

(OPEN ACCESS)

**Evaluation of watercress (*Nasturtium officinale*) plant's ability
in phosphate removal and uptake from water**

**Alireza Ghaffarzadeh¹, Reza Rezanejad², Gholamreza Rafiee³, Kiadokht Rezaei⁴,
Arash Javanshir Khoei^{*5}**

1. Dept. of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ali.ghaffarzadeh1@ut.ac.ir
2. Dept. of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: rezanezhad@ut.ac.ir
3. Dept. of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ghrafiee@ut.ac.ir
4. Dept. of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: kia.rezaie@ut.ac.ir
5. Corresponding Author, Dept. of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
E-mail: arashjavanshir@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: In recent years, water pollution has caused damage to the environment, organisms, and humans. Phosphate can be named as one of these pollutants. Phosphate is a major nutrient contributing to eutrophication in water bodies and the resulting harm to organisms and even humans. This research investigated the phytoremediation potential of <i>Nasturtium officinale</i> in removing phosphate from water sources.
Article history: Received: 06.06.2025 Revised: 06.10.2025 Accepted: 06.12.2025	
Keywords: Phosphate, Phytoremediation, Watercress, Water pollution	Materials and Methods: Experiments were conducted in situ in a stream downstream of Taleghan Dam using synthetic wastewater at two concentrations: 5 and 10 mg/L. Samples were analyzed using a colorimetric method.
	Results: The results showed that in autumn and spring, the phosphate concentration decreased after 60 minutes compared to the initial concentration introduced into the chamber. However, in winter, phosphate release back into the water by the plant was observed.
	Conclusion: Based on the obtained results and evidence, and considering factors such as environmental conditions, seasonal changes, variable nutrient levels, and luxury consumption, it can be said that <i>Nasturtium officinale</i> (Watercress) is an efficient phosphate remover in water resources. This plant can be used for treating wastewater and phosphate-containing water sources to prevent the adverse effects of this pollutant.

Cite this article: Ghaffarzadeh, Alireza, Rezanejad, Reza, Rafiee, Gholamreza, Rezaei, Kiadokht, Javanshir Khoei, Arash. 2025. Evaluation of watercress (*Nasturtium officinale*) plant's ability in phosphate removal and uptake from water. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 14 (3), 1-11.



ارزیابی توان گیاه علف چشمه (*Nasturtium officinale*) در پالایش و جذب فسفات از آب

علیرضا غفارزاده^۱، رضا رضائزاد^۲، غلامرضا رفیعی^۳، کیادخت رضایی^۴، آرش جوانشیر خوئی^{۵*}

۱. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ali.ghaffarzadeh1@ut.ac.ir

