DOI: 10.22059/ijswr.2020.296116.668477 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۵، مرداد ماه ۱۳۹۹ (ص ۱۱۱۳-۱۱۰۵)

Evaluating the Efficiency of Bioreactor with Triangular Cross Section to Remove Nitrate from Agricultural Wastewater

HOSSIN ASGARI[1], JAVANSHIR AZIZI MOBASER[1*], ALI RASOULZADEH[1], JAVAD RAMAZANI MOGHADAM[1]

1. Department of Water Engineering Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

(Received: Jan. 21, 2020- Revised: Jan. 30, 2020- Accepted: Feb. 5, 2020)

ABSTRACT

Nitrate is one of the most important pollutants in drainage water in agricultural lands. Biological removal or reduction of nitrate has recently been considered in different parts of the world. The bioreactor with the denitrification process is one of the newest solutions for this purpose. Scientific and local experience is needed to optimally use the bioreactor. Due to the existence of Moghan irrigation and drainage network and a high volume of effluent, this study was conducted to evaluate the efficiency of bioreactor for removal of nitrate at Moghan plain conditions. The cross-section of bioreactor was triangular and water retention times were 12, 16 and 24 hours. The bioreactor core was selected from wood chip, wheat straw and corn chips as carbon-based and treated substrates, and each treatment had three replicates. Results of 12 hours retention time showed that, on average, the wood chip reduced the initial nitrate by 29.84%, which had the highest nitrate depletion among the organic matters. The performance of the two other organic matters was not significantly different according to Duncan test. In 16 hours retention time, the performance of bioreactors with different organic matters was statistically different for nitrate removal and the wood chip, wheat straw and corn stalk treatments were prioritized with 40.1, 35.23 and 28% nitrate removal, respectively. In 24 hours retention time, although all three treatments had the same performance for nitrate removal from agricultural wastewater, the wood chip treatment with 46.75% removal efficiency was the best. The results also showed that the percentage of nitrate removal increased with increasing the retention time for all three treatments.

Keywords: Agricultural Wastewater, Nitrate, Nitrification, Bioreactor.

[*]Corresponding Author's Email: a.mobaser22@gmail.com

ارزیابی کارایی راکتور زیستی با مقطع مثلثی برای حذف نیترات پساب کشاورزی

حسین عسگری [۱]، جوانشیر عزیزی مبصر [۱*]، علی رسول‌زاده [۱]، جواد رمضانی مقدم [۱]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۰- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶)

چکیده

نیترات یکی از مهم‌ترین آلوده‌کننده‌های آب زهکش، در اراضی کشاورزی است. حذف یا کاهش بیولوژیکی نیترات، اخیراً در نقاط مختلف دنیا موردتوجه قرار گرفته است. راکتورهای زیستی توسط فرآیند نیتروژن‌زدایی، یکی از جدیدترین راه‌حل‌ها، برای این منظور هستند. برای استفاده بهینه از راکتور زیستی نیاز به تجربیات علمی و محلی است. با توجه به وجود شبکه آبیاری و زهکشی مغان، و حجم بالای پساب تولیدی، این تحقیق به‌منظور بررسی کارآیی راکتور زیستی برای حذف نیترات متناسب با شرایط دشت مغان انجام شد. مقطع راکتور زیستی مثلثی و زمان‌های ماند آب در آن ۱۶،۱۲ و ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. هسته راکتورهای زیستی از تراشه چوب، کاه و کلش گندم و تراشه ساقه ذرت به‌عنوان تیمار اصلی، و هر تیمار دارای سه تکرار انتخاب شد. نتایج نشان داد به‌طور متوسط در زمان ماند ۱۲ ساعت، تراشه چوب نیترات اولیه را ۲۹/۸۴ درصد کاهش داد که بیش‌ترین درصد حذف نیترات را در بین مواد آلی داشت، و عملکرد دو ماده آلی دیگر، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری نداشتند. در زمان ماند ۱۶ ساعت عملکرد تیمارهای مواد آلی از نظر آماری برای حذف نیترات کاملاً با هم متفاوت بود، و تیمارهای تراشه چوب، کاه و کلش گندم و تراشه ساقه ذرت به‌ترتیب با درصد حذف ۴۰/۱، ۳۵/۲۳ و ۲۸ اولویت‌بندی شدند. در زمان ماند ۲۴ ساعت اگر چه از نظر آماری هر سه تیمار ماده آلی عملکرد یکسانی برای حذف نیترات از پساب کشاورزی داشتند، اما تیمار تراشه چوب با درصد حذف ۴۶/۷۵ بهترین عملکرد را داشت. همچنین نتایج نشان داد که برای هر سه تیمار ماده آلی با افزایش زمان ماند درصد حذف نیترات نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پساب کشاورزی، نیترات، نیتروژن‌دهی، راکتور زیستی.

