

حذف یا کاهش آلاینده‌های نیتروژن و فسفر از زهاب اراضی شالیزاری در زهکش‌های با پوشش گیاهی

چکیده

زهاب کشاورزی به دلیل داشتن مواد معدنی غیرآلی (نیتروژن، فسفر) و آلاینده‌های آلی (آفت‌کش‌ها و سموم) تهدیدی برای اکوسیستم‌های آبی است که باعث اوتروفیکاسیون و آسیب به منابع آبی پایین‌دست می‌شود. زهکش‌های لایروبی‌نشده با پوشش گیاهی می‌توانند بستر مناسبی برای حذف مواد مغذی و جامدات معلق باشند. این پژوهش کارایی زهکش‌های طبیعی لایروبی‌نشده را در حذف نیتروژن و فسفر از زهاب مزارع برنج استان گیلان بررسی می‌کند. دو تیمار زهکش خاکی، بدون پوشش گیاهی (V_1) و با پوشش گیاهی (V_2)، دارای گونه‌های گیاهی خاص (Reed, Typha, Sparganium) تحت غلظت‌های آلاینده بالا (C_1) و پایین (C_2) در ماه‌های تیر و مرداد مورد بررسی قرار گرفت. مقدار اولیه نیتروژن و فسفر در آب، رسوب و گیاه اندازه‌گیری شد تا بیلان جرمی برای تیمارهای V_1C_1 ، V_1C_2 ، V_2C_1 و V_2C_2 محاسبه شود. تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که پالایش نیتروژن و فسفر در سطح معنی‌داری یک درصد ($P < 0.01$) تفاوت قابل توجهی داشته است. بیشترین درصد حذف نیتروژن و فسفر به ترتیب $71/99$ و $46/11$ درصد در تیمار V_2C_2 مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهند که پوشش گیاهی و استفاده از غلظت مناسب کود، بیشترین پتانسیل را در حذف نیتروژن و فسفر از زهاب تولیدی اراضی دارد. گیاه‌پالایی به‌عنوان یکی از فرایندهای اصلی حذف آلاینده‌ها در این تیمار، منجر به کاهش 37 درصد نیتروژن و 61 درصد فسفر شد. جذب سطحی رسوب در کاهش آلاینده‌ها نقش مهمی ایفا کرد. به‌طوری که در تیمار V_2C_2 نیتروژن $39/88$ درصد و در تیمار V_1C_1 فسفر $34/95$ درصد کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که کانال‌های طبیعی و لایروبی‌نشده پتانسیل بالایی در کاهش آلاینده‌های کشاورزی دارند و به بهبود چشمگیر کیفیت زهاب خروجی از مزارع برنج کمک می‌کنند. استفاده از این کانال‌ها می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر و پایدار برای مدیریت زهاب کشاورزی، کاهش آلودگی منابع آبی و حفظ اکوسیستم‌های آبی مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: گیاه‌پالایی، سبب کشاورزی، آلودگی آب، سامانه زهکش، اوتروفیکاسیون

ABSTRACT

Agricultural drainage water, containing inorganic minerals (nitrogen, phosphorus, and metals) and organic pollutants (pesticides and agricultural toxins), is considered a major threat to aquatic ecosystems, leading to eutrophication and damage to downstream water resources. Undredged vegetated ditches can potentially serve as effective beds for removing nutrients and suspended solids from agricultural drainage water. This study investigates the efficiency of non-dredged drainage channels in removing nutrients from drainage water in the paddy fields of Gilan province. For this purpose, two treatments of natural drainage channels, without vegetation (V_1) and with vegetation (V_2), with lengths of 200 and 105 m respectively, containing specific plant species (Reed, Typha, Sparganium) were examined under high (C_1) and low (C_2) pollutant concentrations in July and August. The study measured the initial nitrogen and phosphorous content in water, sediment, and plants to compute the mass balance for the V_1C_1 , V_1C_2 , V_2C_1 , and V_2C_2 treatments. Analysis of variance revealed significant removal of nitrogen and phosphorus, with the highest removal percentages observed in the V_2C_2 treatment. Phytoextraction was the primary nitrogen and phosphorous removal process in V_2C_2 at the rate of 37.06% and 61.69%, respectively, while seepage losses dominated in V_2C_1 treatment at 27.42% and 20.04% per 100 meters, respectively. Sediment absorption was notable, particularly for nitrogen in V_2C_2 and phosphorus in V_1C_1 treatments. Thus, our findings suggest that natural un-dredged drainage ditches possess promising capabilities in eliminating typical pollutants discharged from agricultural areas, thereby substantially improving the quality of drainage water that flows into downstream water sources.

Keywords: Phytoremediation, Agricultural wastewater, Water pollution, Drainage system, Eutrophication

مقدمه

رشد جمعیت منجر به افزایش فعالیت‌های کشاورزی شده تا نیازهای غذایی انسان را تامین کند. برنج یکی از مواد غذایی اساسی برای نیمی از جمعیت جهان به‌ویژه برای کشور است. با این حال، کشت برنج در اراضی شالیزاری نیاز به حجم قابل توجهی آب و کود دارد، که منجر به تولید حجم زیادی از زهاب کشاورزی می‌شود و می‌تواند اثرات زیست‌محیطی مخربی داشته باشد (Lampayan et al., 2015). آلودگی‌های ناشی از منابع غیرنقطه‌ای از مزارع کشاورزی مانند نیتروژن و فسفر بسیار قابل توجه است (Kling et al., 2014; Scavia et al., 2014). استفاده کنترل‌نشده از نهاده‌های شیمیایی و همچنین عدم مدیریت صحیح آب در اراضی، منجر به مقدار زیادی آلاینده در زهاب کشاورزی می‌شود (Navabian et al., 2016). برای کاهش آلودگی آب ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، روش‌های

مدیریتی مناسب (BMPs) نظیر تالاب‌های مصنوعی، حوضچه‌های ذخیره، بازیافت زهاب و کانال با پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفته است (Cooper et al., 2004; Fausey et al., 2004; Frankenberger et al., 2017; Hay et al., 2021; Kosari et al., 2024; Moore et al., 2006; Needelman et al., 2007; Reinhart et al., 2016). پالایش با کانال‌های زهکشی مشابه فرآیندهای موجود در تالاب‌های مصنوعی است. با این حال، کانال‌های زهکشی شرایط هیدرولیکی متفاوتی داشته و پیچیده‌تر هستند (Collins et al., 2016). پالایش زهاب کشاورزی در این روش می‌تواند شامل انواع فرآیندها از جمله جذب گیاهی، جذب سطحی رسوب و تجزیه بیولوژیکی در کانال‌های دارای پوشش گیاهی باشد (Baker et al., 2016; Vymazal & Březinová, 2018; Wang et al., 2019; Zhang et al., 2016; Zhao et al., 2020). جذب مواد مغذی موجود در زهاب، افزایش زمان ماند هیدرولیکی، کاهش سرعت جریان و افزایش زبری، از جمله تغییرات اساسی در کانال‌های زهکشی به‌علت رشد گیاهان است (Kumwimba et al., 2017).

پیشینه پژوهش

پژوهش‌های اخیر دیدگاه جدیدی را درباره نقش پوشش گیاهی در کانال‌های زهکشی ارائه کرده است. Zhang et al., (2020) به‌منظور بررسی اثربخشی گیاه پالایی در بهبود کیفیت پساب خانگی و زهاب کشاورزی برای پالایش $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ در دمای پایین، سه کانال زهکش تحت پوشش گیاهی *Myriophyllum aquaticum* را مورد بررسی قرار دادند. از آنجایی که تغییرات دمایی در فرایند جذب گیاه و همچنین فرایندهای بیولوژیکی نظیر دنیتریفیکاسیون تاثیر گذار است. در پژوهش یادشده عملکرد گیاه مورد نظر در منطقه نیمه‌استوایی با متوسط دامنه تغییرات دمایی $7/4 - 8/2$ درجه سانتی‌گراد، در ماه‌های آذر، دی و بهمن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین راندمان حذف نیترات آمونیوم بین $75/8 - 86/8$ درصد است. همچنین مشخص شد که سهم فرآیندهای جذب گیاه، جذب سطحی رسوب و حذف بیولوژیکی به‌ترتیب $12/4 - 21/5$ درصد، $0/0 - 8/1$ درصد و $38/9 - 54/6$ درصد است.

پژوهش‌های متعددی نشان دادند که در ماه‌های سرد، کارایی حذف نیتروژن $2 - 4$ برابر کمتر از ماه‌های گرم است که از دلایل آن می‌توان به کاهش فعالیت گیاهان و حتی تشدید آلودگی بیشتر با گیاهان در کانال‌ها اشاره کرد (Kröger et al., 2007). همچنین Wang et al., (2019) نشان دادند که کارایی حذف $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ در زمستان برابر با $26/7$ درصد و در فصل‌های دیگر بین $51/9 - 66/5$ درصد است. به همین دلیل، انتخاب گونه مناسب گیاه در فصل سرد سال از اهمیت بالایی برخوردار بوده و گیاه *M. aquaticum* می‌تواند به‌عنوان یک انتخاب مناسب در دماهای پایین باشد که جذب نیتروژن سالانه آن $120 - 222$ گرم بر متر مربع برآورد شده است (Liu et al., 2017; Luo et al., 2018; Zhang et al., 2017). پژوهشی تاثیر زهکش دارای پوشش گیاهی *P. cordata* و *M. elantinoideis* را بر روی حذف $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ نشان داد که به‌ترتیب منجر به کاهش $50/8$ و $71/4$ درصد نسبت به شرایط بدون پوشش گیاهی شد (Soana et al., 2017; Zhang et al., 2016). Vymazal and Březinová, (2018) نشان دادند که دنیتریفیکاسیون موثرترین فرآیند در حذف نیتروژن به مقدار 804 کیلوگرم بر هکتار در سال، در کانال‌های خاکی دارای پوشش گیاهی *Phragmites australis*، *Thypha* و *Glyceria* است.

Navabian et al., (2016) به بررسی تاثیر راهکار گیاه‌پالایی در کاهش غلظت ارتوفسفات با سه گیاه وتیور، نیفا و نی پرداخته و نشان دادند که بیشترین جذب فسفر در غلظت 10 میلی‌گرم بر لیتر و عمق 35 سانتی‌متر تحت کشت نی به میزان $99/8$ درصد رخ می‌دهد. همچنین کمترین جذب فسفر در غلظت 20 میلی‌گرم بر لیتر و در عمق 70 سانتی‌متری خاک به میزان $99/2$ درصد مشاهده شد. Kröger et al., (2014) اثرات دریاچه‌ها در کانال‌های زهکشی را ارزیابی کردند و پیشنهاد دادند که استفاده از دریاچه‌ها، زمان ماند هیدرولیکی آب را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش فرآیند نیترات‌زدایی می‌شود. Bundschuh et al., (2016) مشاهده کردند که کارایی پالایش در کانال‌های تحت پوشش گیاه به تراکم و ویژگی‌های گیاه وابسته است و می‌تواند غلظت متوسط قارچ کش را کاهش دهند. همچنین پژوهش‌های بسیار دیگر نیز نشان داده است که کانال‌های زهکشی لایروبی‌نشده، منجر به افزایش حذف مواد مغذی

¹ Best management practices

و کیفیت زهاب خروجی از کانال نسبت به کانال‌های لایروبی شده می‌شود (Iseyemi et al., 2016; Nsenga Kumwimba et al., 2018; Soana et al., 2017; Zhao et al., 2020). به‌طور کلی پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که پوشش گیاهی در کانال‌های زهکشی می‌تواند به‌طور قابل توجهی کیفیت زهاب خروجی را از طریق افزایش مدت زمان ماند و فرآیندهای بیولوژیکی بهبود بخشد. استفاده از گیاه‌پالایی منجر به کاهش مواد مغذی، به‌ویژه نیتروژن و فسفر، در زهاب کشاورزی و پساب خانگی می‌شود. این روش در دماهای پایین نیز کارایی دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار موثر برای مدیریت زهاب در مناطق مختلف به کار گرفته شود. بنابراین، به‌دلیل حجم زیاد زهاب تولیدی اراضی شالیزاری در شمال کشور و همچنین پتانسیل بالای کانال‌های زهکشی خاکی موجود در این منطقه، پژوهشی به‌منظور بررسی کاهش آلاینده‌های نیتروژن و فسفر خروجی از کانال‌ها انجام شده است. این بررسی با هدف حفظ کیفیت منابع آب و کنترل آلودگی‌های محیط‌زیستی صورت گرفت. اهداف اصلی این بررسی شامل (۱) ارزیابی پتانسیل گیاه‌پالایی کانال‌های طبیعی موجود بر حذف نیتروژن و فسفر، (۲) ارزیابی تاثیر غلظت‌های کاربردی مختلف بر روی نتایج و (۳) ارزیابی تاثیرات یکپارچه فرآیندهای موثر موجود بر پتانسیل حذف نیتروژن و فسفر است.