۲. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: rezanezhad@ut.ac.ir

۳. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ghrafiee@ut.ac.ir

۴. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: kia.rezaie@ut.ac.ir

۵. نویسنده مسئول، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: arashjavanshir@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: طی سالیان اخیر آلودگی منابع آبی باعث آسیب به محیط‌زیست، جانداران و انسان شده است. از فسفات می‌توان به عنوان یکی از این آلاینده‌ها نام برد. فسفات یکی از نوترینت‌های مهم و مؤثر در ایجاد یوتریفیکاسیون در آب‌ها و آسیب‌های حاصل از آن بر روی جانداران و حتی انسان است. در این پژوهش توان گیاه‌پالایی گیاه علف چشمه در پالایش و جذب فسفات از منابع آبی مورد بررسی قرار گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۶	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲	
واژه‌های کلیدی: آلودگی آب، علف چشمه، فسفات، گیاه‌پالایی	مواد و روش‌ها: آزمایش‌ها در شرایط <i>In situ</i> در جویبار پایین‌دست سد طالقان و با استفاده از فاضلاب سنتتیک در دو غلظت ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، صورت گرفتند. سنجش نمونه‌ها نیز به روش رنگ‌سنجی انجام شد.
	یافته‌ها: نتایج به‌دست آمده نشان دادند که در فصول پاییز و بهار میزان غلظت فسفات پس از گذشت زمان ۶۰ دقیقه، نسبت به غلظت اولیه وارد شده به محفظه کاهش یافت. اما در فصل زمستان بازپس‌دهی فسفات به آب توسط گیاه مشاهده شد.
	نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج و شواهد به‌دست آمده و هم‌چنین با در نظر گرفتن تأثیر عواملی چون شرایط محیطی، تغییرات فصلی، میزان متغیر مواد مغذی و جذب لوکس می‌توان گفت گیاه علف چشمه یک پالاینده کارآمد فسفات در منابع آبی است و از این گیاه می‌توان برای تصفیه فاضلاب‌ها و منابع آبی حاوی فسفات به منظور جلوگیری از اثرات سوء این آلاینده، استفاده نمود.
استاد: غفارزاده، علیرضا، رضائزاد، رضا، رفیعی، غلامرضا، رضایی، کیادخت، جوانشیر خوئی، آرش (۱۴۰۴). ارزیابی توان گیاه علف چشمه (<i>Nasturtium officinale</i>) در پالایش و جذب فسفات از آب. نشریه بهره‌برداری و پرورش آبزیان، ۱۴ (۳)، ۱-۱۱.	
Doi: 10.22069/japu.2025.23755.1960	
ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان	
© نویسندگان.	

مقدمه

آب منبع حیاتی است که به دلیل خواص شیمیایی خاصش، حلال طبیعی قوی محسوب می‌شود (۱). در سال‌های اخیر، رشد جمعیت و توسعه فناوری باعث افزایش آلودگی آب شده است (۲). عدم تصفیه فاضلاب قبل از تخلیه در کشورهای در حال توسعه، همراه با آلودگی‌های مضر مانند عوامل بیماری‌زا، فلزات سنگین و ناخالصی‌های مختلف، تهدیدی جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان ایجاد کرده است (۳). از زمان انقلاب صنعتی، این آلودگی‌ها چرخه آب و تعادل اکولوژیکی را مختل کرده‌اند. فعالیت‌هایی مانند معدن‌کاری، استفاده از سوخت‌های فسیلی و مواد شیمیایی کشاورزی و تخلیه زباله‌های شهری، منابع اصلی آلودگی هستند (۴). در نهایت آلاینده‌های پایدار از طریق زنجیره غذایی منتقل شده و در بدن موجودات آبرزی انباشته می‌شوند (۵).

یکی از راهکارهای اکوسیستم‌های آبی برای کاهش بار آلودگی‌ها، «خودپالایی» نام دارد. طی این فرآیند، مواد آلاینده‌ای که وارد توده آبی شده‌اند به تدریج توسط ارگانیسم‌ها (اعم باکتری‌ها، جلبک‌ها، گیاهان و جانوران) مصرف یا جذب شده و بدین ترتیب آلودگی آب کاهش می‌یابد (۶). «گیاه‌پالایی» در مقایسه با سایر روش‌ها، مزایایی مانند هزینه کم، بهبود چشم‌انداز محیط، آلودگی ثانویه کم، عدم نیاز به تغییرات شدید در محیط، استفاده از انرژی خورشیدی و عدم نیاز به انرژی ورودی اضافی و همچنین نرخ بالای حفاظت از محیط زیست را داراست (۶، ۸). گیاه‌پالایی عمدتاً به هفت فرآیند تقسیم می‌شود که سازوکارهای فیزیولوژیکی آن‌ها عبارتند از: استخراج گیاهی^۱، پاک‌سازی ریشه^۲، تثبیت گیاهی^۳، تجزیه گیاهی^۴، تجزیه ریشه^۵، تبخیر گیاهی^۶ و کنترل