مقدمه

زهکش‌های مصنوعی اجراشده در اراضی کشاورزی سبب افزایش عملکرد محصول، بهینه کردن زمان اجرای عملیات کشاورزی، بهره‌برداری مناسب از زمین و قابل کاربرد بودن اراضی شور و زه‌دار در سراسر دنیا شده‌اند (Christianson *et al.*, 2012؛ Cook, 2011). علاوه بر آن، با استفاده از اجرای کامل شبکه زهکشی، که زیر تراز آب زیرزمینی قرار می‌گیرند، می‌توان تولید محصولات کشاورزی را افزایش داد (Hoover *et al.*, 2016). از جمله این شبکه‌ها می‌توان به شبکه‌ی زهکشی اجراشده در دشت مغان اشاره نمود. بنا بر اندازه‌گیری‌های انجام‌شده میانگین هفت‌ساله (۱۳۷۸-۱۳۸۵)، حجم آب خروجی از هشت زهکش اصلی در دشت مغان ۲۲۰ میلیون مترمکعب در سال گزارش شده است (Keramati Taraghi *et al.*, 2009). در کنار آثار مثبت اجرای شبکه‌های زهکشی باید در نظر داشت که زهکشی در مزارع کشاورزی منجر به تخلیه بار نیترات به آب‌های سطحی و زیرسطحی می‌شود (Christianson *et al.*, 2010). منبع تولید نیترات در پساب کشاورزی، کودهای نیتراته و مواد آلی خاک است. بخشی از نیترات خاک که جذب گیاهان نشده است، توسط تلفات آبیاری یا بارندگی، به زهکش‌ها منتقل شده و در نهایت به آب‌های سطحی و زیرسطحی وارد می‌شوند (Feyereisen *et al.*, 2016). تحقیقات انجام‌شده نشان داده است که نسبت به سایر فعالیت‌های اقتصادی، کشاورزی بیش‌ترین سهم را در تولید نیترات دارد، که حدود ۶۰ درصد از این نیترات، به مصرف گیاه نمی‌رسد و بدون استفاده به محیط‌زیست وارد می‌شود (Husk *et al.*, 2017). نظر به تعریف جدید زهکشی از نظر بانک جهانی که عبارت است از خارج کردن آب سطحی اضافی و مدیریت سفره آب زیرزمینی کم‌عمق از طریق نگهداشت، دفع و مدیریت کیفیت آب برای رسیدن به منافع دلخواه اقتصادی و اجتماعی، به‌طوری‌که محیط‌زیست حفظ گردد، پس باید شیوه‌های معمول مدیریت پساب کشاورزی، به روش‌های سازگار با محیط‌زیست تغییر داده شود. در این راستا می‌توان افزایش کارآیی مصرف آب و استفاده از زه‌آب و پساب فاضلاب‌ها و زهکشی به روش زیستی، زهکشی

*نویسنده مسئول: a.mobaser22@gmail.com

خشک و زهکشی کنترل‌شده را نام برد (Shakiba *et al*., 2014). یکی از مهم‌ترین آلودگی پساب‌های کشاورزی وجود نیترات است که برای حذف آن باید عمل احیاء صورت گیرد. احیای نیترات یا نیتریت به گازهای ازته شامل N_2O، NO و یا N_2 را نیتروژن‌دهی[1] می‌گویند که به‌صورت بیولوژیک و شیمیایی اتفاق می‌افتد. حدود ۹۹ درصد از نیتروژن‌دهی به روش بیولوژیک انجام می‌گیرد (Hashemi *et al*., 2011). فرآیند نیتروژن‌دهی بیولوژیک، در خاک‌های سطحی بیش‌تر از خاک‌های زیرسطحی انجام می‌شود و علت آن محدویت کربن در خاک‌های زیرسطحی است (Feyereisen *et al*., 2016). از جمله راه‌کارهای مدیریتی برای کنترل و حذف نیترات پساب‌ها، استفاده از راکتورهای زیستی است که در نیتروژن‌زدایی با ترانشه‌های پر از کربن که از طریق آن به زهکشی اجازه افزایش نیتروژن‌دهی را می‌دهد، تشکیل شده است (Christianson *et al*., 2010؛ Cameron and Schipper, 2012). راکتور زیستی گزینه‌ای است که به‌عنوان یک تکنولوژی برای حذف مواد مغذی موجود در زه‌آب‌ها، در ایالات متحده پتانسیل بالقوه‌ای از خود نشان داده است (Hassanpour *et al*., 2017). حذف نیترات باعث کاهش سرشاری غذایی[2] در آب‌های سطحی می‌شود (Kargar, 2005). راکتورهای زیستی با هسته چوب به‌عنوان منبع کربن در مسیر زهکش‌ها ایجاد شده و با حفر ترانشه و پرکردن آن توسط تراشه‌ی چوب آماده‌ی کار می‌شوند. مطالعه و تحقیق در خصوص استفاده از راکتور زیستی در اونتاریو کانادا، ایسلند شمالی و نیوزیلند آغاز شد و در ایالات متحده در دهه اخیر شتاب بیش‌تری پیدا کرده است (Hassanpour *et al*., 2017). اگرچه راکتورهای زیستی برای کاهش بار نیترات توصیه شده‌اند، اما برای هر محل نیاز است که بازدهی آن‌ها متناسب با اقلیم و امکانات موجود ارزیابی شود (Christianson *et al*., 2010؛ Hassanpour *et al*., 2017). علی‌رغم اینکه استفاده از راکتور زیستی در زهکشی کشاورزی به‌عنوان یک فناوری جدید مطرح شده، اما اطلاعاتی زیادی در مورد طراحی و نگهداری آن‌ها وجود ندارد، بنابراین لازم است در خصوص هیدرولیک و فرآیندهای داخلی آن‌ها تحقیق شود (Christianson *et al*., 2013؛ Cook, 2011). در نقاط مختلف دنیا، تحقیقات متنوعی در مورد راکتورهای زیستی انجام شده است. از جمله هندسه راکتور و عملکرد آن توسط Christianson *et al*. (2011) در مقیاس آزمایشی در ایالات متحده مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج این تحقیق نشان داد که شکل مقطع رآکتور بر مقدار حذف نیترات مؤثر است. مشابه این تحقیق توسط Cameron and Schipper (2012)، برای بررسی خصوصیات و بازدهی هیدرولیکی راکتور زیستی در حذف نیترات از پساب زهکشی انجام شد و دریافتند که در تحقیقات آینده باید بر مقدار کربن در دسترس برای حذف نیترات در راکتور زیستی، توجه شود. علاوه بر آن Nordstrom and Herbert (2017)، تأثیر دما بر حذف نیترات در راکتور زیستی ساخته‌شده با تراشه چوب را بررسی کردند، که نتایج تحقیقات این محققین نشان داد در دمای کمتر از ۵ درجه حذف نیترات به‌صورت ناقص انجام می‌شود. Hoover *et al*. (2016) تأثیر دما، هیدرولیک و زمان ماند بر حذف نیترات را در راکتور زیستی مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که افزایش دما حذف نیترات را افزایش می‌دهد. همچنین Feyereisen *et al*. (2016)، در مقیاس آزمایشگاهی تأثیر دمای کم را در راکتور زیستی بررسی کردند. مدیریت و اجرای راکتور زیستی در فصل‌های مختلف در شمال‌شرقی ایالات متحده با هدف آموزش مزرعه‌ای توسط Hassanpour *et al*. (2017) انجام گرفت و مشخص شد که تغییر دما از ۱۵/۵ به ۱/۵ درجه باعث کاهش حدود ۸۰ درصدی حذف نیترات می‌شود. Husk *et al*. (2017) ، تحقیقی در خصوص کاهش غلظت نیترات پساب زهکش زیرزمینی با استفاده از راکتور زیستی و زهکش کنترلی انجام دادند و دریافتند استفاده توأم زهکش کنترل‌شده و رآکتور زیستی در مقیاس مزرعه‌ای راهکار مناسبی برای حذف نیترات می‌باشد. Lepine *et al*. (2016) عملکرد حذف نیترات در راکتور زیستی با توجه به زمان ماند و سیستم بازچرخانی آب کشاورزی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مشخص شد اکسیژن و دمای بالای پساب منجر به حذف نیترات بیش‌تری می‌شود. Partheeban (2011) ، مطالعاتی در مورد مشاهده اثرات حذف نیترات در راکتورهای زیستی برای بهبود مدیریت آب زهکشی در جنوب داکوتا انجام دادند و نشان دادند که این رآکتورها تأثیر مثبتی بر کیفیت پساب زهکشی منطقه دارند. Yamashita and Ikemoto (2014) ، مقدار حذف نیتروژن و فسفات از پساب خانگی توسط یک راکتور زیستی با هسته‌ای از جنس چوب و براده آهن را، بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از براده آهن به همراه تراشه چوب تأثیر مثبتی بر حذف این آلودگی‌ها دارد.