مواد و روش‌ها

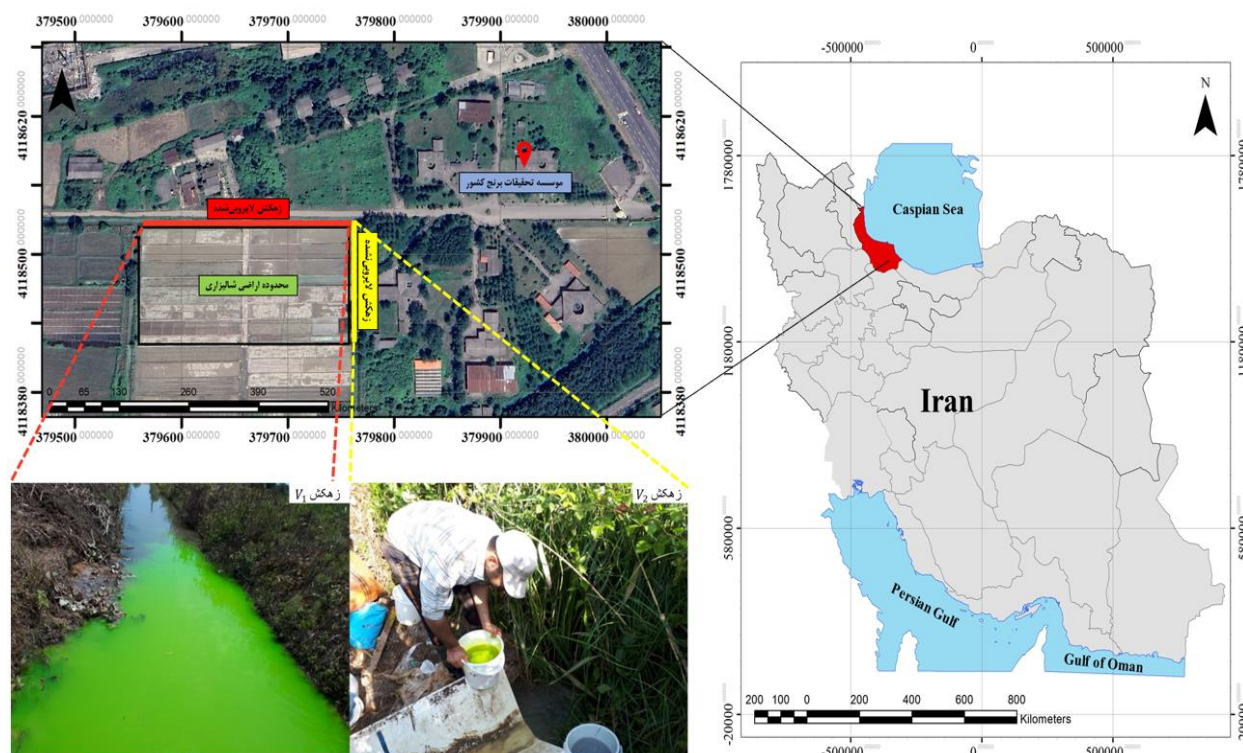
منطقه مورد بررسی

به‌منظور بررسی قابلیت زهکش‌های طبیعی در کاهش آلاینده‌های کشاورزی، یک آزمایش در مؤسسه تحقیقات برنج کشور، واقع در پنج کیلومتری شهرستان رشت با مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 12'$ شمالی و $49^{\circ} 38'$ شرقی انجام شد. منطقه مورد مطالعه در ارتفاع $24/6$ متری از سطح دریا قرار دارد (شکل ۱). متوسط بارش سالانه در این منطقه حدود 1350 میلی‌متر و متوسط دمای سالانه $15/9$ درجه سانتی‌گراد است. در این پژوهش تأثیر دو عامل لایروبی و سطوح مختلف غلظت نیتروژن و فسفر ارزیابی شد؛ به این صورت که عامل لایروبی در دو زهکش لایروبی شده (V_1) و لایروبی نشده (V_2) در قسمت شمالی و شرقی مزارع برنج مورد ارزیابی (شکل ۱) و همچنین غلظت ورود آلاینده‌ها (شامل اوره و سوپر فسفات تریپل) در دو سطح غلظت زیاد (C_1) و کم (C_2)، مورد بررسی قرار گرفت. در کانال V_1 تیمار اول با غلظت زیاد (هر نوبت 45 کیلوگرم از هر کود) و تیمار دوم با غلظت کم (هر نوبت $22/5$ کیلوگرم از هر کود) در نظر گرفته شد. در کانال V_2 با توجه به ابعاد کوچک‌تر آن، تیمار اول با غلظت زیاد (هر نوبت 12 کیلوگرم از هر کود) و تیمار دوم با غلظت کم (هر نوبت 6 کیلوگرم از هر کود) تعیین شد. به‌منظور بررسی اثربخشی هر دو عامل پوشش گیاهی و سطح غلظت، چهار تیمار V_1C_1 ، V_1C_2 ، V_2C_1 و V_2C_2 مورد بررسی قرار گرفت.

مشخصات کانال‌های زهکش

در این پژوهش، کانال‌های زهکشی طبیعی شامل یک زهکش لایروبی شده به طول 200 متر و یک زهکش لایروبی نشده به طول 105 متر انتخاب شد. انتخاب این دو زهکش به دلیل ترکیبی از عوامل محیطی و عملیاتی انجام شد. شرایط محیطی منطقه، از جمله نوع و تراکم پوشش گیاهی و قابلیت دسترسی برای تردد و مدیریت، نقش تعیین‌کننده‌ای در این انتخاب ایفا کرد. علاوه بر آن، محدودیت‌های ناشی از کمبود نیروی انسانی و تجهیزات مناسب برای بررسی و مدیریت جامع‌تر زهکش‌ها، و همچنین دشواری در مسدود کردن ورودی‌های جانبی در کانال‌ها، توانایی اجرای کامل‌تر فرایندها را محدود ساخت. به همین دلیل، طول این دو زهکش متفاوت است و شرایط فیزیکی و محیطی کانال‌ها و عدم امکان بستن ورودی‌های جانبی بیشتر، این تفاوت را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. برای اطمینان از اثربخشی پالایش زهاب، کانال‌های انتخابی به‌دقت بررسی شدند تا هر دو شرایط لایروبی شده و لایروبی نشده را پوشش دهند. محدوده‌های انتخابی زهکش‌ها بدون ورودی یا خروجی جانبی بودند تا عبور جریان به‌طور مؤثر و بدون تداخل صورت گیرد. این انتخاب‌ها به ما اجازه دادند تا تأثیر پوشش گیاهی و سایر شرایط محیطی را به‌دقت مورد مطالعه قرار دهیم؛ بنابراین، انتخاب این دو زهکش به‌عنوان گزینه‌های مناسب با هدف بهینه‌سازی شرایط موجود و دستیابی به نتایج علمی معتبر صورت گرفته است.

به دلیل اختلاف طول دو زهکش، نتایج به منظور استانداردسازی طول زهکش‌ها، برای هر ۱۰۰ متر طول زهکش ارائه شده تا اثر پوشش گیاهی به طور مناسب مورد مقایسه قرار گیرد. همچنین، نتایج در شرایط طول طبیعی زهکش‌ها نیز برای بررسی تأثیر طول زهکش بر پالایش زهاب مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به عدم امکان اجرای طرح در کانال‌های کاملاً یکسان به‌عنوان تکرار و همچنین مشکلاتی مانند کمبود نفرات، زمان و امکانات، مقایسه تنها بین دو زهکش موجود به‌صورت لایروبی‌شده و لایروبی‌نشده صورت گرفته است. با توجه به شرایط فیزیکی مشابه با سایر زهکش‌های مؤسسه برنج، این کانال‌های خاکی درجه سه به‌عنوان نمونه‌های نماینده از زهکش‌ها انتخاب شد. مشخصات فیزیکی دو زهکش شامل مساحت مقطع جریان، عمق آب در کانال، محیط خیس شده، شیب طولی و عرض کانال در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت محل بررسی، زهکش‌های لایروبی شده، زهکش با پوشش گیاهی و تزریق ماده رنگی به کانال‌ها

جدول ۱. مشخصات فیزیکی کانال‌های لایروبی شده و لایروبی‌نشده در منطقه مورد بررسی

نوع زهکش	سطح مقطع	طول (متر)	عمق (متر)	عرض (متر)	محیط خیس شده (متر)	شیب طولی (متر بر متر)
لایروبی شده (V ₁)	مستطیلی	۲۰۰	۳/۳۶	۳/۲۰	۶/۸	۰/۰۰۱۵
لایروبی‌نشده (V ₂)	مستطیلی	۱۰۵	۲/۱۴	۲/۹۳	۳/۶	۰/۰۰۹۲

نمونه‌برداری از آب، خاک و گیاه

قبل از هر اقدامی در زهکش‌ها، نمونه‌برداری از آب، رسوب و گیاه از ابتدا، وسط و انتهای زهکش‌ها به منظور بررسی شرایط موجود انجام شد. نمونه‌برداری زهاب با حجم یک لیتر و با استفاده از دستگاه نمونه‌برداری به روش انتگراسیون عمقی انجام شد؛ به این ترتیب که ۸۰ درصد حجم بطری نمونه‌برداری با حرکت یکنواخت از کف تا سطح پر شد. سپس نمونه‌ها در یخچال نگهداری شد. این نمونه‌ها پس از عبور از کاغذ صافی مورد آزمایش قرار گرفته و غلظت نیترژن و فسفر کل در زهاب با استفاده از روش اسپکتروفوتومتر

اندازه‌گیری شد. پس از اتمام نمونه‌برداری از زهاب، از گیاهان موجود در زهکش V₂ و همچنین از رسوب در ابتدا، وسط و انتهای هر دو زهکش نمونه‌برداری شد. برای نمونه‌برداری از رسوب، از روش استاندارد استفاده شد. در این روش، اوگر متناسب با عمق رسوب تنظیم شده و نمونه‌برداری از کف تا سطح رسوب در چند مرحله انجام شد. پس از انجام نمونه‌برداری، نمونه‌های رسوب خشک شده و سپس کوبیده شد تا برای انجام اندازه‌گیری‌های مربوطه به آزمایشگاه منتقل شوند. تراکم و نوع پوشش گیاهی موجود در زهکش لایروبی‌نشده با استفاده از قاب مربعی شکل چوبی به ابعاد یک متر در یک متر و پرتاب آن در فواصل ۲۰ متری از ابتدا تا انتهای زهکش انجام شد. سپس، نوع و تعداد گیاهان موجود در قاب مربع چوبی ثبت شد (جدول ۲)؛ بنابراین، همان‌طور که در جدول مشخص است، تأثیر گیاهان تیفا، نی و گالی بر پالایش آلاینده‌های خروجی زهکش‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲. پراکندگی پوشش گیاهی در زهکش لایروبی‌نشده (V₂)