هیدرولیکی^۷ (۴). البته گیاه‌پالایی یک مکانیزم حذف موقت است و معمولاً نیاز به برداشت و دفع مواد گیاهی پس از پالایش دارد در غیر این صورت ممکن است گیاهان در طی تجزیه به منبع دیگری از آلاینده‌ها تبدیل شوند. بنابراین در محیط‌های بسیار آلوده، حذف بافت گیاهی برای جلوگیری از شسته شدن آلاینده‌های انباشته شده در گیاه به محیط لازم است. بنابراین گیاهان آبرزی استفاده شده برای گیاه‌پالایی پس از برداشت به عنوان سوخت زیستی و کود استفاده می‌شوند و یا از طریق سوزاندن از بین می‌روند. شایان ذکر است عواملی مانند نوع گونه گیاهی، سطح آلودگی و شرایط محیطی بر روی موفقیت حذف آلاینده‌ها از آب توسط گیاه‌پالایی تأثیر می‌گذارند (۹). برای این‌که گیاه‌پالایی به یک فناوری سازگار با محیط زیست تبدیل شود، گیاهان باید دارای ویژگی‌های زیر باشند: بومی و دارای سرعت رشد سریع، عملکرد زیست‌توده بالا، جذب مقدار زیادی آلاینده و مکانیزمی برای تحمل سمیت آلاینده‌ها. عوامل دیگری مانند pH، تابش خورشیدی، در دسترس بودن مواد مغذی، شوری و جذب لوکس^۸ به شدت بر پتانسیل گیاه‌پالایی و رشد گیاه تأثیر می‌گذارند (۱۰، ۱۱).

نیاز به کاهش مواد آلاینده ناشی از فعالیت‌های انسانی در اکوسیستم‌های آبی برای جلوگیری از مغذی‌سازی آب به‌طور گسترده‌ای مورد تأیید قرار گرفته است. مواد نوترینت ساده مانند فسفر، که ناشی از رواناب‌های کشاورزی بوده و باعث یوتروفیکاسیون^۹ بیش از حد منابع آبی می‌شوند، می‌توانند به عنوان مواد مغذی برای رشد گیاه استفاده شوند (۲، ۱۲، ۱۳). یوتروفیکاسیون منجر به شکوفایی جلبکی، گسترش گیاهان آبرزی مهاجم، کاهش سطح اکسیژن و از بین رفتن گونه‌ها می‌گردد (۱۳، ۱۴، ۱۵). مقادیر بالای

- 1- Phytoextraction
- 2- Rhizofiltration
- 3- Phytostabilization
- 4- Phytodegradation
- 5- Rhizodegradation
- 6- Phytovolatilization

- 7- Hydraulic Control
- 8- Luxury Consumption
- 9- Eutrophication

فسفات ممکن است اثرات سمی مستقیم بر بیولوژی ماهی‌ها، شامل اختلالات هورمونی، کاهش رشد، و آسیب به سیستم تنفسی و تولیدمثل باشد. بنابراین، آلودگی فسفات در آب‌های زیستی، تهدید جدی برای سلامت و پایداری اکوسیستم‌های آبی محسوب می‌شود (۱۶).

به‌طور کلی، فسفات‌ها به عنوان مواد محلول و تا حدی پایدار در آب هستند و نیمه عمری بین چند هفته تا چندماه در محیط آبی دارند. اما در محیط‌های آبی ممکن است تحت تأثیر فعالیت‌های بیولوژیکی و شیمیایی قرار بگیرند که منجر به تجزیه یا جذب توسط میکروارگانیسم‌ها می‌شود. در بسیاری مطالعات گیاهان اعم از خشکی‌زی و آبی برای حذف فسفر از فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. گیاهانی مانند *Vetiveria zizanioides*, *Thalia dealbata* و *Phragmites* sp. به‌طور گسترده در تالاب‌های مصنوعی برای کنترل یوتروفیکاسیون استفاده می‌شوند (۱۷).

