2007) مطابقت دارد.

Choi et al (2010) نیز اعلام کردند درصورت استفاده از بتن متخلخل به‌عنوان بیوفیلتر، BOD موجود درجریان خروجی به‌طور میانگین از ۱۰/۴ در جریان ورودی به ۲/۷ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. به این ترتیب بازده حذف BOD به‌طور متوسط ۷۴ درصد بود. همچنین این نتیجه با نتایج محققانی که برروی تغذیه مصنوعی با پساب کار می‌کنند، مطابقت دارد؛ به این صورت که هرچه خلل و فرج بیشتر باشد، کاهش BOD پساب عبوری بیشتر خواهد بود، در این رابطه می‌توان به تحقیقات Sikka et al (2009) و Simmons et al (2009) اشاره نمود.

فرآیندهای هوازی و بی‌هوازی بیولوژیک از عوامل مؤثر بر کاهش BOD هستند. همچنین فیلتر شدن و رسوب نمودن از فرآیندهای فیزیکی مؤثر بر حذف BOD است. مقدار اکسیژن تزریق‌شده به پساب توسط گیاهان ماکروفیت بسیار کمتر از میزان اکسیژن مورد نیاز در فرآیندهای هوازی به‌منظور تجزیه‌ی مواد آلی است. اما فرآیندهای بی‌هوازی با استفاده از باکتری‌های متصل به ریشه‌ی گیاهان، ریزوم‌ها و سطح مواد متخلخل بستر نقش مهمی در کاهش BOD به‌خصوص در تالاب‌های مصنوعی ایفا می‌کنند. در اصل تجزیه‌ی BOD توسط فرآیندهای هوازی در ناحیه‌ای بسیار محدود در اطراف ریشه و ریزوم‌ها و قسمت‌هایی از بستر که در مجاورت اتمسفر است، صورت می‌پذیرد (Arab Nasrabadi, 2017).

-تغییرات اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) پساب:

اکسیژن‌خواهی شیمیایی یا همان COD یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش آلودگی فاضلاب است. COD آلودگی فاضلاب ناشی از مواد خارجی است که وارد آب شده، به‌صورت معلق یا محلول باعث آلودگی آن شده‌اند. شکل ۱۷ میانگین راندمان حذف COD در حالات مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷– راندمان حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی

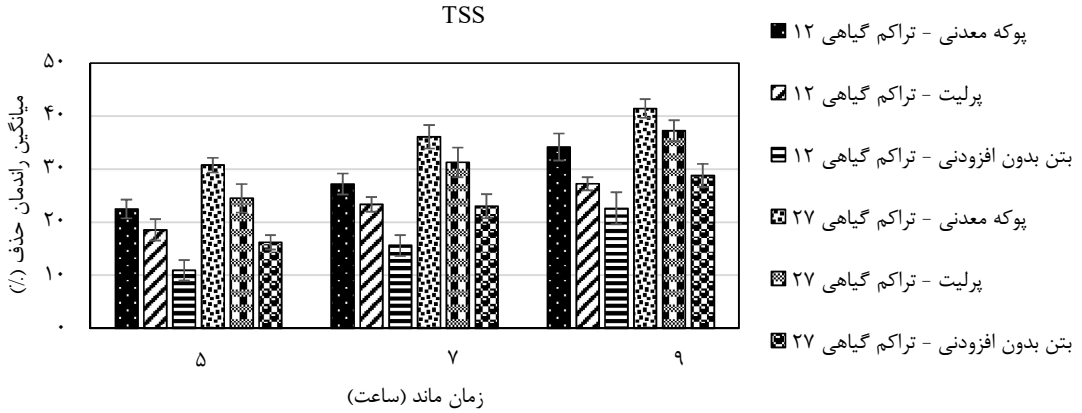
همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه‌های بتن متخلخل ساخته شده با پوکه‌ی معدنی نسبت به پرلیت تأثیر بیشتری در میزان کاهش COD دارند. این کاهش در مقایسه با کاهش BOD چشمگیر است، که نشان می‌دهد حساسیت پارامتر COD نسبت به مواد افزودنی زیاد است. از لحاظ زمان ماند، راندمان حذف با افزایش زمان ماند و COD ورودی افزایش می‌یابد. به‌نحوی که با بررسی طرح‌های مختلف به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش زمان ماند، راندمان حذف در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. Javaheri (2013) نتیجه گرفت که هرچه خلل و فرج ریز شوند، پساب با لایه‌ی بیوفیلم تماس بیشتر و جذب سطحی نقش پررنگ‌تری درکاهش COD دارد.