نظر به نتایج تحقیقات انجام شده، استفاده از رآکتور زیستی برای حذف نیترات پساب کشاورزی یک راهکار عملی در راستای مدیریت پایدار آب کشاورزی است. با عنایت به اینکه هسته این رآکتورها از جنس مواد آلی از قبیل چوب بوده که در اکثر مناطق کشور تهیه چوب به مقدار موردنیاز امکان‌پذیر نیست، برای استفاده از آن محدودیت‌هایی وجود دارد. همچنین ساخت و مراقبت از راکتور زیستی مستلزم هزینه و تجربه است. هر چه

1 - Denitrification

2 -Eutrophication

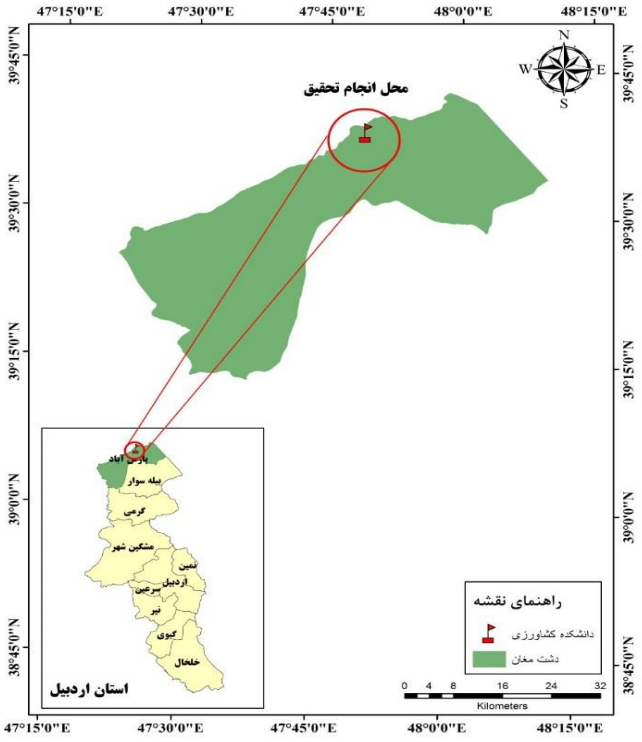
راکتورهای زیستی حجم بزرگ‌تری داشته باشند، هزینه آن نیز بیش‌تر است. از طرفی حجم راکتور زیستی رابطه مستقیمی با زمان ماند دارد. بنابراین نیاز است به‌صورت دقیق مشخص شود کارآیی مواد آلی استفاده شده در راکتور زیستی با توجه به زمان‌های ماند مختلف به‌صورت جداگانه و در مقایسه با هم چگونه است؟ آیا هسته‌های متفاوت، از نظر کارآیی حذف نیترات با هم اختلاف معنی‌داری دارند؟ کدام هسته عملکرد بهتری برای حذف نیترات، از پساب کشاورزی را دارد؟ کدام زمان ماند تأثیر بیش‌تری دارد؟ آیا بین زمان‌های انتخاب‌شده از نظر آماری تفاوت وجود دارد؟

برای دستیابی به راه‌کارهای احتمالی و پاسخ به سؤال‌های مطرح‌شده، تحقیق حاضر برنامه‌ریزی شد. به علت کارآیی مناسب تراشه‌های چوب (بنا بر تحقیقات انجام شده) و در دسترس بودن کاه و کلش گندم و تراشه‌های ساقه ذرت در اکثر مناطق کشور، این پژوهش با هدف ارزیابی راکتورهای زیستی با هسته‌هایی از جنس تراشه چوب، کاه و کلش گندم و تراشه‌های ساقه ذرت، انجام شد.