نوع و تعداد گیاه/فاصله از ابتدای کانال						
۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۰۵
(متر)						
۰	۲۶	۱۷	۵	۰	۰	۰
نی						
۳۳	۵	۰	۰	۰	۰	۰
گالی						
۴	۰	۱۶	۱۲	۱۴	۱۸	۱۹
تیفا						
۳۶	۳۱	۳۳	۱۷	۱۴	۱۸	۱۹
تعداد کل گیاهان						

در بررسی‌های انجام‌شده بر روی زهکش لایروبی‌شده (V₁)، دو تیمار آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. مرحله اول با غلظت زیاد و سه تکرار در تاریخ‌های ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۱۹، ۲۱ و ۲۳ در تیر ماه ۱۳۹۹ اجرا شد. در این مرحله، ۴۵ کیلوگرم کود به صورت محلول با غلظت زیاد و سه تکرار به زهکش لایروبی‌شده اضافه شد. در مرحله دوم، ۲۲/۵ کیلوگرم کود با غلظت کم و سه تکرار به زهکش لایروبی‌شده وارد شد. برای زهکش با پوشش گیاهی (V₂)، به دلیل ابعاد کوچک‌تر آن، آلاینده‌ها با غلظت زیاد (۱۲ کیلوگرم از هر کود) و غلظت کم (۶ کیلوگرم از هر کود) در تاریخ‌های ۷، ۹، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۹ در مرداد ۱۳۹۹ تزریق شدند. مبنای انتخاب غلظت‌های آلاینده نیتروژن و فسفر بر اساس حداکثر مقادیر مشاهده‌شده در شرایط زهکشی میان‌فصل اراضی شالیزاری و همچنین تخلیه زهاب استخرهای پرورش ماهی استان بوده است. آلاینده‌ها از ابتدای زهکش‌ها به‌طور هم‌زمان و با جرم یکسان تزریق شد. علاوه بر این، ماده سبز رنگ فلوتورسین سدیم به همراه محلول آلاینده به‌عنوان عنصر ردیاب به‌منظور تعیین مدت زمان ماند در طول زهکش تزریق شد (شکل ۱). پس از رسیدن ماده رنگی به انتهای زهکش، نمونه‌برداری از زهاب در انتهای کانال در هر دو غلظت C₁ و C₂ با سه تکرار یکسان در هر دو زهکش V₁ و V₂ آغاز شد و با فواصل ۱۵ دقیقه‌ای تا محو کامل ماده رنگی ادامه یافت. برای اندازه‌گیری جریان ورودی و خروجی، فلوم‌های WSC در ابتدا و انتهای هر دو زهکش نصب شد (جدول ۳). بر اساس دبی موجود در زهکش‌ها، فلوم‌های WSC T4 و WSC T5 به‌ترتیب برای زهکش‌های لایروبی‌شده و لایروبی‌نشده انتخاب شد. با توجه به تأثیر شرایط محیطی بر نتایج تغییرات دمای آب و دمای هوا به‌عنوان عوامل مؤثر در پالایش آلاینده‌ها ثبت شد (شکل ۲). همان‌طور که در شکل یادشده مشاهده می‌شود، به دلیل انجام فرآیند نمونه‌برداری در ماه‌های تیر و مرداد، اثر تغییرات دما بر نتایج نمونه‌برداری به‌طور قابل‌توجهی مدنظر قرار نگرفته است.

بیان جرمی آب و آلاینده

برای محاسبه نفوذ آب در طول کانال زهکش از معادله بیان آب استفاده شد:

$$V_{inf} = V_o + V_{ev} - V_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن حجم آب نفوذیافته (مترمکعب بر روز)، V_0 حجم آب خروجی از زهکش (مترمکعب بر روز)، V_i حجم آب ورودی به زهکش (مترمکعب بر روز) و V_{ev} حجم آب تبخیر شده (مترمکعب بر روز) است. داده‌های تبخیر روزانه از یک ایستگاه هواشناسی کشاورزی مجاور مؤسسه تحقیقات برنج جمع‌آوری شد تا شدت تبخیر روزانه در محل پژوهش برآورد شود.

جدول ۳. مقادیر دبی ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده در دو کانال لایروبی شده و لایروبی نشده در تکرارهای مختلف

زهکش لایروبی نشده (V_2)									
شماره آزمایش	زمان نمونه‌برداری	زمان شروع آزمایش	زمان جبهه رنگی	زمان پایان آزمایش	مدت زمان کل آزمایش	دبی ورودی (لیتر بر ثانیه)	حجم آب ورودی (مترمکعب بر روز)	دبی فلوم خروجی (لیتر بر ثانیه)	حجم آب خروجی (مترمکعب بر روز)
۱	۱۳۹۹/۰۵/۰۷	۹:۰۰	۱۱:۴۲	۱۷:۱۲	۴۴۷	۴/۱۶	۳۵۹/۰۰	۴/۰۸	۳۵۲/۶۴
۲	۱۳۹۹/۰۵/۰۹	۹:۵۰	۱۳:۳۵	۱۸:۳۰	۵۱۰	۳/۵۲	۳۰۳/۸۶	۳/۴۵	۲۹۸/۰۳
۳	۱۳۹۹/۰۵/۱۲	۱۰:۰۰	۱۳:۳۵	۱۸:۱۱	۴۹۱	۳/۶۵	۳۱۵/۷۰	۳/۵۸	۳۰۹/۷۵
۴	۱۳۹۹/۰۵/۱۴	۹:۳۰	۱۵:۳۵	۱۹:۰۶	۵۷۶	۳/۱۲	۲۶۹/۷۶	۳/۰۶	۲۶۴/۲۹
۵	۱۳۹۹/۰۵/۱۶	۹:۰۰	۱۴:۱۰	۱۶:۴۱	۴۶۱	۳/۵۵	۳۰۶/۸۰	۳/۴۷	۳۰۰/۳۵
۶	۱۳۹۹/۰۵/۱۹	۹:۳۰	۱۴:۳۵	۱۸:۰۴	۵۱۴	۳/۴۵	۲۹۸/۰۳	۳/۳۸	۲۹۲/۲۶

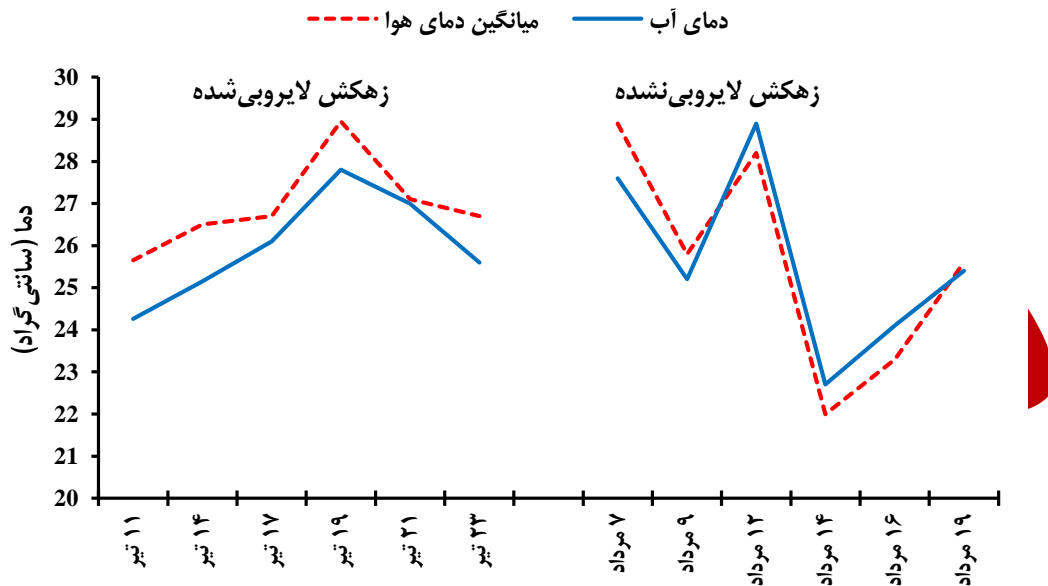
زهکش لایروبی شده (V_1)									
شماره آزمایش	زمان نمونه‌برداری	زمان شروع آزمایش	زمان جبهه رنگی	زمان پایان آزمایش	مدت زمان کل آزمایش	دبی ورودی (لیتر بر ثانیه)	حجم آب ورودی (مترمکعب بر روز)	دبی فلوم خروجی (لیتر بر ثانیه)	حجم آب خروجی (مترمکعب بر روز)
۱	۱۳۹۹/۰۴/۱۱	۱۰:۴۵	۱۲:۱۸	۱۷:۰۳	۳۷۸	۱۸/۲۴	۱۵۷۶/۱۳	۱۸/۱۰	۱۵۶۳/۶۸
۲	۱۳۹۹/۰۴/۱۴	۱۱:۰۰	۱۲:۱۲	۱۷:۵۷	۳۵۷	۱۹/۷۴	۱۷۰۵/۴۸	۱۹/۶۰	۱۶۹۳/۱۷
۳	۱۳۹۹/۰۴/۱۷	۱۴:۳۰	۱۹:۴۸	۲۱:۳۳	۴۳۳	۱۶/۱۹	۱۳۹۸/۷۸	۱۶/۰۵	۱۳۸۶/۷۶
۴	۱۳۹۹/۰۴/۱۹	۱۱:۳۰	۱۳:۲۵	۱۷:۲۵	۳۵۵	۱۷/۲۷	۱۴۹۲/۳۶	۱۷/۱۳	۱۴۸۰/۱۷
۵	۱۳۹۹/۰۴/۲۱	۱۰:۰۰	۱۲:۴۹	۱۶:۴۹	۴۰۹	۱۵/۷۱	۱۳۵۶/۹۷	۱۵/۵۷	۱۳۴۵/۰۶
۶	۱۳۹۹/۰۴/۲۳	۱۰:۰۰	۱۲:۳۵	۱۶:۳۵	۳۹۵	۱۵/۸۵	۱۳۶۹/۱۴۴	۱۵/۷۱	۱۳۵۷/۴۵

مقدار حذف نیتروژن و فسفر در امتداد کانال تحت تأثیر فرایندهای مختلفی مانند تلفات نفوذ، جذب سطحی رسوب، جذب گیاهی، تبخیر و نشت قرار دارد. بیلان جرمی نیتروژن و فسفر در کانال زهکش لایروبی نشده از پیشنهاد ارائه شده توسط رابطه Zhang et al. (2016) استفاده شد:

$$Q_r = Q_o + Q_{sa} + Q_v + Q_p + Q_{dn} + Q_{inf} - Q_i \quad (۲)$$

که در آن: Q_r جرم نیتروژن یا فسفر حذف شده، Q_i و Q_o به ترتیب جرم کل نیتروژن یا فسفر ورودی و خروجی، Q_{sa} جرم تلفات نیتروژن یا فسفر جذب سطحی، Q_v جرم تلفات تصعید، Q_{dn} جرم تلفات دنیتریفیکاسیون و Q_p جرم نیتروژن یا فسفر جذب شده به وسیله گیاه است. بیلان جرم شامل تعیین اجزای ورودی و خروجی است، با توجه به اینکه دبی ورودی و خروجی آب با فلوم‌ها در ابتدا و انتهای هر زهکش به صورت مداوم کنترل شد و با مشخص بودن مقادیر جرم ورودی هر آلاینده (جرم کود وارد شده به صورت محلول موجود در آب) و برداشت نمونه‌های متعدد آب از انتهای زهکش در کل زمان آزمایش و سپس اندازه‌گیری غلظت‌های هر آلاینده در نمونه‌ها و رسم نمودار غلظت - زمان برای هر آزمایش به طور جداگانه، یک منحنی تشکیل شد. با محاسبه سطح زیر منحنی نمودارهای

حاصل شده به صورت جزء به جزء (انتگرال)، کل جرم خروجی آلاینده از انتهای زهکش برای هر آزمایش محاسبه شد. به این ترتیب دو جزء ورودی و خروجی بیان جرم محاسبه شد.



