نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، صفحات ۴-۱۲، پاییز ۱۴۰۲

Journal of Water and Wastewater
Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 8, No. 3, PP. 4-12, Autumn 2023
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.382425.1347

مقاله پژوهشی

تصفیه فسفات زهاب‌های کشاورزی با استفاده از راکتور زیستی کاه و کلش گندم

آتنا نادری[۱]، هادی رمضانی اعتدالی[*۲]، عباس کاویانی[۲]، محمد بی‌جن‌خان[۲] و مجتبی اکرم[۳]

۱- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۳- کارشناس آزاد، متخصص زهکشی، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

تغذیه مناسب گیاه یکی از عوامل مهم در بهبود کمی و کیفی فرآورده‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود. فسفر یکی از عناصر غذایی پر مصرف مهم است که کمبود آن رشد گیاه را به‌شدت محدود می‌کند. افزایش جمعیت و نیاز به مواد غذایی بیشتر باعث شده کشاورزان برای افزایش تولید از کودهای دارای فسفر استفاده کنند، که در نتیجه مقدار اضافی عنصر وارد زهاب‌های کشاورزی شده و منابع آب زیرزمینی را آلوده می‌کند. به‌همین منظور استفاده از راکتورهای زیستی برای تصفیه زهاب‌های کشاورزی و حذف عناصری مانند فسفر موردتوجه قرارگرفته است. در این مطالعه با توجه به هزینه‌ها و دردسترس بودن گندم در تمامی نقاط ایران، کاه و کلش گندم به‌عنوان بستر و محیط راکتور زیستی انتخاب شد. سه جعبه از جنس آهن گالوانیزه با طول، عرض و ارتفاع یک متر برای شبیه‌سازی شرایط مزرعه‌ای مورد استفاده قرارگرفت. جعبه‌ها دارای یک خروجی و یک ورودی برای تزریق پساب و سه نقطه برای برداشت پساب بودند؛ که عمق نقاط برداشت به‌ترتیب از کف جعبه ۱، ۶، ۱۶ سانتی‌متر درنظر گرفته شد. داخل جعبه‌ها با کلش گندم به‌صورت فشرده تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از کف با وزن ۳۹ کیلوگرم پر شد. پژوهش موردنظر در مدت ۵۱ روز با چهار تکرار آزمایش با پسابی در حدود ۱۴ میلی‌گرم فسفات انجام شد. تمام اندازه‌گیری‌ها در محل آزمایش با دستگاه فتومتر ۷۱۰۰ انجام شد. نتایج این پژوهش نشان‌داد که میزان کاهش غلظت فسفات با گذشت زمان افزایش می‌یابد. میزان درصد کاهش حداقلی فسفات ۴۸ درصد بود. هم‌چنین میزان درصد کاهش حداکثری فسفات برابر ۹۷ درصد به‌دست آمد که این نتایج بیانگر عملکرد قابل‌قبول این بیوراکتور بود. نتایج حاصل از آزمون‌های آماری مانند آزمون t و آزمون واریانس بیانگر آن است که با گذشت ۵۱ روز از عمر کاه و کلش گندم هیچ تفاوتی در میزان کاهش غلظت عنصر (عملکرد راکتور زیستی) ایجاد نشده است. احتمال تاثیر دما و غلظت اولیه بر روی نتایج وجود داشت. به‌همین دلیل، در اولین گام غلظت اولیه را در این پژوهش بی اثر کرده و آزمون کوواریانس برای بررسی تاثیر دما بر طول عمر کاه و کلش انجام شد که بیانگر عدم تاثیر دما بود.

کلمات کلیدی: راکتور زیستی، غلظت فسفات، کاه و کلش گندم، زهاب کشاورزی.

Research Paper

Phosphate Drain Water Treatment Using Wheat Straw Bioreactors

Atena Nadery[1], Hadi Ramezani Etedali[2*], Abbas Kaviani[2], Mohammad Bijankhan[2] and Mojtaba Akram[3]

1- M.Sc., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
2- Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
3- Drainage Specialist, Tehran, Iran.
* Corresponding Author, Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Received: 21/01/2023
Revised: 07/03/2023
Accepted: 06/04/2023
© IWWA

Abstract

Proper plant nutrition plays a crucial role in enhancing the quality and quantity of agricultural products. Phosphorus, a vital nutritional element, is often in short supply, severely limiting plant growth. The growing population and the consequent demand for more food have led farmers to use phosphorus-based fertilizers to boost production. However, this practice results in an excess of phosphorus entering agricultural drains and contaminating groundwater sources. To address this issue, the use of biological reactors for treating agricultural drainage water and removing elements like phosphorus has been explored. In this study, wheat straw and stubble were chosen as the substrate and content of the bioreactor due to their cost-effectiveness and widespread availability across Iran. Three galvanized iron boxes, each 1 m in length, width, and height, were used to simulate farm conditions. Each box was equipped with an outlet and an inlet for injecting drainage water and three points for collecting wastewater. The collection points were set at depths of 1, 6 and 16 cm from the bottom of the box. The boxes were filled with compacted wheat stubble up to a height of 20 cm from the floor, weighing 39 kg. The study was conducted over 51 days with four replications, using an effluent containing approximately 14 mg of phosphate per liter. All measurements were taken on-site using a 7100 photometer. The results showed that phosphate concentration decreased over time, with a minimum reduction of 48% and a maximum reduction of 97%, indicating the bioreactor's satisfactory performance. Statistical tests such as the t-test and variance test revealed no difference in the reduction of element concentration (bioreactor performance) after 51 days of wheat straw and stubble life. The initial concentration was neutralized in this research due to the potential impact of temperature and initial concentration on the results. A covariance test was conducted to investigate the effect of temperature on the lifespan of straw and stubble, which showed no significant impact of temperature.

Keywords: Bioreactor, Phosphate Concentration, Wheat Straw and Stubble, Agricultural Drainwater.