بورتولوتی و بارون (۲۰۲۲) طی پژوهشی گزارش دادند که گونه‌های سرده *Brassica* به دلیل داشتن فرایندهای فیزیولوژیکی کارآمد برای استراتژی‌های گیاه‌پالایی و یک مکانیزم دفاعی آنزیمی و غیرآنزیمی کارآمد و نیز کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از فلزات سنگین سمی در متابولیسم، گیاهان توانمندی برای پالایش این فلزات هستند (۱۸). نتایج پژوهش دیگری توسط حمد (۲۰۱۱) نشان داد که گیاه سنبل آبی توانایی خوبی (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms.) در جذب و انتقال مس (Cu)، نیکل (Ni) و روی (Zn) در سه محیط آبی مختلف (رود نیل، زهکش کشاورزی و زهکش مخلوط صنعتی و کشاورزی) دارد. محتوای فلز در ریشه‌های سنبل آبی می‌تواند به‌عنوان یک نشانگر زیستی خوب آلودگی فلزی در محیط‌های آبی مختلف عمل کند (۱۹). آران و

همکاران (۲۰۱۷) تجمع زیستی سرب (Pb)، کروم (Cr)، نیکل (Ni) و روی (Zn) را در گیاه آبی *Limnobia laevigatum* مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد این گونه می‌تواند به عنوان یک گیاه تجمع‌دهنده این فلزات در نظر گرفته شود (۲۰). هارگوئیستگویی و همکاران تجمع نیکل، سرب و روی را در دو گیاه *Myriophyllum aquaticum* و *Egeria densa* بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد *M. aquaticum* برای گیاه‌پالایی در محیط‌های آبی آلوده به نیکل، سرب یا روی مناسب‌تر از *E. densa* است (۲۱).

گیاه علف چشمه که یک گیاه بن در خاک است، دارای فراوانی و سازگاری بالایی بوده و تقریباً در کنار بسیاری از رودها و جویبارها کوچک در جهان قابلیت رویش دارد. بعضی مطالعات انجام گرفته در گذشته نشان دادند که این گیاه توانایی بالایی در پالایش فلزات سنگین از جمله Cu، Ni، Zn و Cd در اندام‌های خود و حذف آن‌ها از آب‌های آلوده دارد. با توجه به این‌که گیاه علف چشمه دارای رویش بالا در ایران و جهان بوده و مطالعات قبلی انجام گرفته تأییدکننده نقش مثبت این گیاه در پالایش برخی از انواع آلاینده‌هاست. بنابراین نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر می‌تواند در راستای معرفی این گیاه به‌عنوان یکی از کاراترین و مؤثرترین جنس‌های گیاهی در پالایش سبز مواد آلاینده ارگانیک مورد استفاده قرار گیرد (۲۲، ۲۳).

هدف از این پژوهش بررسی توانایی گیاه علف چشمه به عنوان گیاه بومی منطقه، در پالایش زیستی فاضلاب سنتتیک شامل فسفات مونوپتاسیم با تکیه بر ساخت سیستمی قابل جایگذاری در بستر رودخانه و استفاده از گیاه در زیستگاه اصلی خود، بوده است.

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش: این پژوهش در پایین‌دست سد طالقان واقع در منطقه طالقان طی فصول پاییز و زمستان سال ۱۴۰۳ و بهار ۱۴۰۴ انجام شد (شکل ۱). سد طالقان در گروه سدهای خاکی بوده و بخشی از آب سد به صورت نشتی دائماً از آن خارج می‌شود که نهایتاً به رودخانه شاهرود می‌پیوندد. آب‌های نشتی سد با تکیه بر لایه‌بندی حرارتی ذخیره‌گاه پشت سد،

دارای دمای ثابت در تمام طول سال هستند و این وضعیت باعث می‌شود که محیط مناسبی با نوسانات حداقل، برای حضور و زیست گیاهان و جانوران فراهم شود. به همین علت در منطقه مورد مطالعه نیز حضور گیاه علف‌چشمه همیشگی بوده که برای مطالعات سالانه مناسب می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۱- نمایی از سد طالقان (الف) و محل انجام آزمایش‌ها و نمونه‌برداری (ب).