شکل ۲: میانگین دمای هوا و آب در مدت زمان آزمایش

تلفات جرم نیتروژن و فسفر به صورت نفوذ عمقی با تعیین حجم آب نفوذ یافته در زهکش ها و حاصل ضرب آن در غلظت های نیتروژن و فسفر (بر حسب ppm) محاسبه شد:

$$Q_{inf} = V_{inf} \times C \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن: V_{inf} حجم آب نفوذ یافته محاسبه شده (مترمکعب بر روز) و C غلظت های نیتروژن و فسفر اندازه گیری شده در نمونه های آب (ppm). در نهایت تلفات جرم نیتروژن و فسفر در بازه های زمانی مشخص شد که با میانگین گرفتن از اعداد حاصل در هر آزمایش، میانگین توزیع تلفات عمقی نیتروژن و فسفر در کف زهکش مورد نظر برآورد شد.

تلفات جرم نیتروژن و فسفر به صورت جذب سطحی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Q_{sa} = SW \times C \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن: SW وزن رسوب موجود در زهکش مورد نظر (با وزن مخصوص ظاهری مطابق با منطقه مطالعاتی ۰/۹۷ گرم بر سانتی متر مکعب) و C غلظت نیتروژن و فسفر موجود در نمونه ها برای ابتدا، وسط و انتهای زهکش که میانگین گرفته شد. بنابراین، همانطور که مطرح شد نمونه های رسوب از ابتدا، وسط و انتهای زهکش ها قبل از شروع و بعد از اتمام هر آزمایش برداشته شد تا از حاصل تفاضل مقدار موجود نیتروژن و فسفر موجود در رسوبات، مقدار نیتروژن یا فسفر جذب شده برآورد شود. بعد از مشخص شدن مقادیر نیتروژن و فسفر اختصاص یافته به فرآیندهایی که در بالا اشاره شد، میزان جذب اختصاص یافته به سایر عوامل تأثیرگذار در پالایش آلاینده ها مانند

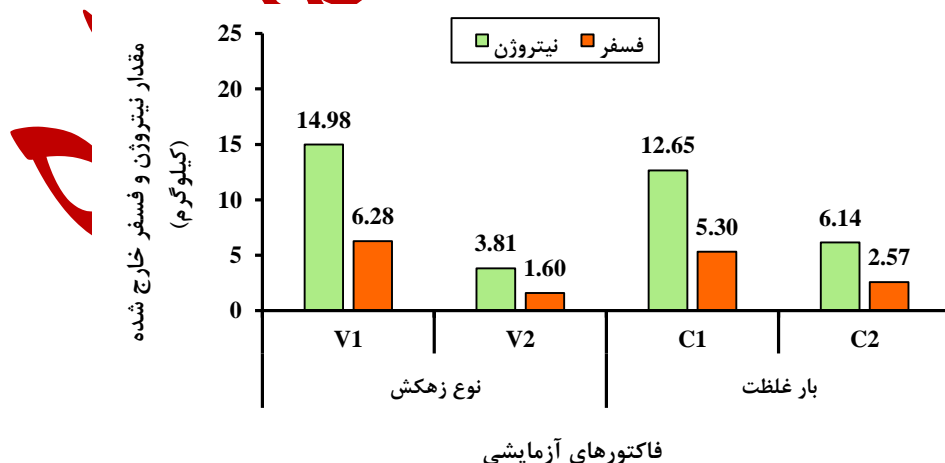
جذب گیاه، تصعید و دنیتریفیکاسیون مشخص شد. در نهایت کلیه داده‌های به‌دست‌آمده مربوط به همه تیمارها بر اساس طرح آزمایش موردنظر پس از تجزیه واریانس، با روش دانکن مورد مقایسه میانگین قرار گرفتند.

نتایج و بحث

تأثیر نوع زهکش و غلظت بر میزان نیتروژن و فسفر خارج شده

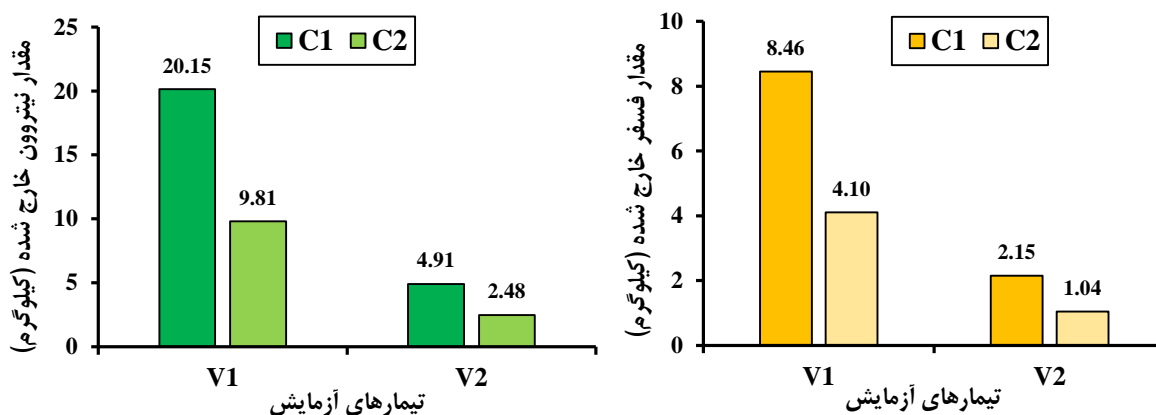
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میزان نیتروژن و فسفر خروجی از زهکش‌ها به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر نوع زهکش و سطح غلظت در سطح یک درصد قرار گرفت. همچنین اثر متقابل این دو فاکتور (نوع زهکش و سطح غلظت) نیز در سطح معنی‌دار یک درصد برآورد شد. مقایسه میانگین اثر دو فاکتور آزمایشی با استفاده از آزمون دانکن پنج درصد برای میزان نیتروژن و فسفر خروجی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج بررسی نوع زهکش نشان داد که میزان نیتروژن و فسفر خروجی در زهکش V₂، علی‌رغم طولانی‌تر بودن زهکش V₁، به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. بیشترین میزان نیتروژن و فسفر خروجی از زهکش V₁ به‌ترتیب ۱۴/۹۸ و ۶/۲۸ کیلوگرم برآورد شد که این مقادیر در مقایسه با زهکش V₂ تفاوت معنی‌داری نشان می‌دهند و حاکی از کاهش چهار درصدی نیتروژن و ۷۴ درصدی فسفر در زهکش V₂ است. این کاهش را می‌توان به افزایش مدت زمان ماند کود در زهکش لایروبی‌نشده و تأثیر پوشش گیاهی نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که اثر پوشش گیاهی در افزایش مدت زمان ماند کود در سیستم بیشتر از طول زهکش است. نتایج به‌دست آمده مطابقت بالایی با نتایج پژوهش‌های (Collins et al., 2016; Vymazal & Březinová, 2018; Zhang et al., 2020) در مورد تأثیر پوشش گیاهی بر افزایش مدت زمان ماند برای پالایش آلاینده‌های موجود دارد.

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که فاکتور سطح غلظت کود کاربردی بیشترین و کمترین میزان خروجی نیتروژن و فسفر را به‌ترتیب در غلظت C₁ و C₂ نتیجه داد. نتایج نشان داد که میزان نیتروژن و فسفر خروجی با غلظت کود کاربردی به‌صورت مستقیم مرتبط است، و بیشترین خروجی نیتروژن و فسفر به‌ترتیب به‌میزان ۱۲/۶۵ کیلوگرم و ۵/۴۰ کیلوگرم، در غلظت C₁ مشاهده شد (شکل ۳). همچنین، نتایج شکل ۴ نشان داد که بیشترین و کمترین میزان خروجی نیتروژن و فسفر به‌ترتیب برای تیمارهای V₁C₁ و V₂C₂ به‌میزان ۲۰/۱۵ و ۲/۴۸ کیلوگرم برای نیتروژن و ۸/۴۶ و ۱/۰۴ کیلوگرم برای فسفر بوده است؛ بنابراین، فقدان پوشش گیاهی در کانال‌های زهکشی به‌دلیل لایروبی مداوم آن‌ها و همچنین استفاده از غلظت بالای کود می‌تواند باعث افزایش میزان آلاینده‌های خروجی از مزارع شود.



شکل ۳- مقایسه میانگین نیتروژن و فسفر خروجی در هر زهکش و سطوح مختلف غلظت

بنابراین، نتایج نشان می‌دهند که استفاده از کود به‌طور مناسب در مزارع و همچنین بهره‌گیری از پتانسیل زهکش‌های دارای پوشش گیاهی در مناطق شالیزار می‌تواند به‌طور مؤثر در کاهش میزان خروجی نیتروژن و فسفر مؤثر باشد. به‌طور خاص، نتایج پژوهش نشان داد که مدیریت هم‌زمان سطح غلظت کود و نوع زهکش می‌تواند منجر به کاهش ۸۸ درصدی خروجی فسفر شود. Collins et al., (2016) و Vymazal and Březinová, (2018) نیز اثرات مثبت حذف و کاهش فسفر در زهکش‌های دارای پوشش گیاهی را تایید کرده‌اند.

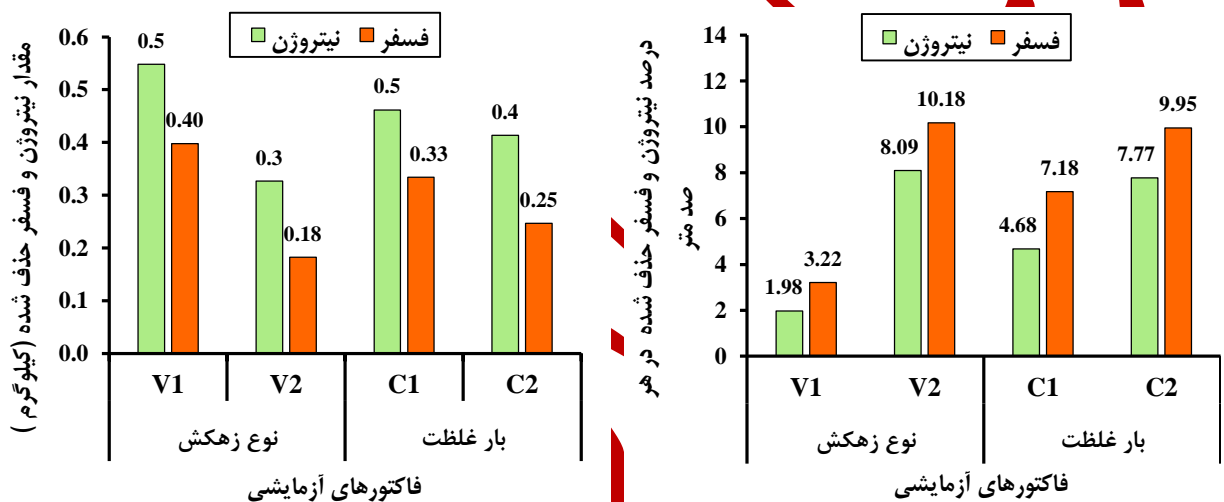


شکل ۴- مقایسه میانگین نیتروژن و فسفر خارج شده در تیمارهای مختلف

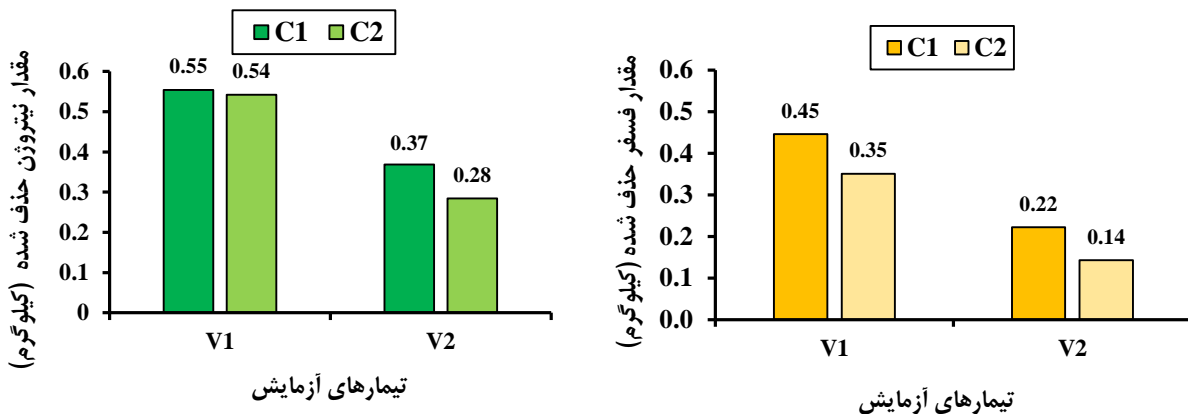
تأثیر نوع زهکش و سطح غلظت بر روی میزان نیتروژن و فسفر حذف شده