۱- مقدمه

تغذیه مناسب گیاه یکی از عوامل مهم در بهبود کمی و کیفی فرآورده‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود. در فرآیند تغذیه گیاه نه تنها هر عنصر باید به اندازه کافی در دسترس گیاه قرارگیرد بلکه ایجاد تعادل و تناسب میان همه عناصر غذایی از اهمیت زیادی برخوردار است. در دهه‌های اخیر توسعه کشورها منجر به مشکلات محیط‌زیستی در رابطه با آب از جمله کمبود منابع آب، آلودگی آب و عدم تعادل در اکولوژی آب شهری و روستایی شده است (Lopez-Ponnada et al., 2017). فسفر یکی از عناصر اصلی مورد نیاز گیاه است که در تولید محصول نقش مهمی دارد (همایی و ملکوتی، ۱۳۷۳). فسفر یکی از عناصر غذایی پر مصرف مهم است که کمبود آن رشد گیاه را به‌شدت محدود می‌کند. حلالیت فسفر در خاک کم بوده و لذا قسمت اعظم فسفر در خاک به فرم فسفات‌های نامحلول است (Rafiee and Asadi, 2010).

از طرف دیگر هنگام مصرف کودهای شیمیایی بخش قابل‌ملاحظه‌ای از فسفر به فرم ترکیب‌های نامحلول در خاک تثبیت می‌شود. لذا خاک‌های کشاورزی حاوی مقادیر زیادی از ذخایر فسفر نامحلول است. بنابراین آزادسازی فسفر از فرم‌های نامحلول و تثبیت شده موجود در خاک به‌منظور افزایش قابلیت جذب فسفر برای گیاهان زراعی از اهمیت خاصی برخوردار است. در این میان میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات نقش بسیار مهمی در حلالیت ترکیبات نامحلول فسفر در خاک ایفا می‌کنند. انواع مختلفی از میکروارگانیسم‌های خاکزی هستند که ترکیبات نامحلول فسفر را به فرم محلول تبدیل می‌کنند. باکتری‌ها و قارچ‌ها عمده‌ترین میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات در خاک را تشکیل می‌دهند. از انواع مهم قارچ‌های حل‌کننده فسفات نامحلول Aspergillus و Penicillium و Bacillus و Peseudomonas از انواع مهم باکتری‌های حل‌کننده فسفات هستند (Rafiee and Asadi, 2010).

حداکثر مقدار مجاز فسفات طبق موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران برای آب شرب ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر است و حداکثر مقدار مطلوب آن ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر است. در کشاورزی اکثر کودها دارای فسفر و نیترات هستند از این‌رو تاثیر این دو بر محیط پیرامون دارای اهمیت بیشتری است (Eslami and Nemati, 2015). نیتروژن و فسفر از عناصر ضروری برای گیاهان و موجودات زنده به‌حساب می‌آیند. ورود فسفر و نیتروژن از زمین‌های کشاورزی و زهاب‌های کاملا تصفیه نشده به آب‌ها می‌تواند از منابع تهدید کننده کیفیت آب باشد (Chang et al., 2009).

فسفات از جمله ترکیبات حاوی مادهٔ مغذی فسفر است که ورود آن به محیط‌های آبی در اثر تخلیهٔ پساب‌های خام یا خوب تصفیه نشده، منجر به ایجاد مشکلات کیفیت آب از جمله پدیده تغذیه‌گرایی می‌شود. ازروش‌های مختلف حذف فسفات می‌توان به روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اشاره کرد. در میان روش‌های شیمیایی، جذب و ترسیب شیمیایی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و به‌صورت گسترده‌ای در زمینه حذف فسفات استفاده می‌شود.

پیش از این چنین پنداشته می‌شد که راکتورهای زیستی نقش چندانی در کاستن فسفر محلول ندارند؛ اما پژوهش‌های موسسه تحقیقاتی آب جنوب داکوتا نشان داد که در زمین‌های کشاورزی ذرات فسفر (Particulate P یا PP) نیز به‌وفور وجود دارند و خلل و فرج تراشه‌های چوب درون راکتور زیستی می‌تواند همانند مواد معلق دیگر، از عبور و وارد شدن آن‌ها به محیط آبی بکاهد. آن‌ها در مزرعه‌ای در جنوب انتاریو کانادا که به کشت سبزی اختصاص داشت و رواناب آن دارای مواد معلق زیادی بود، دست به آزمایش زدند. حوضچه رسوب‌گیر و راکتور زیستی به‌ترتیب دارای حجمی برابر ۱۲/۳ و ۱۶/۱ مترمکعب بودند. این تجهیزات در مدت هفت ماهی که کشاورزی با میانگین رواناب ۱۰/۸ مترمکعب در روز ادامه داشت، توانست ۷۱ درصد فسفر کل ورودی با میانگین ۸/۸ میلی‌گرم در لیتر و نیز ۹۹ درصد مواد معلق با غلظت ۵۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر را از میان بردارد. مقدار بسیار زیادی از این مواد در حوضچه ترسیب و مقدار کمی از آن (۶ تا ۱۶ درصد) در راکتور زیستی جذب شدند. ۰/۹۱ درصد فسفر جذب شده به صورت ذرات فسفر (PP) بود. از مقدار فسفر محلول درون رواناب که غلظت آن به ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر می‌رسید چیزی کاسته نشد. از این‌رو می‌توان چنین نتیجه گرفت که ترکیبی از حوضچه ترسیب و راکتور زیستی می‌تواند در رواناب‌هایی که کدورت آن‌ها بالا است، نقش ارزنده‌ای در کاهش مواد معلق و ذرات فسفر چسبیده به آن داشته باشد. این پژوهش هم‌چنان نشان داد که حوضچه رسوب‌گیر نقشی بسیار بیشتر از بیوراکتور در از میان برداشتن فسفر دارد؛ زیرا بیشتر فسفر جامد به مواد معلق می‌چسبد و همراه آن جابجا می‌شود (South Dakota Water Research Institue, 2015).