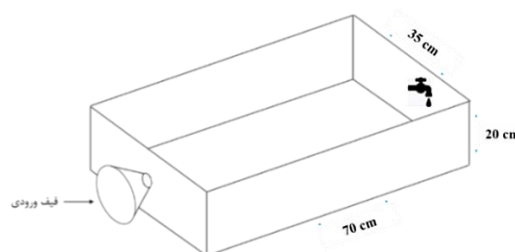
Figure 1. View of the Talqan Dam (a) and the location of the experiments and sampling (b).

آماده‌سازی فاضلاب سنتتیک: فاضلاب سنتتیک شامل محلول فسفات مونوپتاسیم بود. از این ترکیب به صورت جداگانه، محلولی در آب مقطر با دو غلظت ۵ و ۱۰ میلی گرم در لیتر ساخته شد. طراحی و ساخت سیستم آزمایش: مطالعه حاضر به شکل *In Situ* صورت گرفت که بدین منظور محفظه‌ای از جنس شیشه با ابعاد ۷۰×۳۵×۲۰

سانتی‌متر در جویبار نشتی سد قرار گرفت (شکل ۲). این مخزن دارای ورودی و خروجی قابل تنظیم است که از این طریق می‌توان دبی آب ورودی را در آن تنظیم نمود. بدنه شیشه‌ای آن امکان عبور نور را در آن فراهم می‌کند بدین ترتیب تمامی شرایط *In situ* برای گیاه را فراهم می‌کند.



(ب)



(الف)

شکل ۲- طرح شماتیک (الف) و تصویری از سیستم انجام آزمایش‌ها در محیط (ب).

Figure 2. Schematic diagram (a) and image of the field testing system (b).

نتایج و بحث

آن‌چنان که ذکر شد غلظت‌های آلودگی فسفات به‌میزان ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، و تغییرات آن‌ها طی گیاه‌پالایی در سه فصل پاییز، زمستان و بهار در بازه‌های زمانی مختلف (از ۰ تا ۶۰ دقیقه) به شرح زیر بررسی شد.

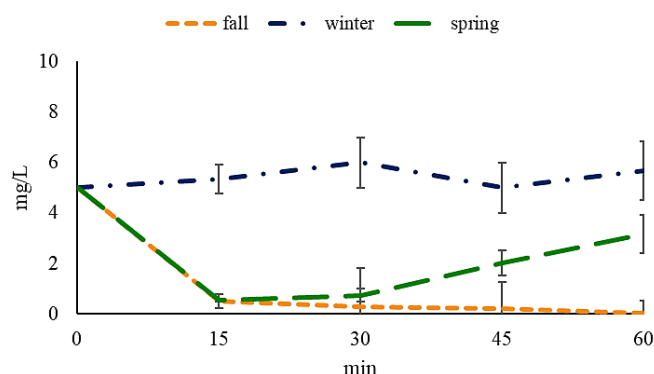
غلظت ۵ میلی‌گرم بر لیتر فسفات: در فصل پاییز، مقدار آلودگی فسفات ورودی در ابتدا، برابر با ۵ میلی‌گرم بر لیتر بود. غلظت فسفات در نمونه دقیقه ۱۵، 0.50 ± 0.26 میلی‌گرم بر لیتر گزارش شد که نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار نسبت به غلظت اولیه است ($P < 0.05$). این روند نزولی تا دقیقه ۶۰ با شیب $-1/0.2$ و R^2 معادل 0.58 (جدول ۱) ادامه داشته و غلظت نهایی به 0.50 ± 0.03 میلی‌گرم بر لیتر رسید (شکل ۳) که نشان‌دهنده کاهش آلودگی فسفات توسط گیاه علف چشمه با درصد راندمان کاهشی $99/33$ بوده است (جدول ۲).