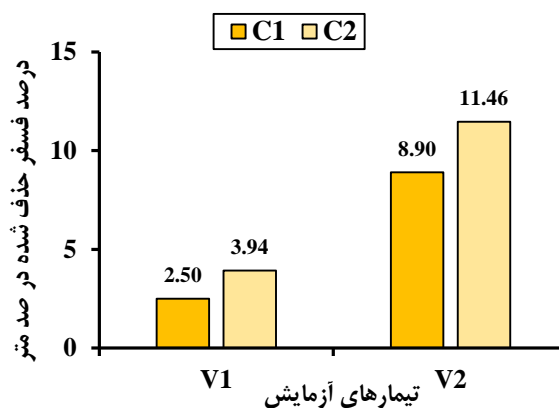
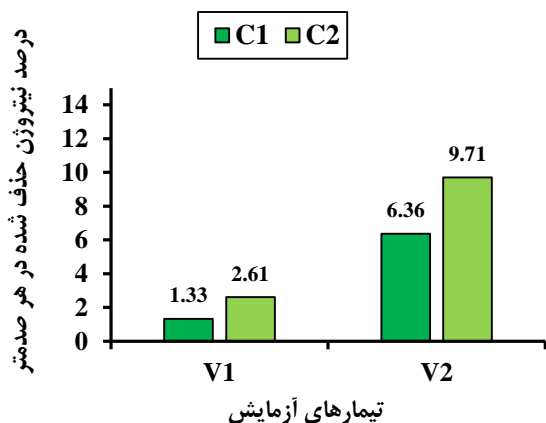
برای تحلیل تأثیر نوع زهکش و سطح غلظت بر میزان بار نیتروژن و فسفر حذف شده، دو سناریو مورد بررسی قرار گرفت. در سناریو اول، با توجه به طول و سطح مقطع بزرگتر زهکش V₁ (۲۰۰ متر) نسبت به زهکش V₂ (۱۰۵ متر)، نتایج مورد تحلیل قرار گرفت. در سناریو دوم، برای حذف اثر طول و سطح مقطع بزرگتر زهکش V₁، میزان آلاینده‌های حذف شده به صورت بی‌بعد در هر ۱۰۰ متر طول کانال ارائه شد تا امکان مقایسه تأثیر دو زهکش ممکن شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نیتروژن و فسفر حذف شده، تحت تأثیر نوع زهکش در سطح یک درصد معنی دار است. اما در خصوص سطوح مختلف غلظت، تأثیر نوع زهکش بر نیتروژن معنی دار نبوده که می‌توان این امر را به زمان محدود آزمایش نسبت داد. با این حال، برای فسفر، تحت تأثیر سطح معنی دار یک درصد قرار دارد. همچنین، اثر متقابل این دو فاکتور برای هر دو آلاینده (نیتروژن و فسفر) نیز معنی دار نشد. این نتایج نشان می‌دهند که نوع زهکش می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر حذف نیتروژن و فسفر داشته باشد، در حالی که سطوح مختلف غلظت کاربردی نیتروژن تأثیر چندانی ندارند، ولی برای فسفر این تأثیر معنی دار است. نتایج تأثیر نوع زهکش بر بار نیتروژن و فسفر حذف شده در هر دو سناریو در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین میزان نیتروژن حذف شده (۰/۵۵ کیلوگرم) و فسفر حذف شده (۰/۴۱ کیلوگرم) به زهکش V₁ اختصاص دارد. این نتایج با توجه به طول و سطح مقطع بزرگتر زهکش لایروبی شده نسبت به زهکش لایروبی نشده، به طوری که میزان حذف آلاینده‌ی فسفر در زهکش V₁ نسبت به زهکش V₂، ۵۵ درصد بیشتر تخمین زده شده است. نتایج تأثیر فاکتور سطح غلظت نشان داد که بیشترین میزان نیتروژن و فسفر حذف شده مربوط به سطح غلظت C₁ به میزان ۰/۴۸ و ۰/۳۳ کیلوگرم است اما با سطح غلظت C₂ اختلاف معنی داری ندارد. نتایج سناریو دوم نشان داد که بیشترین میزان درصد نیتروژن و فسفر حذف شده مربوط به زهکش V₂ و سطح غلظت C₂ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با در نظر گرفتن طول یکسان زهکش‌ها (در هر ۱۰۰ متر طول کانال) پوشش گیاهی دارای پتانسیل حذف ۶۸ و ۷۵ درصد به ترتیب برای آلاینده‌های فسفر و نیتروژن را دارد.

بر اساس شکل ۶، بیشترین و کمترین میزان نیتروژن حذف شده به ترتیب در تیمارهای V_1C_1 و V_2C_2 مشاهده شده که به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۲۸ کیلوگرم بوده است. مقایسه بین تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که زهکش V_1 به دلیل طول و سطح مقطع بزرگ‌تر و زهکش V_2 به دلیل وجود پوشش گیاهی، هر دو در حذف نیتروژن با غلظت‌های بالا عملکرد قابل توجهی داشته‌اند. نتایج همچنین نشان می‌دهند که تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای V_1C_1 و V_1C_2 و همچنین V_2C_1 و V_2C_2 وجود ندارد. نتایج مربوط به فسفر نیز نشان داد که بیشترین و کمترین میزان فسفر حذف شده به ترتیب در تیمارهای V_1C_1 و V_1C_2 و V_2C_2 به میزان ۰/۴۵ و ۰/۱۴ کیلوگرم است. بررسی اثر متقابل نوع زهکش و سطوح مختلف غلظت در سناریو دوم نشان داد که بیشترین و کمترین درصد حذف نیتروژن و فسفر در هر صد متر مربوط به تیمارهای V_1C_1 و V_2C_2 است. این مقادیر برای نیتروژن به ترتیب ۹/۷۱ و ۱/۳۳ درصد و برای فسفر به ترتیب ۱۱/۴۶ و ۲/۵ درصد است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پوشش گیاهی، با در نظر گرفتن هر دو غلظت (تیمارهای V_2C_1 و V_2C_2)، منجر به افزایش حذف نیتروژن به میزان ۷۹ و ۸۶ درصد و همچنین حذف فسفر به میزان ۷۲ و ۷۸ درصد می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای پالایش کانال‌های موجود در شبکه اراضی شالیزاری است.



شکل ۵- میانگین نیتروژن و فسفر حذف شده در هر زهکش و سطوح غلظت مختلف

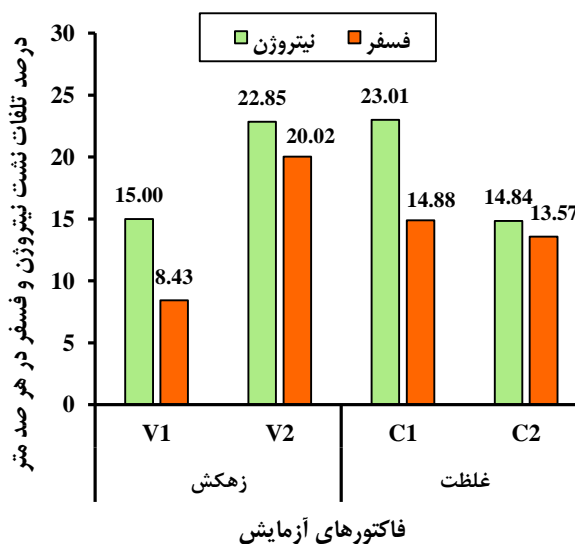
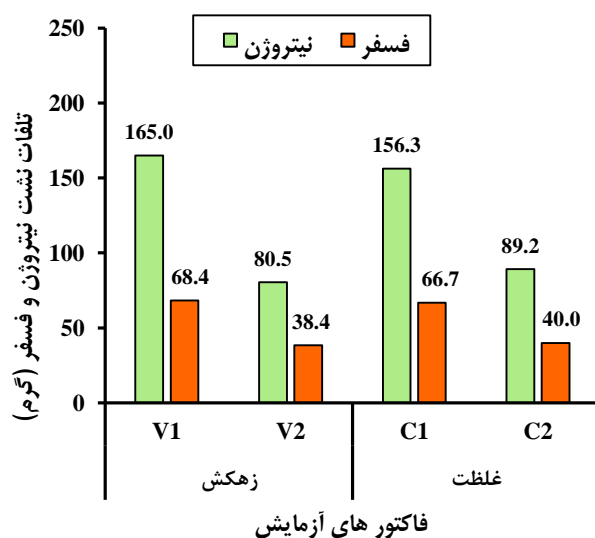




شکل ۶ - مقایسه میانگین مقدار نیتروژن و فسفر حذف شده در تیمارهای مختلف

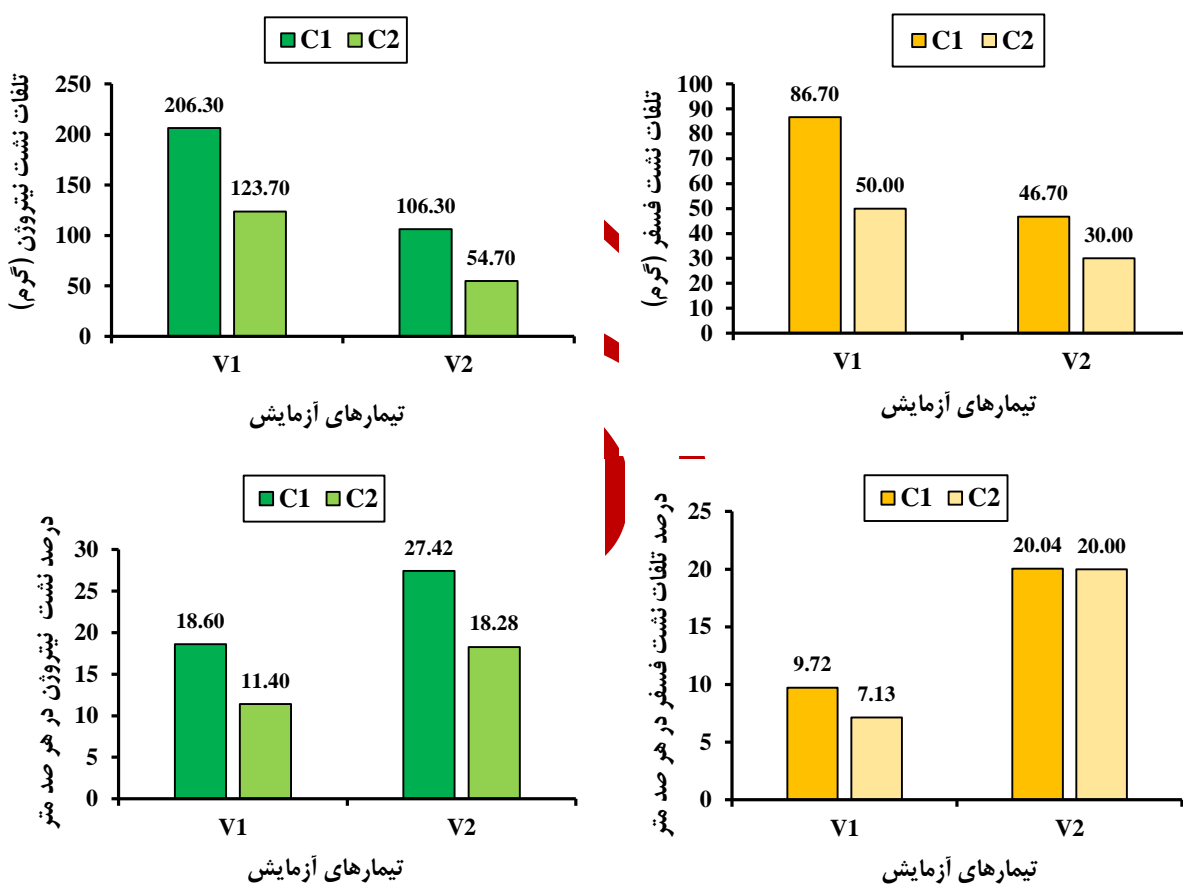
تأثیر نوع زهکش و غلظت بر روی میزان تلفات نشت نیتروژن و فسفر