Ashoori et al. (2019) کارآیی راکتور زیستی با هسته تراشه چوب را برای حذف نیترات، فلزات و مواد آلی از رواناب شهری مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کنترل دبی ورودی به راکتورهای زیستی می‌توان تا دهه‌ها، آلودگی‌های مختلفی را از

رواناب حذف نمود. Maxwell et al. (2020) حساسیت راکتور زیستی را به دما با افزایش عمر تراشه‌های چوب و دوره‌های خشک و مرطوب شدن راکتور را ارزیابی کردند که مشخص شد این حساسیت نسبت به متغیرهای مورد اشاره افزایش می‌یابد. مدل‌سازی و کاهش فسفر آزاد شده از پساب آبزی پروری با استفاده از راکتور زیستی توسط Sharrer et al. (2016) انجام شد. این محققین دریافتند که بدون درنظر گرفتن شرایط کیفی آب، بیشترین فسفر آزاد شده در ۲۴ ساعت ابتدایی اتفاق افتاده است.

Grenan et al. (2006) با ترکیب خاک و پوشال جو به‌عنوان فیلتر ۸۳/۵ درصد از نیترات را کاهش دادند. نتایج راکتور زیستی کاه و کلش گندم نتایج Greenan et al. (2006) را تایید می‌کند. تنها عاملی که ممکن است باعث تغییر در نتایج راکتور زیستی کاه و کلش گندم ایجاد کند زمان ماند است که در آزمایش Greenan طولانی‌تر است. هاشمی و همکاران (۱۳۹۰) با قراردادن خاک و باگاس نیشکر به‌عنوان فیلتر در کنار لوله‌های زهکش بیش از ۵۰ درصد (۶۲/۵) نیترات ورودی را کاهش دادند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مدت ۵۱ روز هیچ تغییری بر روی کارایی کاه و کلش گندم ایجاد نشده است. تحقیقاتی که توسط Addy et al. (2016) انجام شده نشان می‌دهد در شرایطی که مقدار دما کمتر از ۳ درجه سانتی‌گراد باشد، لازم است سطح بستر بیشتری را در طراحی درنظر گرفت و بالعکس، اگر دمای بالاتر از ۱۶/۹ درجه سانتیگراد باشد بستر کوچکتری درنظر گرفته شود. احتمال اثرگذاری دما در طول آزمایش‌های اخیر نیز بررسی شد که نشان‌دهنده عدم تاثیر دما برروی کاهش فسفات است که مخالف نتایج پژوهش‌های دیگر است. چرا که متوسط دمای کمتر از ۱۶ درجه سانتیگراد را عاملی در کند شدن روند کاهش و عملکرد راکتور زیستی می‌دانستند که نتایج این پژوهش آن را رد می‌کند.

Hassanpour et al. (2017) یک بررسی سه ساله بین بیوراکتور با بستر خرده چوب و خرده چوب و بیوچار در ایالت نیویورک انجام دادند و به‌طور میانگین ۵۷ درصد نیترات را کاهش دادند. هدف از این مطالعه بررسی چگونگی عملکرد بیوراکتور در محیط بسته (بدون جریان) در مدت زمان ماند ۶ تا ۲۴ ساعت برای تصفیه نیترات با بستری از کاه وکلش گندم بود. در مطالعه Yanpeng et al. (2018)، راندمان حذف فسفر از فاضلاب مصنوعی با استفاده از بیوراکتورهای غشایی با افزودن نمک‌های مختلف آهن مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد که پس از تثبیت پساب، آهن اضافه شده دو ظرفیتی کارآمدتر ازآهن سه ظرفیتی در حذف فسفر بود و برای تصفیه فاضلاب خانگی واقعی، غلظت خاصی از آهن دو ظرفیتی منجر به راندمان حذف فسفر بیش از ۹۹٪ شد.

در هرحال، بیوراکتورها می‌توانند دارای عوارض جانبی نیز باشند. چنان‌چه زهاب دارای سولفات بالا باشد، ممکن است گوگرد آن به سولفید هیدروژن تبدیل شود و بوی تخم مرغ گندیده ایجاد کند. در این‌صورت باید سطح آب در خروجی را پایین آورد تا آب با سرعت بیشتری گذر کند. یکی دیگر از این عوارض، این است که در چند هفته نخست، آب به رنگ چای در می‌آید. این موضوع اهمیت چندانی ندارد و به‌زودی برطرف می‌شود. چنان‌چه زهاب دارای جیوه باشد، می‌تواند به ماده متیل‌مرکوری تبدیل شود که سمّی است. این عمل تنها در موقعی روی می‌دهد که تمامی نیترات موجود در زهاب از دست رفته باشد و باکتری‌ها به این تبدیل کمک کنند. در این حالت باید زمان ماند را کاهش داد.

هدف از این تحقیق بررسی عملکرد راکتور زیستی در کاهش غلظت فسفر در زه‌آب‌های کشاورزی است. این بررسی در یک محیط بسته بدون جریان در مدت زمان ماند ۶ تا ۲۴ ساعت و در بستری از کاه و کلش گندم انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

این آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شد. سه جعبه با جنس آهن‌گالوانیزه با طول، عرض و ارتفاع ۱ متر برای شبیه‌سازی شرایط مزرعه‌ای به آزمایشگاهی مورد استفاده قرارگرفت. جعبه‌ها دارای یک خروجی و یک ورودی برای تزریق پساب و سه نقطه برای برداشت پساب بودند؛ که عمق نقاط برداشت به‌ترتیب از کف جعبه ۱، ۶ ، ۱۶ سانتی‌متر درنظر گرفته شد.