مواد و روش‌ها

محل انجام تحقیق

تحقیق حاضر در دشت مغان انجام شد (شکل ۱). دشت مغان از لحاظ موقعیت جغرافیایی بین ۳۹ درجه و۲۰ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده و از سطح دریا به‌طور متوسط ۴۵ متر ارتفاع دارد. منطقه‌ی مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک با تابستان گرم و زمستان سرد است. متوسط ساعات آفتابی سالیانه ۱۸۷/۳ ساعت، متوسط بیشینه دمای سالیانه منطقه، ۲۰/۵ درجه سانتی‌گراد، متوسط کمینه دمای سالیانه منطقه، ۹/۸ درجه سانتی‌گراد، بیشینه مطلق دمای هوا، ۴۱ درجه سانتی‌گراد، کمینه مطلق دمای هوا، ۱۵- درجه سانتی‌گراد و متوسط تبخیر سالیانه ۱۴۸/۶ میلی‌متر است. متوسط رطوبت نسبی سالیانه ۷۱ درصد و مقدار متوسط بارندگی سالیانه ۲۶۴/۱ میلی‌متر است (Abdi Aghdam *et al*., 2018).



شکل ۱- موقعیت محل اجرای طرح

روش اجرای طرح

مقطع راکتور زیستی اجراشده، به‌صورت مثلثی با جزئیاتی که در شکل (۲) نیز مشخص شده، اجرا شد. همان‌گونه که در شکل مشخص شده، برای جلوگیری از نفوذ آب، کف راکتور با یک لایه نفوذناپذیر محافظت شده است. عمق کلی راکتور ۷۵ سانتی‌متر است که ۶۰ سانتی‌متر آن ماده آلی و ۱۵ سانتی‌متر باقی‌مانده به‌وسیله خاک پر شده است. شیب جانبی دیواره‌های آن با نسبت ۱:۱ طراحی و اجرا شد. با توجه به تغییرات مقدار نیترات قبل و

بعد از راکتور زیستی در دبی‌های مختلف، می‌توان دبی مناسب برای استفاده مجدد از زه‌آب که غلظت مناسب برای آبیاری را دارد، تعیین نمود. معادلات مختلفی برای تعیین دبی جریان ورودی به راکتورهای زیستی پیشنهاد شده است که چهار مورد از آن‌ها به شرح زیر است (Christianson *et al*., 2011):

(رابطه ۱)
$$Q = 0.02(L\ 0.437H)H^{1.48} \qquad H \le 0.44L$$

(رابطه ۲)
$$Q = 0.027LH^{\frac{1}{2}} \qquad H > 0.44L$$

برای سازه کنترل ۳۰ سانتی‌متری از معادله زیر استفاده می‌شود:

(رابطه ۳)
$$Q = 0.02\left(\frac{L0}{74H}\right)H^{\frac{1}{48}} \qquad H \le 0.27L$$

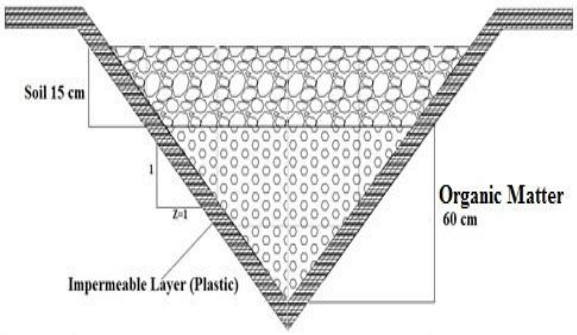
(رابطه ۴)
$$Q = 0.021 * L * H^{1.37} \qquad H > 0.27L$$

در روابط (۱) تا (۴)، Q جریان عبوری از سازه (لیتر بر ثانیه)، L عرض پایه متوقف کننده جریان (سانتی‌متر)، H عمق جریان بالای پایه (سانتی‌متر) است.

برای تعیین زمان ماند از معادله (۵) به شکل زیر استفاده می‌شود:

(رابطه ۵)
$$\tau = \frac{\rho v}{Q}$$

که در رابطه (۵)، V حجم فعال راکتور، ρ تخلخل ماده بسته‌بندی شده (راکتور)، Q نرخ جریان حجمی راکتور است.



شکل ۲- مقطع راکتور زیستی مورداستفاده در تحقیق با مشخصات هندسی

شایان ذکر است دبی جریان ورودی و خروجی از طریق نصب سرریز و بر اساس روابط (۱) الی (۴) در مزرعه کنترل می‌شود. با کنترل دبی، رابطه (۵) و مشخصات ابعادی راکتور که در شکل (۲) ارائه شده زمان ماند، یا حجم اجرایی راکتور در مزرعه محاسبه می‌شود. همچنین مقایسه نمونه‌های برداشت شده قبل و بعد از راکتور نشان‌دهنده تأثیر ماده آلی استفاده‌شده و زمان ماند جریان در راکتور خواهد بود. هسته راکتورهای زیستی از مواد آلی تشکیل می‌شود، بنابراین انتخاب ماده آلی مناسب بسیار با اهمیت خواهد بود. پارامترهای دیگری که بر انتخاب نوع مواد آلی مؤثر است، هزینه تهیه و دسترسی آسان به این مواد است. راکتورها مطابق مقطع شکل (۲) و به طول ۲ متر ، ساخته و اجرا شدند. از پساب شبکه آبیاری و زهکشی مغان برای عبور از راکتورهای ساخته‌شده استفاده شد. تیمارهای اصلی این تحقیق مواد آلی استفاده‌شده به‌عنوان هسته راکتورهای زیستی شامل، تراشه چوب، کاه و کلش گندم و تراشه ساقه ذرت بودند. از سه زمان ماند ۱۲، ۱۶ و ۲۴ ساعت به‌عنوان تیمار فرعی در این تحقیق استفاده شد. از طرح آماری فاکتوریل در کرت‌های کاملاً تصادفی برای اجرای طرح استفاده و برای هر تیمار ماده آلی تعداد ۳ تکرار در نظر گرفته شد. از پساب خروجی راکتورهای زیستی در زمان‌های ماند مشخص‌شده، نمونه‌برداری و نیترات باقیمانده در پساب تصفیه‌شده با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر (UV/Vis) با تنظیم طیف نوری روی ۲۲۰ و ۲۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. مقدار دقیق غلظت نیترات در آب از طریق بدست آوردن عدد جذب (k) طبق رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