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میزان تلفات نشت نیتروژن و فسفر در سطح معنی دار یک درصد تحت تأثیر نوع زهکش و سطح غلظت قرار می گیرد. با این حال، اثر متقابل این دو فاکتور بر نیتروژن و فسفر معنی دار نبود. نتایج تلفات نشت آلاینده‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. بیشترین میزان تلفات نفوذ عمقی نیتروژن (۱۶۵ گرم) و فسفر (۶۸/۳۵ گرم) مربوط به زهکش V1 بود که در مقایسه با زهکش V2، به ترتیب ۸۰ گرم (کاهش ۵۱ درصدی) و ۴۰ گرم (کاهش ۴۴ درصدی) تلفات داشت و این اختلاف معنی دار است. همچنین، بررسی سطوح مختلف غلظت کاربردی نشان داد که بیشترین میزان نفوذ عمقی نیتروژن و فسفر مربوط به سطح غلظت C1 به میزان ۱۵۶ و ۶۶/۷۰ گرم بود که این مقادیر نیز با سطح غلظت C2 اختلاف معنی داری داشتند. بررسی درصد تلفات نشت نیتروژن و فسفر در هر صد متر نشان داد که درصد تلفات نیتروژن (۲۲/۸۵ درصد) و فسفر (۲۰/۰۲ درصد) در زهکش V2 بیشتر است. همچنین، بررسی سطح غلظت کاربردی نشان داد که بیشترین میزان تلفات نشت نیتروژن و فسفر در هر ۱۰۰ متر مربوط به سطح غلظت C1 است. بنابراین، با افزایش غلظت، میزان تلفات نشت نیتروژن نیز افزایش می یابد. با کاهش سطح غلظت کاربردی از C1 به C2، میزان تلفات نفوذ عمقی ۴۰ درصد کمتر شده است.



شکل ۷- مقایسه میانگین تلفات نشت نیتروژن و فسفر در هر زهکش و سطوح غلظت مختلف

با توجه به شکل ۸، بیشترین و کمترین میزان تلفات نشت نیتروژن و فسفر مربوط به تیمارهای V_1C_1 و V_2C_2 است که به ترتیب دارای مقادیر $206/30$ و $54/70$ گرم برای نیتروژن و $86/70$ و $30/00$ گرم برای فسفر است. مقایسه بین تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که تیمار V_1C_1 به دلیل طول و سطح مقطع بزرگتر و فقدان پوشش گیاهی و همچنین استفاده از غلظت بالا، میزان تلفات نشت بیشتری دارد درحالی‌که تیمار V_2C_2 به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم و ریشه‌های گیاهان، میزان تلفات نفوذ عمقی نیتروژن و فسفر به ترتیب 73 درصد و 65 درصد کاهش می‌یابد. این نتایج نقش مؤثر مدیریت هم‌زمان مقدار کود کاربردی در مزارع و لایروبی نشدن زهکش‌ها در کاهش میزان خروج آلاینده‌ها را نشان می‌دهد. اثر متقابل دو پارامتر همچنین نشان می‌دهد که با حذف اثر طول زهکش، بیشترین کاهش درصد تلفات نشت نیتروژن و فسفر مربوط به تیمار V_2C_1 است که به مقدار $27/42$ درصد و $20/04$ درصد به ترتیب بوده و این مقدار نیتروژن و فسفر تلف شده به ترتیب برابر $6/36$ و $8/90$ درصد کل نیتروژن و فسفر حذف شده است.



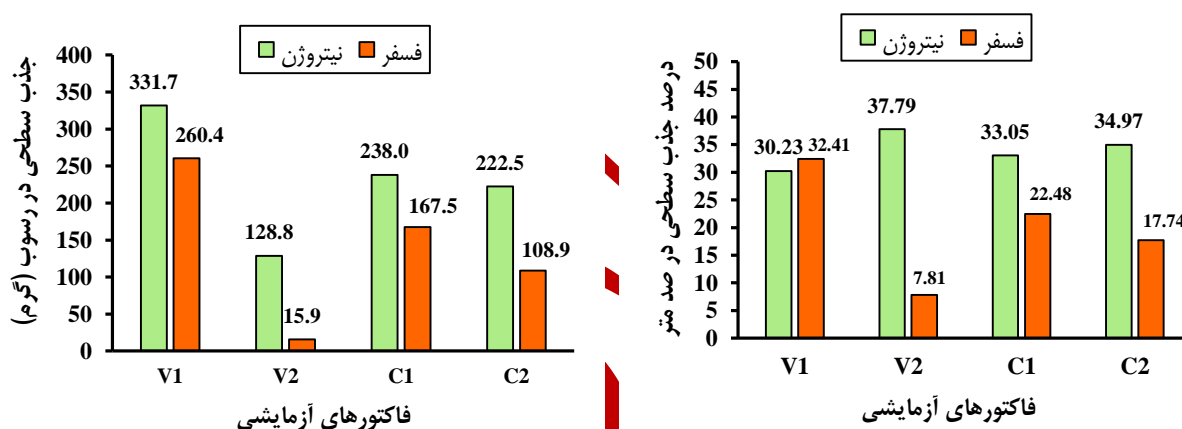
شکل ۸- مقایسه میانگین تلفات نشت نیتروژن و فسفر در تیمارهای مختلف

اثر نوع زهکش و غلظت بر جذب سطحی نیتروژن و فسفر

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میزان جذب سطحی نیتروژن و فسفر تحت تأثیر نوع زهکش (سطح معنی‌دار پنج درصد) قرار گرفته است، اما سطح غلظت آلاینده‌ها نیز اثر معنی‌دار دارد. همچنین، اثر متقابل این دو فاکتور معنی‌دار نشده است. نتایج تأثیر نوع زهکش بر جذب سطحی نیتروژن و فسفر در هر دو سناریو در شکل ۹ نشان داده شده است، که بیشترین میزان جذب سطحی نیتروژن و فسفر

مربوط به زهکش V_1 به ترتیب برابر با $331/74$ و $260/41$ گرم است. این مقادیر به ترتیب با زهکش V_2 ، اختلاف معنی داری دارند که به ترتیب کاهش ۶۱ درصدی و ۹۴ درصدی را نشان می دهند. با توجه به میزان حذف نیتروژن و فسفر که در بخش قبلی اشاره شد، می توان نتیجه گرفت که در صورت عدم وجود پوشش گیاهی و با توجه به طول و سطح مقطع بیشتر زهکش، احتمالاً محیط خیس شده نیز افزایش می یابد و در نتیجه، میزان جذب سطحی نیتروژن و فسفر نیز افزایش می یابد.

بدون در نظر گرفتن اثر طول زهکش، بیشترین درصد جذب سطحی نیتروژن مربوط به زهکش V_2 است، اما با زهکش V_1 که سطح مقطع بزرگ تری دارد و در نتیجه محیط خیس شده بزرگ تری ایجاد می کند، اختلاف معنی داری در جذب سطحی نیتروژن وجود ندارد. سطح غلظت کاربردی در میزان جذب سطحی نیتروژن و فسفر نشان می دهد که بیشترین میزان جذب سطحی مربوط به سطح غلظت C_1 به ترتیب برابر با $238/5$ و $167/46$ گرم است. این مقادیر با سطح غلظت C_2 که به ترتیب $222/5$ و $108/87$ گرم می باشد، اختلاف معنی داری دارد. این نتایج نشان می دهد که جذب سطحی نیتروژن و فسفر علاوه بر مشخصات فیزیکی زهکش ها، به سطح غلظت آلاینده ها نیز وابسته است.



شکل ۹- مقایسه میانگین جذب سطحی نیتروژن و فسفر در هر زهکش و سطوح غلظت مختلف

اثر متقابل پارامترها بر جذب سطحی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیشترین و کمترین میزان جذب سطحی نیتروژن به ترتیب مربوط به تیمارهای V_1C_1 و V_2C_2 با مقادیر $337/56$ و $119/16$ گرم برآورد شد. این نتایج نشان داد که جذب سطحی نیتروژن بیشتر به مشخصات فیزیکی زهکش وابسته است و اختلاف معنی داری بین تیمارهای آزمایشی مشاهده نشد. بیشترین درصد جذب سطحی نیتروژن $39/88$ درصد در هر صد متر است که در تیمار V_2C_2 رخ داده و $9/71$ درصد از کل نیتروژن حذف شده را تشکیل می دهد. بیشترین و کمترین سهم جذب سطحی فسفر به ترتیب مربوط به تیمارهای V_1C_1 و V_2C_2 با مقادیر $311/52$ گرم ($24/95$ درصد در هر صد متر) و $8/45$ گرم ($5/61$ درصد در هر صد متر) است که این تفاوت از نظر آماری معنی دار است. نتایج نشان داد در صورت وجود پوشش گیاهی، جذب سطحی فسفر کمترین سهم در حذف فسفر در زهکش ها دارد.