بستر راکتور زیستی را می‌توان با مواد طبیعی گوناگونی از جمله تراشه‌های چوب، بلال ذرت، کلش گندم و جو، ذغال و کاغذ روزنامه و یا ترکیبی از آن‌ها پر کرد. هرچقدر سطح جانبی راکتور زیستی نسبت به حجم آن زیادتر باشد، باکتری‌های بیشتری می‌توانند بر روی آن زندگی کنند و کارآیی آن را افزایش دهند. از این میان کلش گندم به چند علت به عنوان بستر راکتور زیستی انتخاب شد. در دسترس بودن آن در تمام نقاط کشور و هم‌چنین قیمت ناچیز آن دو علت این انتخاب است. داخل جعبه‌ها با کلش گندم به‌صورت فشرده تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از کف با وزن ۳۹ کیلوگرم پر شد. برای عدم ارتباط بستر راکتور زیستی با خاک روی سطح کلش‌های گندم با لایه‌ای پلاستیکی پوشانده شد و روی آن با خاکی به ارتفاع ۱۵ الی ۲۰ سانتی‌متر پر شد.

(الف)

(ب)

شکل ۱- آماده سازی جعبه‌های آزمایش: الف) موقعیت مخازن تزریق زهاب؛ ب) پر کردن و متراکم کردن کاه و کلش گندم

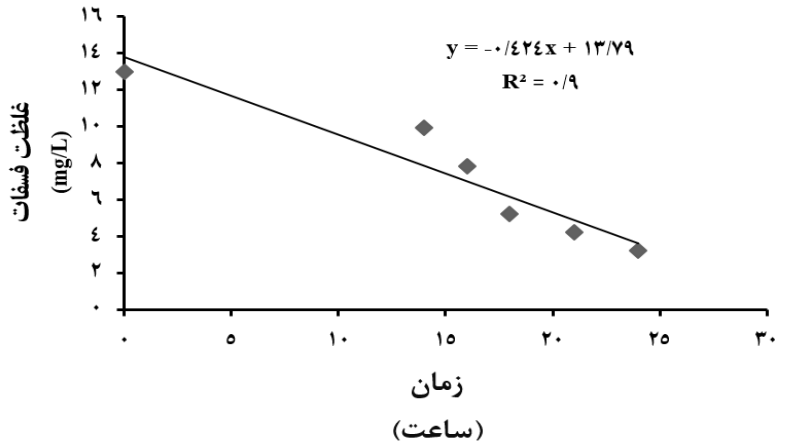
بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد غلظت فسفات در زه‌آب‌های کشاورزی بیش از ۲۰ میلی‌گرم در لیتر است. با توجه به غلظت‌های گزارش شده فسفات در گزارش‌های مختلف، با استفاده از کود کامل (NPK) پساب (مصنوعی فسفات) مورد نیاز با غلظت بیشتری برای آزمایش تهیه شد. هرکدام از جعبه‌های آزمایش به ۲۰۰ مترمکعب پساب برای پر شدن نیاز دارند. این حجم از پساب مصنوعی در دو مخزن ۳۰۰ لیتری برای تامین پساب مورد نیاز آماده شد. راکتورهای زیستی می‌توانند یکباره پُر و یک‌باره خالی شوند و یا این‌که در آن‌ها جریان دائمی وجود داشته باشد. به‌علت محدودیت اجرا، امکان ایجاد جریان ناچیز وجود نداشت. به‌همین علت در این مطالعه راکتورهای زیستی یکباره با پساب پر شدند. پساب از پایین جعبه‌ها به داخل آن تزریق شد. با استفاده از لوله‌های پیزومتری تعبیه شده عمق پساب داخل جعبه‌ها بررسی شد. آزمایش‌ها در چهار مرحله به‌ترتیب در تاریخ‌های ۱۸ شهریور، ۲۷ شهریور، ۳ آبان و آزمایش آخر در ۵ آبان ماه انجام شد.

در هر نوبت نمونه برداری دمای خاک سطحی راکتور زیستی و دمای پساب‌ها براساس درجه سانتی‌گراد با استفاده از دماسنج مدادی اندازه‌گیری شد. از این‌طریق تاثیر دما بر میزان عملکرد بیوراکتور بررسی شد. از هر جعبه آزمایش در هر روز آزمایش هر سه ساعت یک بار، یک نمونه برای اندازگیری فسفات برداشته شد. زمان‌های برداشت نمونه‌ها برای آزمایش اول ۱۴ و ۱۷ ساعت و آزمایش دوم ۶، ۱۰ و ۱۲ ساعت پس از اولین تزریق زهاب به سامانه بود. زمان‌های برداشت نمونه برای آزمایش سوم ۶، ۱۰ و ۱۲ ساعت و آزمایش چهارم ۱۵، ۱۸ و ۲۴ ساعت پس از اولین تزریق زهاب به سامانه بود. از بین داده‌های نمونه برداری شده با توجه به پژوهش‌های انجام شده و به‌صورت تصادفی از هر مرحله آزمایش چند ساعت برای بررسی انتخاب شد. مدت زمان تمام آزمایش‌ها از روز اول ۵۲ روز بود. برای اندازه‌گیری عناصر از روش فتومتری استفاده شد. دلیل انتخاب این روش ارزان‌تر و در دسترس‌تر بودن آن است.

آزمایش فسفات سطح بالا (HR) پالین تست[1] براساس روش وانادامولیبدات انجام می‌شود. مزیت عمده روش پالین تست جمع‌آوری تمام معرف‌های مورد نیاز به‌صورت یک قرص است. آزمایش به آسانی با افزودن یک قرص به نمونه آب انجام می‌شود. از قرص SR می‌توان برای حذف مزاحمت سیلیس استفاده نمود. در این روش فسفات در حضور آمونیوم وانادات با مولیبدن آمونیوم واکنش داده و ترکیب حاصله (phosphovanadomolybdate) به رنگ زرد است. شدت رنگ تولید شده با غلظت فسفات متناسب است و با فتومتر پالین تست اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه فتومتر ۷۱۰۰ توانایی اندازه‌گیری بیش از ده نوع عنصر و ترکیب از جمله فسفات را دارد (Mokarram et al., 2013). با استفاده از دستگاه فتومتر ۷۱۰۰ فسفات پساب‌های خروجی از بیوراکتور اندازگیری شد. نتایج برداشت از سه جعبه در هر ساعت به‌طور میانگین ثبت شد.