Arab Nasrabadi (2017) با انجام آزمایش‌هایی مشابه، بازه ۳۸ تا ۴۲ درصدی را برای کاهش پارامتر COD گزارش کردند که نتایج گرفته‌شده در این دامنه نوسان قرار می‌گیرند. Wu et al (2010) درصد حذف را به‌طور میانگین

۵۲ درصد اعلام کردند که از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش بیشتر است.

-تغییرات کل جامدات معلق (TSS) پساب:

شکل ۱۸ میانگین راندمان حذف TSS در حالات مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نمودار مشخص است، بیش‌ترین راندمان حذف مربوط به طرح بتن متخلخل ساخته شده با پوکه‌ی معدنی با تراکم گیاهی ۲۷ بوته و زمان ماند ۹ ساعت است که نمایانگر تأثیر هر سه عامل بر کاهش میزان TSS است. همچنین کم‌ترین کاهش TSS مربوط به طرح بتن متخلخل بدون افزودنی با تراکم گیاهی ۱۲ بوته و زمان ماند ۵ ساعت است.

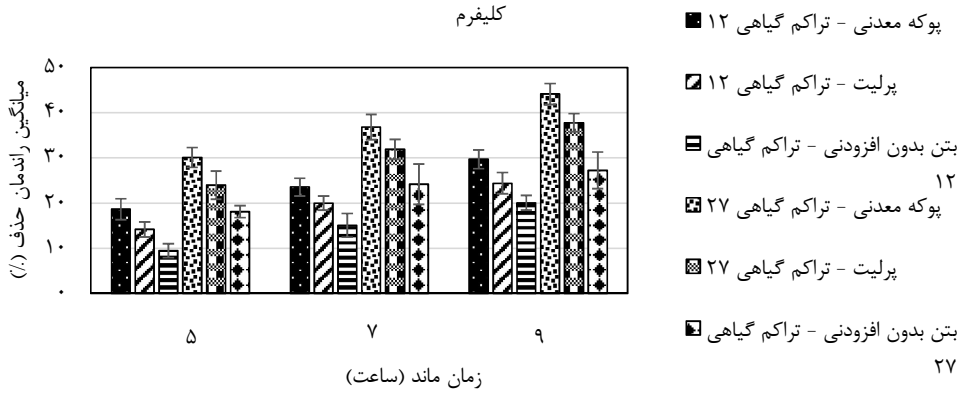


شکل ۱۸– راندمان حذف کل جامدات معلق

همچنین مشاهده می‌شود نمونه‌های بتن متخلخل ساخته‌شده با پوکه‌ی معدنی نسبت به پرلیت و بتن بدون افزودنی تأثیر بیشتری در میزان کاهش TSS دارند. بیشترین و کمترین درصد کاهش که مربوط به طرح پوکه‌ی معدنی با تراکم۲۷ بوته در زمان ۹ ساعت و طرح بتن بدون مواد افزودنی باتراکم ۱۲ بوته در زمان ۵ ساعت است، با تفاوت در حدود ۳۰ درصدی، نشان می‌دهد که افزودن پوکه‌ی معدنی به طرح باعث افزایش راندمان حذف TSS می‌گردد. که روندی مشابه با حذف BOD و COD دارد. دلیل این امر آن است که برای به دام انداختن بیشتر ذرات معلق جامد نیاز به حفرات بیشتری است تا این سیر کاهشی همچنان روند افزایشی داشته باشد. باید توجه نمود که حذف TSS به صورت فیزیکی انجام می‌شود. یعنی با عبور پساب از کانال، مواد متخلخل نمونه‌های بتن و تا حدی ریشه‌های در هم تنیده گیاه وتیور با عمل صاف کردن جریان به کاهش TSS کمک می‌کنند. همچنین با توجه به جریان آرام درون حوضچه‌ها، بخشی از مواد معلق در پساب ته‌نشین می‌گردد. لذا افزایش زمان ماند بیشتر به ته‌نشینی مواد معلق کمک می‌کند. از طرف دیگر با افزایش زمان ماند، فرصت حل شدن مواد چسبیده به ریشه گیاهان در پساب عبوری از بستر فراهم می‌گردد که موجب افزایش کل جامدات محلول (TSS) می‌شود. در بین محققانی که در این زمینه فعالیت کرده‌اند Teimori et al (2016) نزدیک‌ترین روش به روش بیان شده را دنبال کرده‌اند که راندمان حذف TSS را در بازه ۲۰ تا ۳۰ درصد گزارش کرده‌اند که با توجه به تفاوت در روش‌ها، با نتایج گرفته شده مطابقت دارند.