(رابطه ۶)
$$k = Abs\ 220 - (2 * Abs\ 275)$$

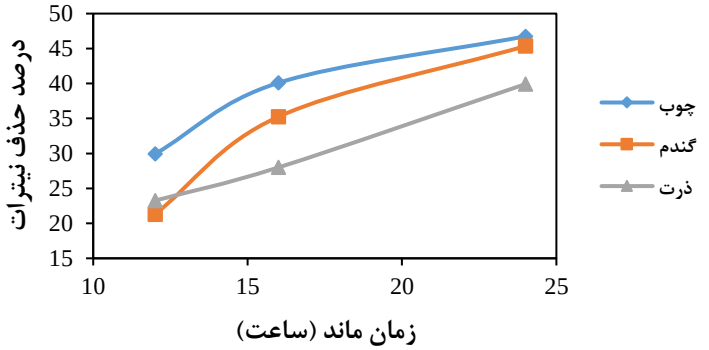
در رابطه (۶)، جذب در ۲۷۵ نانومتر مربوط به تداخل‌های مواد آلی است. مقدار غلظت نهایی نیترات از مقایسه عدد به‌دست‌آمده از رابطه بالا با منحنی استاندارد رسم شده به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است، تنها در صورتی که دو برابر مقدار جذب در طیف نوری ۲۷۵ نانومتر، کمتر از ۱۰٪ در ۲۰ نانومتر باشد، می‌توان از رابطه فوق استفاده کرد. همچنین لازم به ذکر است که، آب ورودی به راکتورها، پساب خروجی زهکش اصلی شبکه زهکشی کشت و صنعت دشت مغان بود که در هر بار استفاده از آن نمونه‌برداری و غلظت نیترات در آن اندازه‌گیری می‌شد. با مقایسه غلظت نیترات ورودی به راکتورها، در همه‌ی تیمارها، و غلظت نیترات خروجی از آن‌ها درصد حذف نیترات مشخص شد. پس از قرائت و جمع‌آوری داده‌ها برای تحلیل آماری، از نرم‌افزار SPSS16 استفاده شد. بررسی آماری نتایج آزمایش با در نظر گرفتن سه ماده آلی در سه زمان ماند و با تعداد سه تکرار، از طریق تجزیه واریانس انجام شد. در صورت معنی‌داری اختلاف نتایج تیمارها، برای مقایسه‌ی میانگین‌ها، از روش دانکن در سطح احتمال یک یا ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

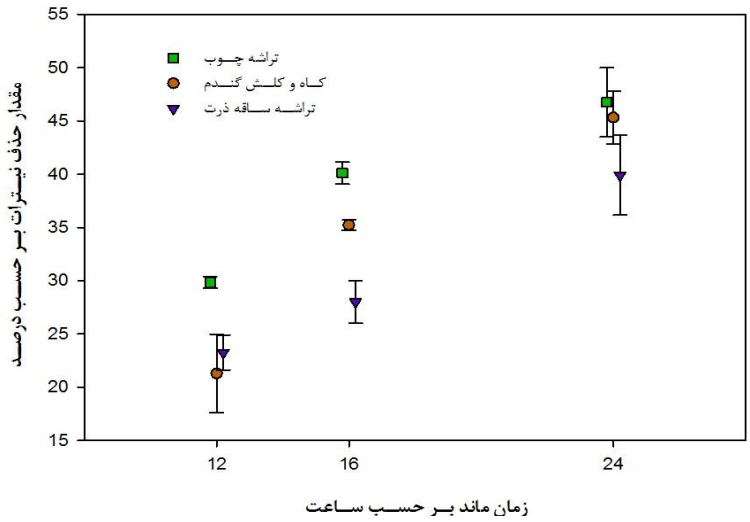
نتایج تجزیه واریانس نشان داد بین زمان‌های ماند و نوع مواد آلی استفاده‌شده به‌عنوان هسته‌های راکتور زیستی، به لحاظ تأثیر بر حذف نیترات پساب کشاورزی، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد وجود دارد (جدول ۱). به‌عبارت‌دیگر، مواد آلی استفاده‌شده و زمان‌های ماند در نظر گرفته‌شده، از عوامل مؤثر بر حذف نیترات در راکتور زیستی هستند.

نتایج مربوط به میانگین و دامنه تغییرات درصد حذف

نیترات برای سه ماده آلی استفاده‌شده به‌عنوان هسته راکتور زیستی، در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده است. در سه زمان در نظر گرفته‌شده، بیش‌ترین مقدار حذف نیترات برای هسته تشکیل‌شده از تراشه‌های چوب و در زمان ماند ۲۴ ساعت، با درصد حذف ۳/۲۵ ± ۴۶/۷۵ و کم‌ترین مقدار حذف مربوط به تیمار هسته تشکیل شده از پوشال گندم در مدت زمان ماند ۱۲ ساعت، با درصد حذف ۳/۶۸ ± ۲۱/۲۹ مشاهده شد (جدول ۲). روند تغییرات مشخص‌شده در شکل (۳) نشان می‌دهد که برای هر سه هسته با افزایش زمان ماند درصد حذف نیترات نیز افزایش یافته است، که مشابه این نتایج توسط Christianson *et al.* (2011) نیز گزارش شده است. علاوه بر آن نتایج نشان داد از نظر عملکرد برای حذف نیترات، به‌ترتیب اولویت مواد آلی، تراشه چوب، پوشال گندم و راکتور زیستی با هسته تراشه‌های ساقه ذرت می‌باشند.