۳- نتایج

آزمون واریانس برای مدت آزمایش‌های اول و دوم به‌عنوان داده مستقل و غلظت فسفات به‌عنوان داده وابسته انجام شد. مقدار معنی‌داری در واریانس فرض H_1 را تایید می‌کند که بیانگر اختلاف (تاثیر) بین دو فاکتور اندازه‌گیری شده است (جدول‌های ۱ و ۲). شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات غلظت فسفات در طول آزمایش‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده بیان می‌کند که رابطه معکوس بین مدت زمان و غلظت فسفات وجود دارد. هرچه زمان بیشتری از ابتدای آزمایش گذشته باشد، مقدار غلظت فسفات کاهش می‌یابد.

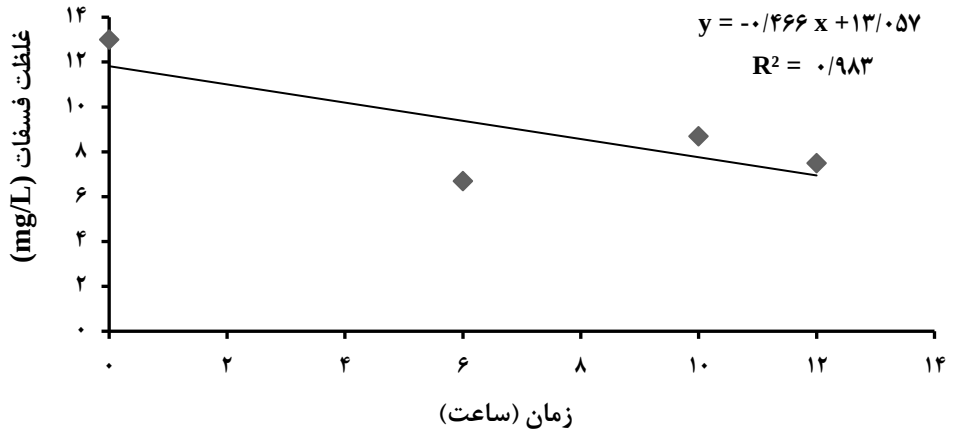


شکل ۲- غلظت فسفات (میلی‌گرم بر لیتر) درطول آزمایش اول نسبت به زمان (ساعت) از زمان تزریق پساب

جدول ۱- تحلیل واریانس برای تغییرات غلظت فسفات درطول مدت آزمایش اول

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۶۳/۲۸۸	۱	۶۳/۲۸۸	۳۶/۱۶۳^{ns}
ارقام	۷	۴	۱/۷۵	
کل	۷۰/۲۸۸	۵		

ns: عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات در آزمایش اول درسطح ۹۵ درصد



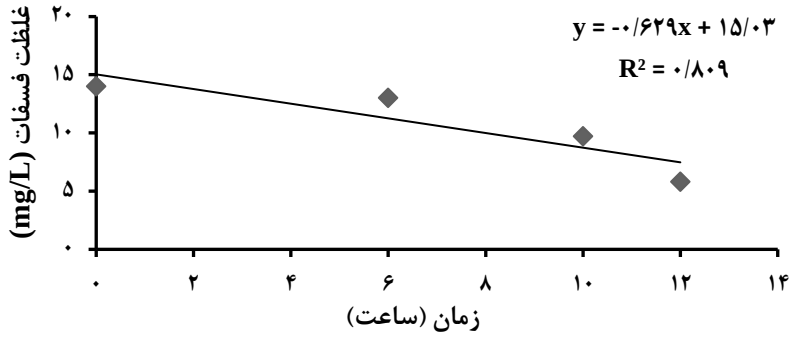
شکل ۳- غلظت فسفات (میلی‌گرم بر لیتر) درطول آزمایش دوم نسبت به زمان (ساعت) از زمان تزریق پساب

جدول ۲- تحلیل واریانس برای تغییرات غلظت فسفات در طول مدت آزمایش دوم

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۳۱/۵۷	۱	۳۱/۵۷	۵۶/۷۳^{ns}
ارقام	۱/۱۱۳	۲	۰/۵۶	
کل	۳۲/۶۹	۳		

ns: عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات در آزمایش دوم درسطح ۹۵ درصد

آزمون واریانس برای مدت آزمایش سوم به‌عنوان داده مستقل و غلظت فسفات به‌عنوان داده وابسته انجام شد. مقدار معنی‌داری در واریانس فرض H_0 را تایید می‌کند که بیانگر عدم اختلاف (تاثیر) بین دو فاکتور اندازه‌گیری شده است (جدول ۳). تغییرات غلظت فسفات در طول آزمایش سوم (شکل ۴) بیان می‌کند که هیچ رابطه‌ای بین مدت زمان و غلظت فسفات وجود ندارد. علت این نتیجه می‌تواند خطای اندازه‌گیری باشد که توسط اپراتور انجام شده است، یا تاثیر غلظت اولیه روی این آزمایش باشد یا تاثیر دما برروی نتایج است که با آزمون‌های بیشتر و آزمون‌های آماری دیگر می‌توان به‌علت آن پی‌برد.