در فصل زمستان نیز با غلظت اولیه ۵ میلی‌گرم بر لیتر، در دقیقه ۱۵ به میزان $6/66$ درصد افزایش (جدول ۱) مشاهده شد که طی این افزایش غلظت $5/33 \pm 0.58$ میلی‌گرم بر لیتر گزارش گردید. این افزایش تا دقیقه ۳۰ ادامه یافت و غلظت $6/00 \pm 1/00$ میلی‌گرم بر لیتر را نشان داد. پس از آن، یک کاهش جزئی در دقیقه ۴۵ به میزان $16/66$ درصد و با غلظت $5/00 \pm 1/00$ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد، اما در دقیقه ۶۰ دوباره غلظت به $5/67 \pm 1/15$ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت (شکل ۳). به‌طورکلی، زمستان درصد راندمان افزایشی $13/33$ را نشان داد و نوسانات آن نسبتاً کم و با شیب $0/1$ و R^2 معادل $0/13$ بود (جدول ۲).

انجام آزمایش و نمونه‌برداری: ابتدا سیستم آزمایش در نقطه مناسبی از جویبار قرار داده شد و ورود و خروج آب به داخل آن تنظیم گردید. سپس گیاه علف چشمه به میزان $27/62 \pm 341/43$ گرم وزن تر از محیط جمع‌آوری و داخل سیستم قرار داده شد. پس از آن محلول فسفات مونوپتاسیم (با غلظت‌های ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) را به سیستم حاوی گیاه اضافه نموده و نمونه‌برداری هر ۱۵ دقیقه با سه تکرار از خروجی سیستم صورت گرفت.

سنجش فسفات: برای سنجش فسفات از روش رنگ‌سنجی استفاده شد، به این ترتیب که به ۱۰۰ میلی‌لیتر از نمونه یک قطره فنل فتالین افزودیم و سپس قطره قطره اسیدسولفوریک اضافه کردیم تا بی‌رنگ شود. در مرحله بعد به هر یک از استانداردها و نمونه ۴ میلی‌لیتر معرف مولبدات و $0/5$ میلی‌لیتر کلرور استانو افزوده و پس از هر افزایش مخلوط کردیم. بعد از ده دقیقه میزان جذب نور را در طول ۶۹۰ نانومتر در مقابل بلانک قرائت نمودیم. از آب مقطر به عنوان بلانک استفاده شد (۶).

آنالیز آماری: داده‌های به‌دست آمده به‌صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شده است. با استفاده از نرم‌افزار SPSS²¹ آزمون کولموگروف اسمیرنوف جهت تأیید نرمال بودن داده‌ها صورت گرفت و در صورت نیاز برای نرمال نمودن داده‌های غیرنرمال، ترنسفرم انجام شد. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون ANOVA و آزمون تعقیبی دانکن صورت گرفت. در پایان راندمان روند تغییرات به منظور ارزیابی عملکرد کلی گیاه در کاهش آلاینده محاسبه شد.



شکل ۳- تغییرات غلظت فسفات در فصول و زمان‌های مختلف (محلول ۵ میلی‌گرم بر لیتر).

Figure 3. Phosphate Concentration Changes at Different Seasons and Times (5 mg/L Solution).

در فصل بهار، با غلظت اولیه ۵ میلی‌گرم بر لیتر، در دقیقه ۱۵ به میزان ۸۹/۳۳ درصد کاهش مشاهده شد و غلظت فسفات به میزان 0.53 ± 0.58 میلی‌گرم بر لیتر رسید. با گذشت زمان از دقیقه ۱۵ تا دقیقه ۶۰، افزایش معنی‌دار مشاهده شده است ($P < 0.05$) به‌طوری‌که غلظت نهایی فسفات 3.17 ± 0.76 میلی‌گرم بر لیتر بوده است. این روند به‌طور کلی با در نظر گرفتن غلظت اولیه با شیب ۰/۲ و R^2 معادل ۰/۲۷ (جدول ۱) و درصد راندمان ۳۶/۶۶ کاهش یافته (جدول ۲) اما هم‌چنان که مشاهده می‌شود تا دقیقه ۳۰ گیاه جذب داشته و پس از آن بازپس‌دهی به محیط صورت گرفته است (شکل ۳).