شکل ۳- تغییرات درصد حذف نیترات متناسب با تغییر زمان ماند برای هر سه نوع ماده آلی به‌عنوان هسته راکتور زیستی



شکل ۴- میانگین و دامنه تغییرات درصد حذف نیترات در زمان‌های ماند برای مواد آلی مختلف

جدول ۱- تجزیه واریانس درصد حذف نیترات اندازه‌گیری شده برای زمان‌های ماند، نوع ماده آلی

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig
زمان ماند	۱۶۶۰/۲۳۸*	۲	۸۳۰/۱۱۹	۱۴۲/۳۱۲	۰/۰۰
ماده آلی	۳۲۸/۵۷۲*	۲	۱۶۴/۲۸۶	۲۸/۱۶۴	۰/۰۰
زمان ماند× ماده آلی	۹۲/۲۴۱*	۴	۲۳/۰۶	۳/۹۵۳	۰/۰۱۸
خطا	۱۰۴/۹۹۶	۱۸	۵/۸۳۳		
کل	۳۴۱۶۲/۹۱۶	۲۷			

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

در صورت محدودیت زمین (مساحت یا قیمت زمین) برای اجرای راکتور زیستی، زمان ماند نیز محدود می‌شود، لذا برای

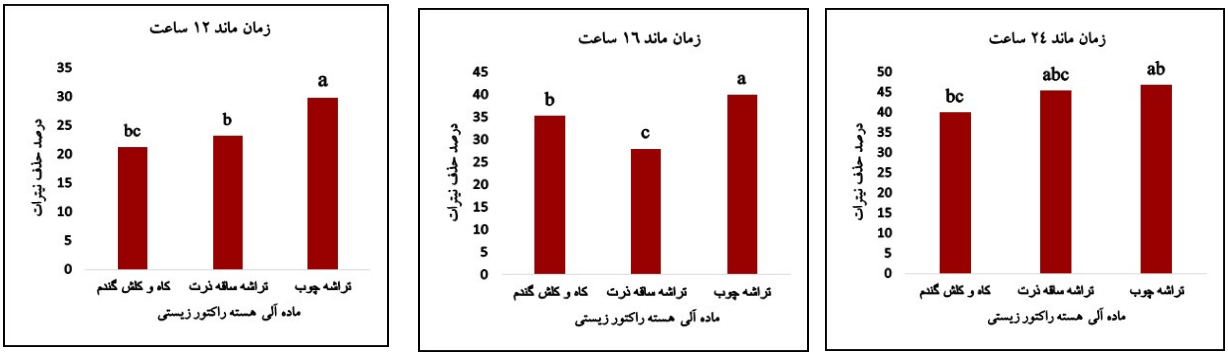
انتخاب مناسب‌ترین راکتور زیستی، ماده آلی که بیش‌ترین درصد حذف نیترات را در کم‌ترین زمان ماند داشته، انتخاب می‌شود. در این شرایط تراشه چوب که در زمان ماند ۱۲ ساعت نیترات پساب ورودی را به مقدار ۰/۵۲ ± ۲۹/۹۲ درصد حذف نموده، بهترین گزینه خواهد بود (جدول ۲). علت بهتر بودن چوب می‌تواند مقدار بیش‌تر کل کربن آلی چوب (TOC[1]) در این زمان باشد، زیرا اهمیت این عامل برای حذف بیولوژیکی نیترات توسط Corbett *et al.* (2019) مورد تأکید قرار گرفته است. لازم به ذکر است که علت افزایش کربن آلی در ساعات اولیه برای تراشه چوب در مدت زمان کم، سطح تماس زیاد آن نسبت به کاه و کلش گندم و تراشه ساقه ذرت است که با افزایش زمان تعدیل می‌شود (Zhao *et al.*, 2020). علاوه بر آن نتایج نشان داد در همه‌ی تیمارها افزایش زمان ماند، تأثیر مستقیم بر حذف نیترات دارد، که مشابه این نتایج توسط Christianson *et al.* (2012) و Greenan *et al.* (2009) گزارش شده است. نتیجه تحقیق این محققین نشان داد که برای حذف نیترات به میزان ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ به‌ترتیب از چند ساعت تا چند روز زمان نیاز است. همچنین مقایسه آماری میانگین‌ها نشان داد که برای ماده‌های آلی تراشه چوب و کاه و کلش گندم، عامل زمان بر مقدار حذف نیترات، یک عامل تأثیرگذار است. اما در ماده آلی تراشه ساقه ذرت، افزایش زمان ماند از ۱۲ به ۱۶ ساعت بر مقدار حذف نیترات تأثیر معنی‌داری نداشته است. علت این امر می‌تواند به دلیل ناهمگونی تراشه‌های ماده آلی تراشه ساقه ذرت باشد، که این ناهمگونی در زمان‌های کوتاه باعث کاهش سطح تماس می‌شود. کاهش سطح تماس ماده آلی با آب، باعث می‌شود کربن کم‌تری در بستر آزاد شود، که Feyereisen *et al.* (2016) و Greenan *et al.* (2006) نیز به این مطلب اشاره داشته‌اند.

جدول ۲- مقایسه میانگین درصد حذف نیترات در زمان‌های ماند مختلف، به روش دانکن در سطح احتمال ۵ درصد

ماده آلی / زمان ماند	کاه و کلش گندم	تراشه‌های چوب	تراشه‌های ساقه ذرت
۱۲ ساعت	± ۳/۶۸ ۲۱/۲۹^{c}	± ۰/۵۲ ۲۹/۹۲^{c}	± ۱/۶۴ ۲۳/۲۵^{bc}
۱۶ ساعت	± ۰/۴۷ ۳۵/۲۴^{b}	± ۱/۰۳ ۴۰/۱^{b}	±۲ ۲۸/۰۰^{b}
۲۴ ساعت	± ۲/۴۹ ۴۵/۳۴^{a}	± ۳/۲۵ ۴۶/۷۵^{a}	± ۳/۷۴ ۳۹/۹۲^{a}