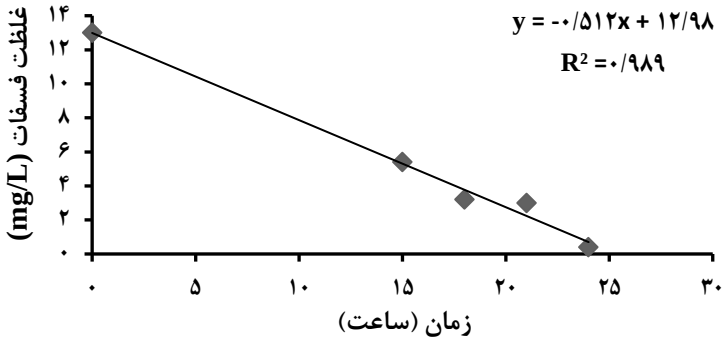
شکل ۴- غلظت فسفات n (میلی‌گرم بر لیتر) درطول آزمایش سوم نسبت به زمان (ساعت) از زمان تزریق پساب

جدول ۳- تحلیل واریانس برای تغییرات غلظت فسفات درطول مدت آزمایش سوم

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۳۳/۳۱۴	۱	۳۳/۳۱۴	۸/۴۸^{ns}
ارقام	۷/۸۵۳	۲	۳/۹۳	
کل	۴۱/۱۶۸	۳		

ns: عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات در آزمایش سوم درسطح ۹۵ درصد

در شکل ۵ مشاهد می‌شود که تغییرات غلظت فسفات در طول آزمایش چهارم همانند آزمایش‌های اول و دوم است و رابطه معکوس بین مدت زمان و غلظت فسفات را نشان می‌دهد. هرچه زمان بیشتری از ابتدای آزمایش گذشته باشد، مقدار غلظت فسفات کاهش می‌یابد. آزمون واریانس برای مدت آزمایش به‌عنوان داده مستقل و غلظت فسفات به‌عنوان داده وابسته انجام شد. مقدار معنی‌داری در واریانس فرض H_1 را تایید می‌کند که بیانگر اختلاف (تاثیر) بین دو فاکتور اندازه‌گیری شده است (جدول ۴).



شکل ۵- غلظت فسفات (میلی‌گرم بر لیتر) درطول آزمایش چهارم نسبت به زمان (ساعت) از زمان تزریق پساب

جدول ۴- تحلیل واریانس برای تغییرات غلظت فسفات درطول مدت آزمایش چهارم

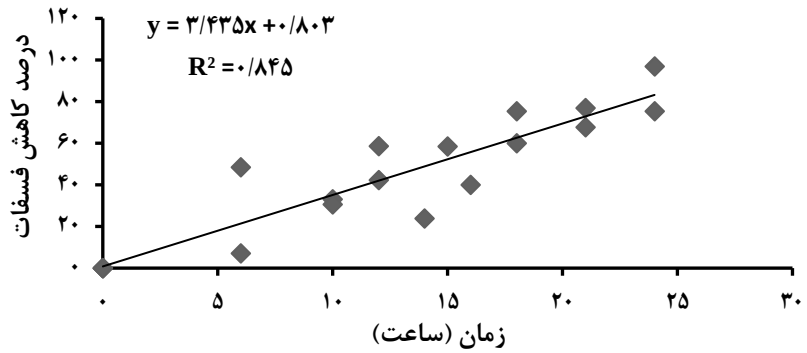
فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۹۱/۵۵	۱	۹۱/۵۵	۲۷۲/۰۷۱^{ns}
ارقام	۱/۰۱	۳	۰/۳۳۶	
کل	۹۲/۵۶	۴		

ns: عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات در آزمایش چهارم درسطح ۹۵ درصد

برای بررسی عملکرد بیوراکتور (شکل۶) با محاسبه درصد حذف آلاینده‌های موردنظر در هر آزمایش و به‌علت داشتن کمی تفاوت در غلظت‌های اولیه، تاثیر غلظت اولیه حذف شد. در آزمایش اول ۷۵٪ فسفات، در تکرار دوم ۴۸٪ فسفات، در تکرار سوم ۵۸٪ فسفات و در تکرار چهارم ۹۷٪ فسفات تزریق شده به پساب به‌وسیله بیوراکتور تصفیه شد.

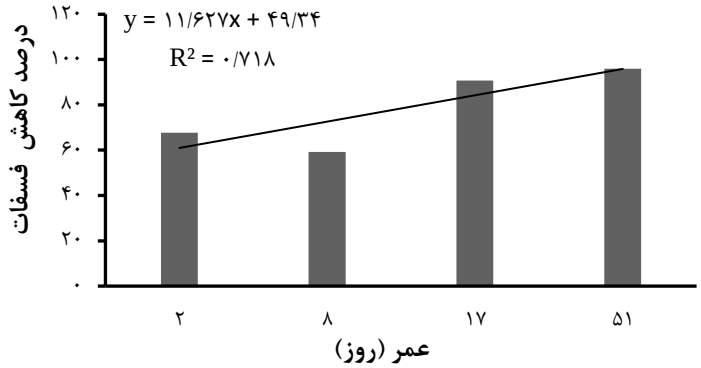
برای بررسی عمر کاه و کلش گندم در تصفیه پساب حاوی PO_4 از آزمون T زوجی یا آزمون T وابسته، یک بار روی نتایج

نمونه برداری‌ها و در مرحله بعد روی همان نتایج بدون درنظر گرفتن غلظت اولیه در هر آزمایش انجام شد. مقدار sig در آزمون t که برای نتایج مستقیم از نمونه‌برداری برابر ۰/۵۲۲، ۰/۴۸۷، ۰/۲۲ به‌دست آمد، بیانگر آن است که نتایج در سطح ۹۵٪ معنی‌دار نیست. نتایج کلی از مقدار sig آزمون t بیان می‌کند که با گذشت عمر کاه و کلش گندم تفاوتی در توانایی آن در حذف فسفات ایجاد نمی‌شود و یا این تفاوت بسیار ناچیز خواهد بود. برای بررسی بیشتر از آزمون تحلیل واریانس نیز استفاده شد. نتایج آزمون لوین[۴] حاکی از آن است که واریانس درون گروهی تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارد. لذا استفاده از آزمون تحلیل واریانس مجاز است. نتایج حاصل از آزمون تحلیل واریانس (جدول آنووا[۳]) نیز با مقدار معنی داری ۰/۳۴۶ و مقدار آماره F برابر ۱/۶۴ نتایج حاصل از آزمون t انجام شده را تایید می‌کند. با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت افزایش عمر برروی کاهش درصد فسفات اثرگذار نبوده است.