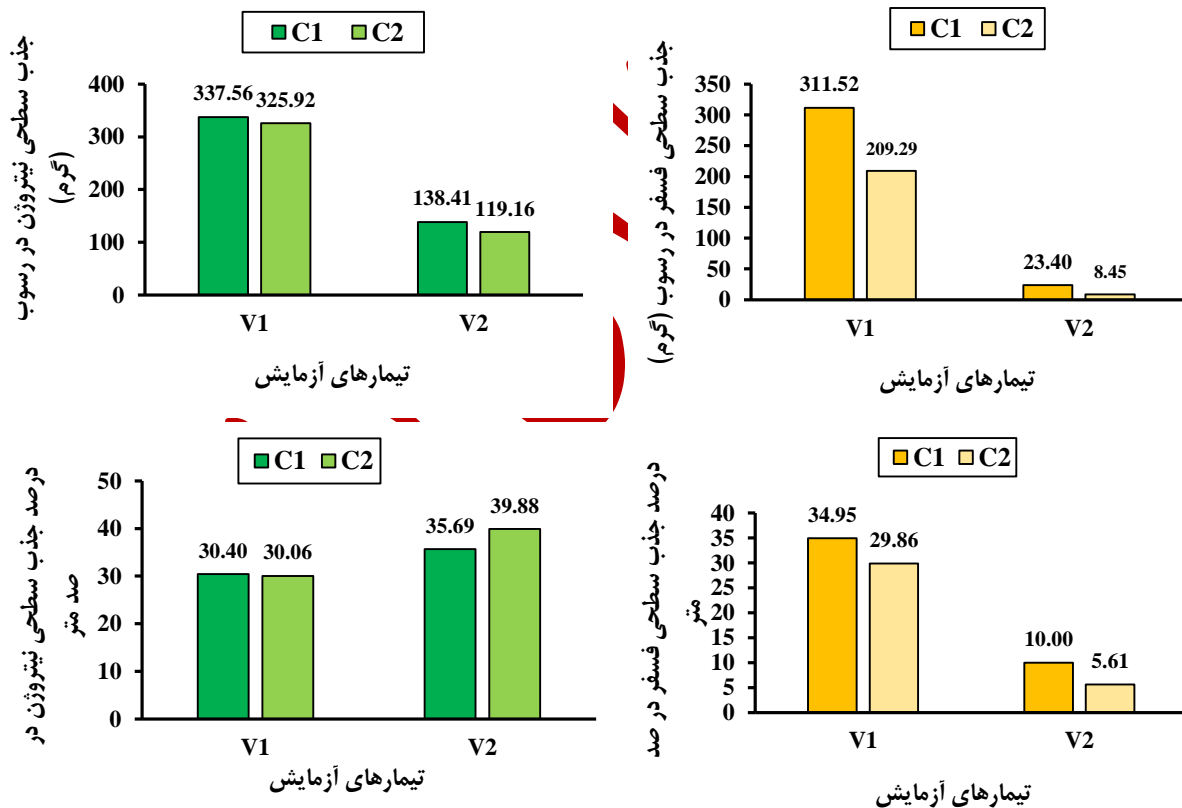
بیان جرمی نیتروژن و فسفر

بیان جرمی نهایی نیتروژن و فسفر پالایش شده در تمامی سناریوها در جدول ۴ قابل مشاهده است. سهم هر کدام از فرآیندهای تاثیرگذار بر اساس مقدار ورودی و خروجی محاسبه شده است. مشاهده می شود که در هر تیمار آزمایشی، با توجه به مشخصات فیزیکی (طول و سطح مقطع) و پوشش گیاهی، سهم هر یک از فرآیندها در حذف آلاینده ها متفاوت است. با مقایسه دو زهکش تحت شرایط یکسان (از نظر غلظت کود کاربردی)، مشاهده شد که زهکش V_1 به دلیل طول و سطح مقطع بزرگ تر نسبت به زهکش V_2 ، بیشتر در

معرض رسوب قرار گرفته و بیشترین سهم حذف نیتروژن و فسفر مربوط به جذب سطحی (رسوب و دنیتریفیکاسیون) است. اما در زهکش V₂، به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم و طول و سطح مقطع کوچکتر، نقش جذب سطحی رسوب در حذف فسفر کم‌رنگ‌تر شده است.

گیاه‌پالایی و دنیتریفیکاسیون

جذب گیاهی به اندام‌های گیاه شامل ریشه، ساقه و اندام‌های مستغرق، به تراکم و نوع پوشش گیاهی بستگی دارد. با توجه به نتایج این پژوهش، با افزایش میزان پوشش گیاهی در زهکش، سهم این قسمت در حذف نیتروژن به ترتیب در تیمارهای آزمایشی V₁C₂، V₂C₁ و V₂C₂ برابر با ۱/۰۹ درصد در هر ۱۰۰ متر از کل ۱/۳۳ درصد نیتروژن حذف‌شده، ۸/۵۴ درصد در هر ۱۰۰ متر از کل ۲/۶۱ درصد نیتروژن حذف‌شده، ۳۲/۱۱ درصد در هر ۱۰۰ متر از کل ۶/۳۶ درصد نیتروژن حذف‌شده، ۳۷/۰۶ درصد در هر ۱۰۰ متر از کل ۹/۷۱ درصد نیتروژن حذف‌شده است. برای فسفر به هم جذب گیاهی در تیمارهای آزمایشی به ترتیب برابر با ۵/۳۲ درصد در هر ۱۰۰ متر از کل ۲/۵ درصد فسفر حذف‌شده، ۱۳ درصد در هر ۱۰۰ متر از کل ۳/۹۳ درصد فسفر حذف‌شده، ۶۵/۱۹ درصد در هر ۱۰۰ متر از کل ۸/۹۰ درصد فسفر حذف‌شده و ۶۹/۶۱ درصد در هر ۱۰۰ متر از کل ۱۱/۴۵ درصد فسفر حذف‌شده است.



شکل ۱۰-۱ مقایسه میانگین جذب سطحی نیتروژن و فسفر در تیمارهای مختلف

جدول ۴. بیان جرمی کل نیتروژن و فسفر حذف‌شده

تیمار	حذف آلاینده	تلفات نشست	جذب سطحی رسوب	گیاه‌پالایی و ...
-------	-------------	------------	---------------	-------------------

میانگین غلظت (ppm)	مقدار خالص N و P ورودی (گرم)	مقدار (گرم)	درصد در ۱۰۰ متر	مقدار (گرم)	درصد در ۱۰۰ متر	مقدار (گرم)	درصد در ۱۰۰ متر	مقدار (گرم)	درصد در ۱۰۰ متر	مقدار (گرم)
نیتروژن										
V ₁ C ₁	۵۰	۲۰۷۰۰	۵۵۴/۳۳	۱/۳۳	۲۰۶/۳۰	۱۸/۶	۳۳۷/۵۶	۳۰/۴	۱۰/۴۷	۱/۰۹
V ₁ C ₂	۲۵	۱۰۳۵۰	۵۴۲/۰۷	۲/۶۱	۱۲۳/۷۰	۱۱/۴	۳۲۵/۹۲	۳۰/۰۶	۹۲/۴۵	۸/۵۴
V ₂ C ₁	۵۰	۵۵۲۰	۳۶۸/۷۴	۶/۳۶	۱۰۶/۳۰	۲۷/۴۲	۱۳۸/۲۱	۳۵/۶۹	۱۲۴/۲۳	۳۲/۱۱
V ₂ C ₂	۲۵	۲۷۶۰	۲۸۴/۴۸	۹/۷۱	۵۴/۷۰	۱۸/۲۸	۱۱۹/۱۶	۳۹/۸۸	۱۱۰/۶۲	۳۷/۰۶
فسفر										
V ₁ C ₁	۳۰	۸۹۰۰	۴۴۵/۶۵	۲/۵۰	۸۶/۷۰	۹/۷۲	۳۱۱/۵۲	۳۴/۹۵	۴۷/۴۳	۵/۳۲
V ₁ C ₂	۱۰	۴۴۵۰/۵	۳۵۰/۳۶	۳/۹۳	۵۰	۷/۱۳	۲۰۹/۲۹	۲۹/۸۶	۹۱/۰۷	۱۳
V ₂ C ₁	۲۰	۲۳۷۳/۶	۲۲۱/۸۴	۸/۹۰	۴۶/۷۰	۲۰/۰۴	۲۳/۴۰	۱۰	۱۵۱/۷۴	۶۵/۱۹
V ₂ C ₂	۱۰	۱۱۸۶/۸	۱۴۲/۷۹	۱۱/۴۵	۳۰	۲۰	۸/۴۵	۵/۶۱	۱۰۴/۳۴	۶۹/۶۱

در زهکش V₂، با توجه به گونه‌های گیاهی موجود در منطقه نظیر نی، تیفا و گالی و تراکم این گیاهان در زهکش، امکان حذف عمده آلاینده‌ها وجود دارد. یکی از مزایای این فرآیند این است که حذف آلاینده‌ها به صورت دائم صورت می‌گیرد و خطر انتقال مواد مغذی و آلاینده‌ها از طریق رسوبات به منابع آب موجود در منطقه کاهش می‌یابد. یکی دیگر از مکانیسم‌های حذف نیتروژن، فرآیند دنیتریفیکاسیون است که به شدت استغراق، مدت زمان ماند و دمای آب بستگی دارد و همانند گیاه‌پالایی، حذف به صورت دائم صورت می‌پذیرد. Zhang et al., (2020) نقش گیاه در جذب سطحی و دنیتریفیکاسیون را به ترتیب ۲۱/۵-۱۲/۴ و ۶۲/۷-۳۸/۹ درصد گزارش کردند که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. Vymazal and Březinová, (2018) میزان حذف نیتروژن به وسیله گیاه نی و تیفا را ۳۶/۳ درصد و برای فسفر ۲۴ درصد گزارش کردند. همچنین آن‌ها نشان دادند که دنیتریفیکاسیون موثرترین فرآیند در حذف نیتروژن به مقدار ۸۰۴ کیلوگرم بر هکتار در سال، در کانال‌های خاکی دارای پوشش گیاهی *Thypha*، *Glyceria* و *Phragmites australis* است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، ظرفیت پالایش زهکش‌های روباز دارای پوشش گیاهی در اراضی شالیزاری شمال کشور مورد بررسی و مقایسه با زهکش لایروبی شده قرار گرفت. تأثیر دو سطح مختلف غلظت مواد مغذی و نوع کانال در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی نقش و تفاوت دو نوع زهکش در پالایش طبیعی و حذف نیتروژن و فسفر، از بیلان جرمی استفاده شد که شامل تلفات نفوذ، جذب سطحی رسوب و تأثیر ترکیبی از جذب گیاهی، دنیتریفیکاسیون و تبخیر است. نتایج نشان داد که زهکش لایروبی نشده، با وجود طول و سطح مقطع کوچک‌تر نسبت به کانال لایروبی شده، دارای ظرفیت بسیار بالاتری برای حذف آلاینده‌ها هستند. دلایل این مشاهده شامل کاهش سرعت جریان آب، جذب آلاینده‌ها به دلیل ضریب زبری بالاتر، جذب توسط گیاهان و افزایش فرآیندهای زیستی مانند دنیتریفیکاسیون است. نتایج نشان داد که درصد حذف آلاینده‌ها ناشی از نفوذ، از روی بستر زهکش در کانال بدون پوشش گیاهی قابل توجه است. همچنین، جذب آلاینده‌ها توسط گیاه و فرآیند دنیتریفیکاسیون، تأثیر قابل توجهی در کاهش بار آلودگی آلاینده‌ها ایفا می‌کنند. این نتیجه نقش مهم گیاه‌پالایی در پالایش زهاب اراضی شالیزاری را نشان می‌دهد که می‌تواند در بهبود کیفیت زهاب مؤثر باشد. از طرف دیگر، عدم لایروبی کانال‌ها منجر به کاهش ظرفیت زهکشی می‌شود، به‌ویژه در شرایط سیل. اما تخلیه زهاب بدون تصفیه به محیط‌زیست منجر به آلودگی منابع آب سطحی می‌شود که دارای عواقب منفی و مخرب خود است. به‌طور کلی، کاربردهای پایدارتر با مدیریت بهتر منابع، به‌ویژه مدیریت بهتر آب مزرعه برای کاهش تولید زهاب و همچنین استفاده دقیق‌تر از مواد شیمیایی

شروع می‌شود. همچنین بررسی اثر دما بر روی پالایش مواد مغذی توسط گیاه و فرایندهای زیستی مورد نیاز است تا در هر دما، گیاه مناسب آن برای پالایش مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه از بیلان برای ارزیابی جذب عناصر توسط گیاه استفاده شده است. نتایج حاصل از گیاه‌پالایی نیز بر اساس محاسبات بیلان به دست آمده‌اند. توصیه می‌شود نمونه‌های گیاهی نیز مورد ارزیابی قرار گیرند تا از بیلان برای اعتبارسنجی نتایج و صحت فرآیند استفاده شود.

منابع

کوچک‌پستکی، کتایون؛ نوابیان، مریم و اسمعیلی‌ورکی، مهدی. (۱۳۹۵). بررسی کارایی روش گیاه‌پالایی در حذف فسفات زهاب اراضی شالیزارهای استان گیلان (مطالعه موردی: گیاهان وتیور، تیفا و نی). ژورنال حفاظت آب و خاک، ۲۳(۴)، ۱۸۷-۲۰۲.