اعداد دارای حروف متفاوت در یک ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار است

چنانچه محدودیت زمین و زمان ماند وجود نداشته باشد و هدف از اجرای راکتور زیستی، حذف بیش‌تر نیترات از پساب باشد، عملکرد راکتورها در زمان‌های ماند یکسان تعیین کنند خواهد بود. در این شرایط مقایسه میانگین‌ها انجام شد که نتیجه آن در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه میانگین حذف نیترات در راکتورهای با مواد آلی مختلف، به روش دانکن در سطح احتمال ۵ درصد

نتایج نشان داد تأثیر ماده آلی تراشه چوب در زمان‌های ماند ۱۲ و ۱۶ ساعت بر حذف نیترات معنی‌دار بوده و بیش‌ترین درصد حذف برای این ماده آلی برای ساعت‌های ماند مذکور به ترتیب ۲۹/۹۲٪ و ۴۰/۱ ٪ به‌دست آمد. افزایش مقدار حذف نیترات با افزایش زمان ماند توسط Lepine *et al.* (2016) نیز گزارش شد، که این محققین یکی از عوامل را گرم‌تر شدن آب در داخل راکتور و واکنش بهتر برای حذف نیترات اعلام نمودند. با در نظر گرفتن نتایج ارائه‌شده در شکل (۵)، در زمان ماند ۱۲ ساعت عملکرد تیمارهای کاه و کلش گندم و تراشه ساقه ذرت از نظر آماری یکسان ارزیابی شد. علاوه بر آن، نتایج نشان داد که تراشه چوب توانایی بیش‌تری در حذف نیترات دارد، که مشابه این نتیجه توسط Abdi *et al.* (2020) گزارش شد، و این محققین نشان

1. Total Organic Carbon

دادند که رآکتور زیستی با هسته چوب در شرایطی که در آن تحقیق ایجاد شده در مدت ۷۲ ساعت، حدود ۹۹٪ از نیترات را می‌تواند حذف نماید. چنانچه حذف نیترات به مقدار حدود ۲۳٪ در حداکثر زمان ماند ۱۲ ساعت هدف باشد، در شرایط این تحقیق، استفاده از هرکدام از مواد آلی این دو تیمار تفاوتی ندارد. همچنین نتایج نشان داد که در زمان ماند ۱۶ ساعت عملکرد سه ماده آلی، برای حذف نیترات با هم در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار دارند. در زمان ماند ۲۴ ساعت، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که عملکرد مواد آلی برای حذف نیترات از پساب کشاورزی در شرایط دشت مغان، یکسان بوده است. به‌عبارت دیگر، در شرایط تحقیق حذف نیترات در زمان ماند ۲۴ ساعت، مستقل از نوع ماده آلی استفاده شده است. از جمله علت این موضوع را می‌توان حضور بیش‌تر کربن در شرایط واکنش، با افزایش زمان ماند اشاره نمود، زیرا Cameron and Schipper (2012) و Martine *et al*. (2019) نیز اعلام داشتند که برای حذف نیترات بیش‌تر از هر عاملی درجه حرارت و مقدار کربن اهمیت دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر مواد آلی مختلف در زمان‌های ماند ۱۶،۱۲ و ۲۴ ساعت بر کارآیی راکتور زیستی با مقطع مثلثی برای حذف نیترات از پساب کشاورزی در شرایط آب و هوایی دشت مغان ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین ماده آلی به‌عنوان هسته راکتور زیستی در زمان‌های ماند ۱۲، ۱۶ و ۲۴ ساعت، به‌ترتیب با درصد حذف ۲۹/۹۲، ۴۰/۱ و ۴۶/۷۵، تراشه‌های چوب ارزیابی شد. در زمان ماند ۱۶ ساعت، مواد آلی از نظر آماری عملکرد متفاوتی برای حذف نیترات از خود نشان دادند و از این نظر به‌ترتیب تراشه‌های چوب، کاه و کلش گندم و تراشه‌های ساقه ذرت در اولویت قرار داشتند. در زمان ماند ۲۴ ساعت، عملکرد مواد آلی مورداستفاده برای حذف نیترات، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. صرف‌نظر از مسائل اقتصادی و با عنایت به نتایج این تحقیق در شرایط دشت مغان، مناسب‌ترین ماده آلی برای حذف نیترات از پساب کشاورزی، تیمار تراشه چوب و بهترین زمان ماند، زمان ۲۴ ساعت ارزیابی شد. بنابراین، در منطقه موردپژوهش زمان ماند و مواد آلی استفاده‌شده تأثیر معنی‌داری بر حذف نیترات از پساب کشاورزی داشتند و برای طراحی رآکتور زیستی در این محل، این عوامل باید مد نظر قرار گیرد. چنانچه هدف کاهش حدود ۴۰ درصد نیترات از پساب باشد، به علت دسترسی آسان به کاه و کلش گندم و تراشه ساقه ذرت در دشت مغان و عملکرد این دو ماده آلی برای حذف نیترات، پیشنهاد می‌شود رآکتور زیستی با این مواد آلی اجرا شود.

با استفاده از نتایج این پژوهش و در شرایط موجود شبکه‌های زهکشی کشور، مساحت موردنیاز برای اجرای راکتورهای زیستی (با در نظر گرفتن متوسط ضریب زهکشی در ایران، زمان ماند ۲۴ ساعت و احجام پیشنهادی راکتورهای این تحقیق) حدود ۱/۵ درصد از مساحت زمین را اشغال می‌کند.

سپاس‌گزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مصوب و دفاع شده در دانشگاه محقق اردبیلی استخراج شده است. نویسندگان این مقاله از همه اساتید، کارشناسان و مسئولین اداره‌ها و همه افرادی که در ارتقاء این پژوهش یاری دادند تشکر می‌نمایند.

REFERENCES

Abdi Aghdam, F., Rasoulzadeh, A., Ghavidel, A., and Torabi Giglou, M., (2018). The effect of water drainage on soil properties and yield of tomato in Moghan plain.. M.Sc. dissertation, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil.