شکل ۶- درصد کاهش غلظت فسفات در طول آزمایش‌ها

شکل ۸ داده‌های مربوط به ۲۴ ساعت پس از آزمایش هستند که با توجه به آن می‌توان گفت افزایش یا کاهش دما بر کاهش درصد فسفات اثرگذار نبوده است. به‌منظور اطمینان از این مسئله آزمون کوواریانس و واریانس برروی داده‌ها انجام شد. نتایج بیانگر تاثیر نداشتن طول عمر و دما بر روی کاهش درصد فسفات است. به‌طور کلی کاه و کلش در بازه ۵۱ روزی که از عمر آن می‌گذرد هیچ تفاوت قابل مشاهده‌ای در تصفیه فسفات نداشته است. این به معنای عدم تغییر توانایی بیوراکتور در زمان‌های طولانی‌تر نیست، بلکه فقط می‌توان برای بازه زمانی ۵۱ روز این آزمایش این نتایج را پذیرفت.

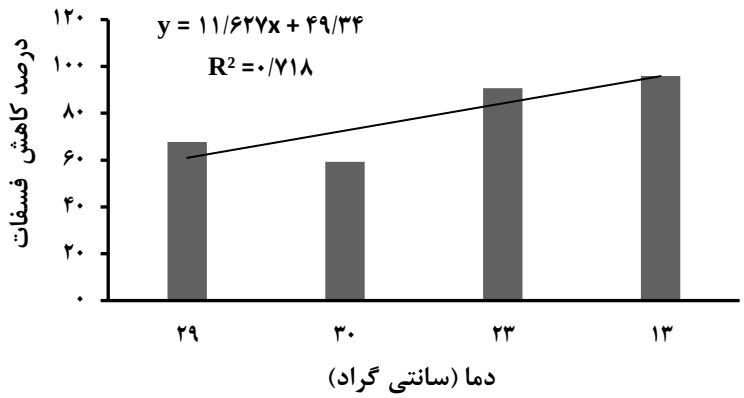


شکل ۷- درصد کاهش غلظت فسفات با گذشت عمر بیوراکتور در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش

جدول ۵- تحلیل واریانس برای درصدکاهش غلظت فسفات با گذشت عمر بیوراکتور در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۶۰۱/۷۳۵	۱	۶۰۱/۷۳۵	۳/۵۵۳*
ارقام	۳۳۸/۷۰۲	۲	۱۶۹/۳۵۱	
کل	۹۴۰/۴۳۷	۳		

* عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات با گذشت عمر بیوراکتور در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش درسطح ۹۵ درصد



شکل ۸- درصدکاهش غلظت فسفات با دما در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش

جدول ۶- تحلیل واریانس برای درصد کاهش غلظت فسفات با دما در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش

فسفات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۷۶۵/۹۲۷	۱	۷۶۵/۹۲۷	۸/۷۷۸*
ارقام	۱۷۴/۵۱۱	۲	۸۷/۲۵۵	
کل	۹۴۰/۴۳۷	۳		

* عدم معناداری در تغییرات غلظت فسفات با دما در ۲۴ ساعت بعد از آزمایش درسطح ۹۵ درصد

۴- نتیجه‌گیری

برای بررسی تاثیر و عملکرد راکتور زیستی در محیط آزمایشگاهی بدون جریان، چهار آزمایش در مدت ۵۱ روز انجام شد. آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری زهاب فسفات حاصل از راکتور زیستی با استفاده از دستگاه فتومتر موجود درآزمایشگاه آب گروه آب دانشکده فنی مهندسی انجام شد. هم‌چنین به‌طور هم‌زمان دما نیز با استفاده از دماسنج اندازه‌گیری شد. با توجه به آزمون‌های آماری انجام شده بر روی هریک از آزمایش‌ها به‌طور جداگانه برای حذف فسفات این نتیجه حاصل شد که با گذشت زمان از میزان غلظت اولیه فسفات کاسته می‌شود که بیانگر رابطه مستقیم میان درصد کاهش فسفات با زمان است. هرچه زمان از ابتدای آزمایش بگذرد میزان درصد کاهش فسفات افزایش می‌یابد. نکته مهم در مورد شیب، کاهش کم در شش ساعت اولیه از گذشت آزمایش است. حداکثر زمان توصیه شده برای ماند پساب با توجه به فعل و انفعالات درون محیط بی‌هوازی راکتور زیستی ۲۴ ساعت است که در تمام این آزمایش‌ها رعایت شده است.

مسئله بعدی که مورد توجه است تغییر اثر کاه و کلش گندم در تصفیه پساب‌ها پس از گذشت زمان است که در مراجع در بهترین حالت ۲۰ سال ذکر شده است. در پژوهش انجام شده توسط صادقی و همکاران (۱۴۰۱) بر روی زهاب طبیعی خروجی از زهکش‌های مزارع جنوب خوزستان با هدف بررسی استفاده از زئولیت کلینوپتیلولیت به‌عنوان جاذب در حذف آلاینده‌هایی از جمله نیترات و فسفات در شرایط pH برابر پنج، زمان ماند برابر ۹۰ دقیقه و دمای محیط برابر ۵۰ درجه سانتیگراد درنظر گرفته شده بود. بازدهی حذف نیترات و فسفات به‌ترتیب ۶۳ و ۳۹ درصد به‌دست آمد. نادری و همکاران (۱۳۹۹) از بیو راکتور برای حذف نیترات از زهاب کشاورزی استفاده کرده و مشاهده کردند که غلظت نیترات با گذشت زمان بین ۶ تا ۲۴ ساعت پس از تزریق زهاب بین ۵۴ تا ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده بیان می‌کند که در طول ۶ الی ۲۴ ساعت در آزمایش اول ۷۵٪ فسفات، در تکرار دوم ۴۸٪ فسفات، در تکرار سوم ۵۸٪ فسفات و در تکرار چهارم ۹۷٪ فسفات تزریق شده به پساب به‌وسیله راکتور زیستی تصفیه شد. نتایج کلی حاصل بیان می‌کند که راکتور زیستی در طول ۶ الی ۲۴ ساعت حداقل ۴۸٪ و حداکثر ۹۷٪ از فسفات ورودی را کاهش داده است. این نتایج بیانگر عملکرد قابل‌قبول راکتور زیستی درحذف فسفات از پساب‌ها است. با توجه به تمامی نتایج حاصل می‌توان استفاده و بررسی‌های بیشتر در ارتباط با حذف دیگر عناصر را نیز در محیط آزمایشگاهی توصیه نمود. هم‌چنین انجام تمام این بررسی‌ها در محیط واقعی نیز می‌تواند نتایج بیشتری را در خصوص راکتورهای زیستی در اختیار محققین قرار دهند.