REFERENCE

- Baker, B. H., Kröger, R., Prevost, J. D., Pierce, T., Ramirez-Avila, J. J., Czarnecki, J. M. P., Faust, D., & Flora, C. (2016). A field-scale investigation of nutrient and sediment reduction efficiencies of a low-technology best management practice: Low-grade weirs. *Ecological Engineering*, 91, 240–248.
- Bundschuh, M., Elsaesser, D., Stang, C., & Schulz, R. (2016). Mitigation of fungicide pollution in detention ponds and vegetated ditches within a vine-growing area in Germany. *Ecological Engineering*, 89, 121–130.
- Collins, S. D., Shukla, S., & Shrestha, N. K. (2016). Drainage ditches have sufficient adsorption capacity but inadequate residence time for phosphorus retention in the Everglades. *Ecological Engineering*, 92, 218–228.
- Cooper, C. M., Moore, M. T., Bennett, E. R., Smith, Jr., S., Farris, J. L., Milam, C. D., & Shields Jr., F. D. (2004). Innovative uses of vegetated drainage ditches for reducing agricultural runoff. *Water Science and Technology*, 49(3), 117–123.
- Fausey, N. R., King, K. W., Baker, B. J., & Cooper, R. L. (2004). CONTROLLED DRAINAGE PERFORMANCE ON HOYTVILLE SOIL IN OHIO. Pp. 084-088 in *Drainage VIII Proceedings of the Eighth International Symposium, 21-24 March 2004 (Sacramento, California USA), Publication Date 21 March 2004*.
- Frankenberger, J., Reinhart, B., Nelson, K., Bowling, L., Hay, C., Youssef, M., Strock, J., Jia, X., Helmers, M., & Allred, B. (2017). *Questions and Answers about Drainage Water Recycling for the Midwest*.
- Hay, C. H., Reinhart, B. D., Frankenberger, J. R., Helmers, M. J., Jia, X., Nelson, K. A., & Youssef, M. A. (2021). Frontier: Drainage Water Recycling in the Humid Regions of the U.S.: Challenges and Opportunities. *Transactions of the ASABE*, 64(3), 1095–1102.
- Iseyemi, O. O., Farris, J. L., Moore, M. T., & Choi, S. (2016). Nutrient Mitigation Efficiency in Agricultural Drainage Ditches: An Influence of Landscape Management. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 96(6), 750–756.
- Kling, C. L., Panagopoulos, Y., Rabotyagov, S. S., Valcu, A. M., Gassman, P. W., Campbell, T., White, M. J., Arnold, J. G., Srinivasan, R., Jha, M. K., Richardson, J. J., Moskal, L. M., Turner, R. E., & Rabalais, N. N. (2014). LUMINATE: linking agricultural land use, local water quality and Gulf of Mexico hypoxia. *European Review of Agricultural Economics*, 41(3), 431–459.
- Kosari, S., Parsinejad, M., Mokhtaran, A., & Zebardast, S. (2024). Predicted feasibility and economic return of drainage water recycling in an arid region. *Agricultural Water Management*, 302, 108983.
- Kröger, R., Holland, M. M., Moore, M. T., & Cooper, C. M. (2007). Plant senescence: A mechanism for nutrient release in temperate agricultural wetlands. *Environmental Pollution*, 146(1), 114–119.
- Kröger, R., Scott, J. T., & Czarnecki, J. M. P. (2014). Denitrification potential of low-grade weirs and agricultural drainage ditch sediments in the Lower Mississippi Alluvial Valley. *Ecological Engineering*, 73, 168–175.
- Kumwimba, M. N., Zhu, B., Muyembe, D. K., & Dzakpasu, M. (2017). Growth characteristics and nutrient removal capability of eco-ditch plants in mesocosm sediment receiving primary domestic wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(30), 23926–23938.
- Lampayan, R. M., Rejesus, R. M., Singleton, G. R., & Bouman, B. A. M. (2015). Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, 170, 95–108.
- Liu, F., Zhang, S., Luo, P., Zhuang, X., Chen, X., & Wu, J. (2018). Purification and reuse of non-point source wastewater via Myriophyllum-based integrative biotechnology: A review. *Bioresource Technology*, 248, 3–11.
- Luo, P., Liu, F., Zhang, S., Li, H., Yao, R., Jiang, Q., Xiao, R., & Wu, J. (2018). Nitrogen removal and recovery from lagoon-pretreated swine wastewater by constructed wetlands under sustainable plant harvesting management. *Bioresource Technology*, 258, 247–254.
- Moore, M. T., Bennett, E. R., Cooper, C. M., Smith, S., Farris, J. L., Drouillard, K. G., & Schulz, R. (2006). Influence

- of vegetation in mitigation of methyl parathion runoff. *Environmental Pollution*, 142(2), 288–294.
- Navabian, M., Kouchaki Pastaki, K., & Esmaili Varaki, M. (2016). Evaluate the effectiveness of the phytoremediation method of removing phosphorus from agricultural drainage water (Case Study: Vetiver, Typha and Reed). *Journal of water and soil conservation*, 23(4), 187–202. (In persian).
- Needelman, B. A., Kleinman, P. J. A., Strock, J. S., & Allen, A. L. (2007). Improved management of agricultural drainage ditches for water quality protection: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62(4), 171–178. <https://pure.psu.edu/en/publications/improved-management-of-agricultural-drainage-ditches-for-water-qu>.
- Nsenga Kumwimba, M., Meng, F., Iseyemi, O., Moore, M. T., Zhu, B., Tao, W., Liang, T. J., & Ilunga, L. (2018). Removal of non-point source pollutants from domestic sewage and agricultural runoff by vegetated drainage ditches (VDDs): Design, mechanism, management strategies, and future directions. *Science of The Total Environment*, 639, 742–759.
- Reinhart, B., Frankenberger, J., Abendroth, L., Ahiablame, L., Bowling, L., Brown, L., Helmers, M., Jaynes, D. B., Jia, X., Kladvik, E., Nelson, K., Strock, J., Youssef, M., & Mn. (2016). *Drainage Water Storage for Improved Resiliency and Environmental Performance of Agricultural Landscapes*.
- Scavia, D., David Allan, J., Arend, K. K., Bartell, S., Beletsky, D., Bosch, N. S., Brandt, S. B., Briland, R. D., Daloglu, I., DePinto, J. V., Dolan, D. M., Evans, M. A., Farmer, T. M., Goto, D., Han, H., Höök, T. O., Knight, R., Ludsin, S. A., Mason, D., ... Zhou, Y. (2014). Assessing and addressing the re-eutrophication of Lake Erie: Central basin hypoxia. *Journal of Great Lakes Research*, 40(2), 226–246.
- Soana, E., Balestrini, R., Vincenzi, F., Bartoli, M., & Castaldelli, G. (2017). Mitigation of nitrogen pollution in vegetated ditches fed by nitrate-rich spring waters. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 243, 74–82.
- Vymazal, J., & Březinová, T. D. (2018). Removal of nutrients, organics and suspended solids in vegetated agricultural drainage ditch. *Ecological Engineering*, 118, 97–103.
- Wang, T., Zhu, B., & Zhou, M. (2019). Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage in the hilly area of the central Sichuan Basin, China. *Journal of Hydrology*, 570, 839–849.
- Zhang, S., Liu, F., Huang, Z., Xiao, R., Zhu, H., & Wu, J. (2020). Are vegetated drainage ditches effective for nitrogen removal under cold temperatures? *Bioresource Technology*, 301, 122744.
- Zhang, S., Liu, F., Xiao, R., He, Y., & Wu, J. (2017). Nitrogen removal in *Myriophyllum aquaticum* wetland microcosms for swine wastewater treatment: 15N-labelled nitrogen mass balance analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(2), 505–511.
- Zhang, S., Liu, F., Xiao, R., Li, Y., He, Y., & Wu, J. (2016). Effects of vegetation on ammonium removal and nitrous oxide emissions from pilot-scale drainage ditches. *Aquatic Botany*, 130, 37–44.
- Zhao, Y., Shu, X., Tu, Q., Yang, Y., Liu, C., Fu, D., Li, W., & Duan, C. (2020). Pollutant removal from agricultural drainage water using a novel double-layer ditch with biofilm carriers. *Bioresource Technology*, 310, 123344.

Removal and reduction of nitrogen and phosphorous pollutants from paddy fields earth drainage ditches in vegetated drainage ditch

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

The increase in population has spurred agricultural activities to meet the food demands of humanity. Non-point source pollution, exemplified by nitrogen and phosphorus runoff from agricultural fields, is significant. Uncontrolled use of pesticides and fertilizers, as well as lack of management in fields, result in remarkable sources of pollutants in drainage water. Rice serves as a crucial staple for approximately half of the global population, with particular significance in Iran. Nonetheless, the cultivation of rice in paddy fields necessitates considerable amounts of irrigation water and fertilizers, resulting in the production of significant volumes of unconventional water, which can have adverse environmental impacts. The utilization of vegetated drainage ditches represents an innovative and cost-effective best management practice (BMP_s) for treating drainage water and reducing its contribution to the pollution of downstream water resources. Hence, evaluating the capacity of vegetated drainage ditches to manage nutrient loads is crucial.

Objective:

The main objectives of this study were twofold: (1) to evaluate the efficacy of vegetated drainage ditches in treating different levels of nitrogen and phosphorus concentrations, and (2) to explore how these factors collectively affect the removal potential of nitrogen and phosphorus.

Materials and method:

The experiment was conducted in two distinct ditches, namely dredged (V_1) and un-dredged (V_2) ditches, nestled in the northern and eastern regions of the paddy fields, respectively. Two different concentrations of pollutants were employed, high (C_1) and low (C_2) concentrations, to assess the potential of ditches in removing pollutants. The applied concentration varied based on the dimensions of each ditch. Namely, high and low concentrations of fertilizers were developed by injecting two sets of 45 and 22.5 kg for V_1 and 12 and 6 kg for V_2 , respectively. Four treatments were investigated on the impact of both types of ditches and nutrient concentrations, namely V_1C_1 , V_1C_2 , V_2C_1 , and V_2C_2 . To evaluate the role and difference of the two ditches in the natural treatment and removal of nitrogen and phosphorus, a mass balance was developed, for which the components include seepage losses, sediment surface absorption, and combined effect of plant uptake, denitrification, and volatilization.

Results and discussion:

By considering the interaction of the factors, it was determined that the highest and lowest nitrogen and phosphorus load occurred in treatments V₁C₁ (20.15 and 8.46 kg) and V₂C₂ (2.48 and 1.04 kg), respectively. The share of pollutant removal due to seepage from the channel bed in V₁ drain was calculated as 15% and 8.2% for nitrogen and phosphorus, and 22.85% and 20.02% for V₂ drain. The combined effect of phytoremediation, denitrification, and volatilization was estimated at 1.09% and 5.32%, for the V₁ and V₂ drains respectively, which was 32.11% and 19.65% of the total pollutant removed. This result shows the significant role of phytoremediation in the treatment of drainage water in paddy fields, which can be used to improve the quality of drainage water.

Conclusion:

This outcome underscores the considerable significance of phytoremediation in addressing the drainage water issues in paddy fields, presenting an opportunity for enhancing the overall quality of drainage water. The decrease can be ascribed to the prolonged retention time of fertilizers within the undredged ditch and the impact of vegetative cover. In this regard, the vegetative cover's influence on extending the retention time of fertilizers in the system surpasses the length of the ditch itself. On the other hand, not dredging the drains leads to a decrease in the drainage capacity, especially in flood conditions. However, the discharge without treatment of the drainage water to the environment will result in pollution of surface water sources, which has its own negative and detrimental consequences. Overall, the most sustainable practice starts with source control practices, namely improved field water management to lower drainage water production in addition to a more precise use of chemicals.

Keywords: Phytoremediation, Agricultural wastewater, Water pollution, Drainage system, Eutrophication

پژوهش‌های کشاورزی