-تغییرات کلی‌فرم کل پساب:

از مهم‌ترین شاخص‌های کیفی پساب میزان کلی‌فرم آن است که نمایانگر عوامل بیماری‌زای درون پساب است. شکل ۱۹ میانگین راندمان حذف کلیفرم کل را در حالات مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۹– راندمان حذف کلیفرم

همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه‌های بتن متخلخل ساخته‌شده با پوکه‌ی معدنی نسبت به نمونه‌های دیگر تأثیر بیشتری در میزان کاهش کلی‌فرم دارند. اما به‌طور کلی نمونه‌های بتن متخلخل تأثیر چشمگیری در حذف کلی‌فرم ندارند، که نشان می‌دهد حساسیت پارامتر کلی‌فرم نسبت به مواد افزودنی بسیار ناچیز است. چنانچه با دقت به اعداد راندمان حذف کلی‌فرم توجه شود، می‌توان به تأثیر زمان ماند در افزایش راندمان حذف پی برد. به گونه‌ای که در تمامی طرح‌ها افزایش زمان ماند باعث افزایش راندمان حذف ۱۰ تا ۱۵ درصدی می‌شود. با وجود این که افزایش راندمان چشمگیر نیست، اما می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ساعات زمان ماند می‌توان به نتیجه‌های بهتری در حذف کلی‌فرم دست یافت. وجود باکتری‌های کلی‌فرم در نمونه پساب می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که میکروارگانیسم‌های بیماری‌زای مربوط به مدفوع مثل انواع ویروس‌ها ممکن است در آن حضور داشته باشند. غیاب باکتری‌های کلی‌فرم نیز مبین این مطلب است که پساب عاری از ارگانیسم‌های بیماری‌زا است. در این زمینه نتایج Javaheri (2013) در یک مورد، روندی شبیه به نتایج گرفته شده را دنبال می‌کند، اما در بقیه‌ی موارد اختلاف ۲۰ تا ۳۰ درصدی قابل مشاهده است.

کنترل کفایت و صحیح بودن تجزیه واریانس برای پارامترهای اندازه‌گیری شده

تمامی مقادیر باقی‌مانده پارامترهای اکسیژن‌خواهی بیوشیمایی (BOD)، اکسیژن‌خواهی شیمایی (COD)، کل جامدات معلق (TSS) و کلیفرم در بازه $۲\pm۵۷/\times\sqrt{MSE}$ قرارگرفته‌اند که حاکی از نبود داده‌ی پرت است. برای آزمون نرمال بودن باقی‌مانده‌ی داده‌ها از آزمون شاپیرو ویلک استفاده شد. با در نظر گرفتن فرض H_0 (به‌عنوان نرمال بودن باقی‌مانده‌ی داده‌ها) و فرض H_1 (به‌عنوان نرمال نبودن باقی‌مانده‌ی داده‌ها) اگر مقادیر آستانه‌ی احتمال (Probability) بیشتر از ۰/۰۵ باشد، آنگاه فرض H_0 در سطح اطمینان ۹۵ درصد قبول می‌شود. همچنین برای آزمون همگنی و یکنواختی واریانس‌ها از آزمون لون استفاده شد. با فرض H_0 (به‌عنوان مساوی بودن واریانس‌ها) و فرض H_1 (به‌عنوان مساوی نبودن واریانس‌ها) اگر مقادیر آستانه احتمال بیشتر از ۰/۰۵ باشد، آنگاه فرض H_0 در سطح اطمینان ۹۵ درصد قبول می‌شود. جدول ۵، حاکی از نرمال بودن باقی‌مانده‌ها و همگنی و یکنواختی واریانس‌های درون تیماری برای پارامترها را نشان می‌دهند.