۵- پی‌نوشتها

1- palintest
2- Levene’s test
3- ANOVA

۶- مراجع

صادقی، س.، الباحی، م.، گلابی، م.، و برومند نسب، س.، (۱۴۰۱)، "بررسی استفاده از زئولیت طبیعی کلینوپتیلولیت اصلاح‌شده در حذف نیترات، فسفات و شوری از زهاب کشاورزی در مدل زهکشی آزمایشگاهی"، *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۵(۱)، ۱۳۱-۱۵۲، https://doi.org/10.22055/JISE.2021.35721.1935.

نادری، آ.، رمضانی اعتدالی، ه.، اکرم، م.، و بی‌جن خان، م.، (۱۳۹۹)، "تصفیه نیترات زهاب‌های کشاورزی با استفاده از بیوراکتور"، *محیط‌زیست طبیعی*، ۷۳(۳)، ۶۱۳-۶۲۴.

هاشمی، ا.، حیدرپور، م.، و مصطفی‌زاده، ب.، (۱۳۹۰)، "بررسی میزان حذف نیترات در دو حالت قرارگیری فیلترهای زیستی در سیستم‌های زه‌کشی زیرزمینی"، *مجله علوم و مهندسی آبیاری*. ۳۴(۲)، ۷۱-۸۲.

همایی، م.، و ملکوتی، م.، (۱۳۷۳)، "حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه حشک، مشکلات و راه‌حل‌ها"، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۴۹۴ صفحه.

Addy, K., Gold, A.J., Christianson, L.E., David, M.B., Schipper, L.A., and Ratigan, N.A., (2016), "Denitrifying bioreactors for nitrate removal: A meta-analysis", *Journal of Environment Quality*, 45(3), 873-881, https://doi.org/10.2134/jeq2015.07.0399.

Ashoori, N., Teixido, M., Spahr, S., Lefebvre, G.H., Sedlak, D.L., and Luthy, R.G., (2019), "Evaluation of pilot-scale biochar-amended woodchip bioreactors to remove nitrate, metals, and trace organic contaminants from urban storm water runoff", *Water Research*, 154, 1-11, https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.040.

Chang, H., Yang, X., and Fang, H., (2006), "In situ nitrogen removal from the eutrophic water by microbial plant intergrated system", *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 7, 521-531.

Dixit, R., Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U.B., Sahu, A., Shukla, R., and Paul, D., (2015), "Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes", Sustainability, 7(2), 2189-2212, https://doi.org/10.3390/su7022189.

Eslami, A., and Nemati, R., (2015), "Removal of heavy metal from aqueous environments using bioremediation technology_review", *Journal of Health in the Field*, 2(3), 43-51.

Greenan, C.M., Moorman, T.B., Kaspar, T.C., Parkin, T.B., and Jaynes, D.B., (2006), "Comparing carbon substrates for denitrification of subsurface drainage water", *Journal of enviremental quality*, 35(3), 824-829, https://doi.org/10.2134/jeq2005.0247.

Hassanpour, B., Giri, S., Pluer, W., Steenhuis T., and Geohiring, L. (2017), "Seasonal performance of denitrifying bioreactors in the Northeastern United States: Field trials", *Journal of Environmental Management*, 202(1), 242-253, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.054.

Kellman, L.M., (2005), "A study of tile drain nitrate -15N values as a tool for assessing nitrate sources in an agricultural region", *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71(2), 131-137.

Lopez-Ponnada, E.V., Lynn, T.J., Peterson, M., Ergas, S.J., and Mihelcic, J.R., (2017), "Application of denitrifying wood chip bioreactors for management of residential non-point sources of nitrogen", *Journal of Biological Engineering*, 11(1), 16, https://doi.org/10.1186/s13036-017-0057-4.

Maxwell, B.M., Díaz-García, C., Martinez-Sánchez, J.J., Brigand, F., and Álvarez-Rogel, J., (2020), "Temperature sensitivity of nitrate removal in woodchip bioreactors increases with woodchip age and following drying–rewetting cycles", *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6(10), 2752-2765.

Mokarram, P., Jaberi, H., Khoshdel, Z., Miladpour, B., Ramezani, F., Fahmideh, M.A., and Movahedi, B., (2013), "Comparing the atomic absorption spectrophotometery and photometery", *Iranian Standardization Elements Congress of Kashan University of Medical Sciences*, 16, 705-706.

Rafiee, S., and Asadi Rahmani, H., (2010), "Isolation and identification of the different species of flavobacterium from the rhizosphere of wheat cultivated in the different regions of Iran", *Journal of Water and Soil*, 24(2), https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.3242.

Sharrer, K.L., Christianson, L.E., Lepine, C., and Summerfelt, S.T., (2016), "Modeling and mitigation of denitrification 'woodchip 'bioreactor phosphorus releases during treatment of aquaculture wastewater", *Ecological Engineering*, 93, 135-143, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.019.

South Dakota Water Research Institute, (2015), *Annual Technical Report FY 2015*, The College of Agricultural and Biological Sciences at South Dakota State University, USA.

Yanpeng, M., Chao, X., Qinyan, Y., Wenlong, W., and Zhanlong, S., (2018), "Fate and distribution of phosphorus in laboratory-scale membrane bioreactors", *Chemical Engineering Research and Design*, 133(5), 204-209. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.03.011.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.