Abdi, D.E., Owen Jr, J.S., Brindley, J.C., Birnbaum, A.C., Wilson, P.C., Hinz, F.O., Reguera, G., Lee, J.Y., Cregg, B.M., Kort, D.R. and Fernandez, R.T., (2020). Nutrient and pesticide remediation using a two-stage bioreactor-adsorptive system under two hydraulic retention times. *Water Research*, 170, p.115311.

Cameron, S G. and Schipper, L. A. (2012). Hydraulic properties, hydraulic efficiency and nitrate removal of organic carbon media for use in denitrification beds. *Journal of Ecological Engineering*, 41, 1-7.

Christianson, L., Castelló, A., Christianson, R., Helmers, M. and Bhandari, A. (2010). Hydraulic property determination of denitrifying bioreactor fill media. *Journal of Applied Engineering in Agriculture*, 26(5), 849-854.

Christianson, L., Christianson, R., Helmers, M., Pederson, C. and Bhandari, A. (2013). Modeling and calibration of drainage denitrification bioreactor design criteria. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(9), 699-709.

Christianson, L.E. (2011). Design and performance of denitrification bioreactors for agricultural drainage. Digital Repository, Iowa State University.

Christianson, L.E., Bhandari, A. and Helmers, M.J. (2012). A practice-oriented review of woodchip bioreactors for subsurface agricultural drainage. *Journal of Applied engineering in agriculture*, 28(6), 861-874.

Cook, R. (2011). Journeys on a Limping Mule, What We Know about Bioreactors .Department of Agricultural and Biological Engineering University of Illinois. Desalination. 213, 147-151.

Corbett, T.D., Dougherty, H., Maxwell, B., Hartland, A., Henderson, W., Rys, G.J. and Schipper, L.A., (2019). Utility of Diffusive Gradients in Thin-Films' for the measurement of nitrate removal performance of denitrifying bioreactors. *Science of the Total Environment*, p.135267.

Feyereisen G W., Moorman T B., Christianson L E., Venterea R T., Coulter J A., and Tschirner U W. (2016). Performance of Agricultural Residue Media in Laboratory Denitrifying Bioreactors at Low Temperatures. *Journal of environmental quality*, 45 (3), 779-87.

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 environmental quality*, 35(3), 824-829.

Greenan, C M., T. B. Moorman, T B. Parkin, T C. Kaspar, and D B. Jaynes. (2009). Denitrification in wood chip bioreactors at different water flows. *Journal of environmental quality*, 38(4), 1664-1671.

Hashemi SE, Heidarpour, M., and Mostafazade Fard, B. 2011. Investigation of nitrate removal in two forms of bio filter position in subsurface drainage systems. *Journal of Irrigation science and engineering*, 34(2), 71 - 81. (In Farsi)

Hassanpour, B., Giri, S., Pluer, W T., Steenhuis, T S. and Geohring, L.D. (2017). Seasonal performance of denitrifying bioreactors in the Northeastern United States: Field trials. *Journal of environmental management*, 202, 242-253.

Hoover, Natasha L Bhandari, A., Soupir, M L, and Moorman T B. (2016). Woodchip Denitrification Bioreactors: Impact of Temperature and Hydraulic Retention Time on Nitrate Removal. *Journal of environmental quality* 45 (3), 803-812.

Husk, B R., Anderson, B C., Whalen, J K. and Sanchez, J S. (2017). Reducing nitrogen contamination from agricultural subsurface drainage with denitrification bioreactors and controlled drainage. *Journal of Bio systems engineering*, 153, 52-62.

Kargar, M. (2005).Investigation of Thermal Stratification and its Impact on Water Quality and Occurrence of Eutrophication in Hana Dam Reservoir. MSc. dissertation, Isfahan University of Medical Sciences. (In Farsi)

Keramati Taraghi, M., PasebanEisa Lu, N, Ghanbari, A. (2009). The study of effective factors on outgoing water from drains in irrigation network and Moghan drainage and the effects of utilization methods on it. 12th Seminar of the National Irrigation and Drainage Committee of Iran, Tehran. (In Farsi)

Lepine, C., Christianson, L., Sharrer, K. and Summerfelt, S. (2016). Optimizing hydraulic retention times in denitrifying woodchip bioreactors treating recirculating aquaculture system wastewater. *Journal of environmental quality*, 45(3), 813-821.

Martin E A., Davis M P., Moorman T B., Isenhart T M., Soupir M L. (2019). Impact of hydraulic residence time on nitrate removal in pilot-scale woodchip bioreactors. *Journal of Environmental Management*, 237, 424-432.

Nordstrom, A. and Herbert, R. (2017). Field-scale denitrifying woodchip bioreactor treating high nitrate mine water at low temperatures. In 13th International Mine Water Association Congress-Mine Water & Circular Economy. Lappeenranta University of Technology, Finland.

Partheeban, C. (2011). Demonstrating the Nitrogen-removal effectiveness of denitrifying bioreactors for improved drainage water management in South Dakota. Department of Agricultural and Bio systems Engineering, South Dakota State University, Brookings, SD 57007.

Shakiba, M., Liaghat, A., and Mirzaei, F. (2014). Investigation of the effect of mixing depth on drainage quality of drainage output in shallow and saline groundwater. Water research in agriculture. 27(2), 267-279. (In Farsi)

Yamashita, T., and Ikemoto, R.Y. (2014). Nitrogen and Phosphorus Removal from Wastewater Treatment Plant Effluent via Bacterial Sulfate Reduction in an Anoxic Bioreactor Packed with Wood and Iron. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9835-9853.

Zhao, J., He, Q., Chen, N., Peng, T. and Feng, C., (2020). Denitrification behavior in a woodchip-packed bioreactor with gradient filling for nitrate-contaminated water treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 154, p.107454.