جدول۵-آزمون نرمال بودن و آزمون همگنی واریانس‌ها برای پارامترهای اندازه‌گیری شده

پارامترهای اندازه‌گیری شده	آزمون نرمال بودن		آزمون همگنی	
	آماره	آستانه احتمال	توزیع F	آستانه احتمال
BOD	۰/۰۳۵	۰/۹۵۳	۰/۳۷۷	۰/۹۷۳
COD	۰/۰۰۶	۰/۹۳۵	۰/۳۰۱	۰/۹۹۰
TSS	۰/۰۱۴	۰/۹۴۲	۰/۴۰۱	۰/۹۷۱
کلیفرم	۰/۲۹۱	۰/۹۷۴	۰/۸۲۰	۰/۶۵۸

نتیجه‌گیری

روزانه حجم قابل توجهی فاضلاب در همه‌ی مناطق کشور و در طول همه فصل‌ها در حال تولیداست. بدین منظور انواع سیستم‌های تصفیه فاضلاب بررسی و گسترش یافته‌اند. یکی از این سیستم‌ها تصفیه‌ی طبیعی فاضلاب است. گیاه‌پالایی یک تکنولوژی رو به گسترش به‌منظور حذف آلاینده‌ها از پساب است که از ۱۰ سال پیش جنبه‌های کاربردی آن در تمام دنیا آغاز گردید و آن شامل پالایش آلودگی‌های ارگانیک، غیرارگانیک و مواد رادیواکتیویته و مواد شیمیایی است. اما به هر حال در این تکنیک نیز محدودیت‌هایی وجود دارد. در مهم‌ترین مسائل در کاربردی بودن هر ایده، داشتن صرفه اقتصادی است. با توجه به این که بتن متخلخل از پامیس و پرلیت ساخته می‌شود و ایران دارای معادن غنی سنگ پامیس و پرلیت است، ساخت بتن متخلخل توجیه اقتصادی دارد. همچنین گیاه وتیور دارای قدرت زیادی در جذب عناصر است. ازمهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، سرعت عمل در کاهش پارامترهای مذکوراست. بیش‌ترین راندمان حذف مربوط به طرح بتن متخلخل ساخته شده با پوکه‌ی معدنی، تراکم گیاهی ۲۷ بوته و زمان ماند ۹ ساعت است که این مقدار برابر با ۳۴/۳۱ درصداست.

همچنین کم‌ترین راندمان حذف مربوط به طرح بتن متخلخل ساخته‌شده بدون افزودنی، تراکم گیاهی ۱۲ بوته و زمان ماند ۵ ساعت است که این مقدار برابر ۱۰/۴۰ درصد است. اثر مواد افزودنی (پوکه معدنی و پرلیت) در بتن بر کاهش COD بسیار قابل توجه است.

چنانچه تفاوت راندمان حذف مربوط به بتن متخلخل ساخته‌شده با پوکه‌ی معدنی، تراکم گیاهی ۲۷ بوته و زمان ماند ۹ ساعت نسبت به طرح مربوط به بتن بدون افزودنی و تراکم گیاهی و زمان ماند مشابه در حدود ۱۵ درصد بوده است. همچنین نتایج حاصل از پارامترهای کلی‌فرم در این پژوهش دلیل تاییدی بر کم اثر بودن این روش بر روی راندمان حذف کلی‌فرم است. میانگین راندمان حذف کلی‌فرم در تمامی طرح‌ها در حدود ۲۵ درصد است، چنانچه این عدد در راندمان حذف COD برابر با ۳۳ درصداست. چنین می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های تصفیه‌ی طبیعی نقش پررنگی در حذف آلودگی‌های میکروبی ندارند و برای حذف این گونه آلودگی‌ها نیاز به تصفیه‌های شیمیایی است.

منابع

Abedi-Koupai J., Mohri-Esfahani E. 2012, March. Desalination of water using nanoparticles of husk ashes in sand filter. In Proceedings of the Fourth International Conference on Nanostructures, ICNS4 (pp. 12-14).

Abedi-Koupai J. 2003. Potential uses of phytoremediation technology for nickel-polluted soils. In 6th International Conference on Civil Engineering (ICCE), Isfahan University of Technology, Iran.

Abedi-Koupai J., Jamalian M.A., Dorafshan, M.M. 2020. Improving Isfahan Landfill Leachate Quality by Phytoremediation Using Vetiver and Phragmites Plants in Green Space Irrigation. Journal of Water and Wastewater, 31(3), pp.101-111. (In Persian)

Apha A. 2005. Wpcf. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20.

Arab Nasrabadi V. 2017. Improving the quality of urban wastewater using vetiver in artificial wetland system. M.Sc Thesis. Faculty of Agriculture. Isfahan University of Technology, Iran. (In Persian)

Choi I.S., Jang S.H., Oh J.M. 2010. Examination for purification ability of water quality by applying the porous concrete. Kor J Limnol, 35(4), pp.312-319.

Javaheri M. 2013. Improvement of sewage treatment effluent effluent quality using porous concrete. M.Sc Thesis. Faculty of Agriculture. Isfahan University of Technology, Iran. (In Persian)

Kavousi A., Borghei M. 2005. Use of mineral pumice as biofilm support in biological wastewater treatment. Environmental Science, 8, pp.29-42. (In Persian)

Lettinga G. 1995. Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. Antonie van leeuwenhoek, 67(1), pp.3-28.

Maharjan A., Pradhanang S. 2017. Potential of vetiver grass for wastewater treatment. Environment and Ecology Research, 5(7), pp.489-494.

Noshadi M., Valizadeh H. 2016. Effect of Vetiver plant on reducing salinity and soil salts. Water and Soil J. 30(5), pp.796-804. (In Persian)

Oshunsanya S., Oluwasemire K., Ogunwumi, K., 2012. The use of vetiver grass slips in removing heavy metal contamination of dumpsite in Ibadan metropolis. Scholarly Journal of Agricultural Science, 2(6), pp.115-118.

Raman J.K., Gnansounou E., 2015. LCA of bioethanol and furfural production from vetiver. Bioresource technology, 185, pp.202-210.

Saghaian Nejad S., Abedi-Koupai J., Mostafazadeh-Fard S., Behfarnia K. 2018. Treatment of urban storm water using adsorbent porous concrete. Water Management. 17(6), pp. 328-334.

Siahi M., Mehrdadi K., Liaghat A., Adl M., Ehteshami M., Ashrafi A., Ghoddosi F., Zarnekabi M. 2010. Standards and experience of using wastewater for irrigation. Iran: National Committee on Irrigation and Drainage. (In Persian)

Sikka R., Nayyar V., Sidhu S.S. 2009. Monitoring of Cd pollution in soils and plants irrigated with untreated sewage water in some industrialized cities of Punjab, India. Environmental monitoring and assessment, 154(1), pp.53-64.

Simmons R.W., Ahmad W., Noble A.D., Blummel M., Evans A., Weckenbrock P. 2010. Effect of long-term un-treated domestic wastewater re-use on soil quality, wheat grain and straw yields and attributes of fodder quality. Irrigation and Drainage Systems, 24(1), pp.95-112.

Subrahmanyam M., Boule P., Kumari V.D., Kumar D.N., Sancelme M., Rachel A. 2008. Pumice stone supported titanium dioxide for removal of pathogen in drinking water and recalcitrant in wastewater. Solar Energy, 82(12), pp.1099-1106.

Taghizadeh M. M., Torabian A., Borghei M., Hassani A. H. 2007. Feasibility study of water purification using vertical porous concrete filter. Int. J. Environ. Sci. Technol. 4(4), pp. 505-512.

Teimori A., Mousavi F., Karami J., Farzin S. 2016. Performance of porous concrete containing an additive to reduce urban flood. Journal of Structural Analysis Earthquake. 13(2), pp.33-43. (In Persian)

Torkan A., Ahmadi M. 2005. Environmental Biotechnology Basics and Applications (Translation), Scientific Publishing Institute of Sharif University of Technology, Tehran. (In Persian)

Wilderer P.A., Schreff D. 2000. Decentralized and centralized wastewater management: a challenge for technology developers. Water Science and Technology, 41(1), pp.1-8.

Wu Y.F., Lu X.W., Jia Y., Shi J. 2010. Water quality improvements and community characteristics in simulated rivers using porous concrete embankments. Sustainable Environment Research, 20(5), pp.317-323.