در فصل بهار، با غلظت اولیه ۵ میلی‌گرم بر لیتر، در دقیقه ۱۵ به میزان ۸۹/۳۳ درصد کاهش مشاهده شد و غلظت فسفات به میزان 0.53 ± 0.58 میلی‌گرم بر لیتر رسید. با گذشت زمان از دقیقه ۱۵ تا دقیقه ۶۰، افزایش معنی‌دار مشاهده شده است ($P < 0.05$) به‌طوری‌که غلظت نهایی فسفات 3.17 ± 0.76 میلی‌گرم بر لیتر بوده است. این روند به‌طور کلی با در نظر گرفتن غلظت اولیه با شیب ۰/۲ و R^2 معادل ۰/۲۷ (جدول ۱) و درصد راندمان ۳۶/۶۶ کاهش یافته (جدول ۲) اما هم‌چنان که مشاهده می‌شود تا دقیقه ۳۰ گیاه جذب داشته و پس از آن بازپس‌دهی به محیط صورت گرفته است (شکل ۳).

جدول ۱- معادله دوجمله‌ای تغییرات غلظت فسفات تحت تأثیر توان گیاه پالایی علف چشمه.

Table 1. Polynomial equation of phosphate concentration changes under the influence of the phytoremediation potential of *Phragmites australis*.

غلظت	فصل	
	۱۰ میلی‌گرم	۵ میلی‌گرم
پاییز	$y = -2.1833x + 11.35$ $R^2 = 0.9193$	$y = -1.0233x + 4.27$ $R^2 = 0.5766$
زمستان	$y = 0.6x + 8.4667$ $R^2 = 0.1357$	$y = 0.1x + 5.1$ $R^2 = 0.1324$
بهار	$y = -1.15x + 8.1833$ $R^2 = 0.3359$	$y = 0.2x + 4.6$ $R^2 = 0.2727$

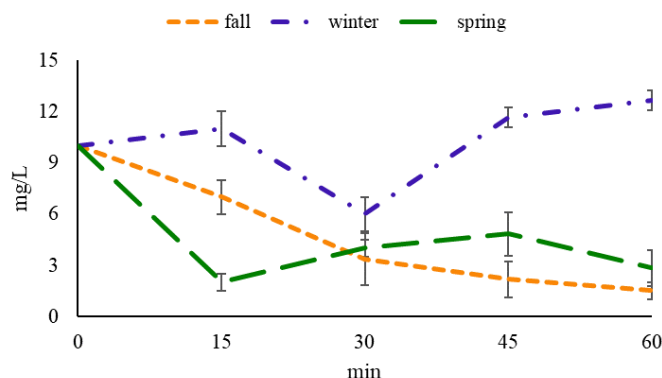
(Luxury Consumption) باشد (۶، ۸). این نوع رفتار عمدتاً در گیاهان گرسنه (Carence) از نظر املاح مشاهده شده است (۱۱).

غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر فسفات: در فصل پاییز، مقدار غلظت آلودگی فسفات ورودی در ابتدا برابر با ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. در دقیقه ۱۵، این غلظت با

مقایسه کاهش مقادیر فسفات در غلظت پایین (۵ میلی‌گرم بر لیتر و در بهار)، نشان‌دهنده جذب بالا و سریع فسفات در اولین اندازه‌گیری (دقیقه ۱۵)، بوده که در زمان‌های بعدی غلظت این ماده در آب محفظه بالا می‌رود. بالا رفتن فسفات در محفظه بسته مورد آزمایش تا حدی می‌تواند در اثر جذب لوکس

به $0/50 \pm 1/50$ میلی گرم بر لیتر رسید (شکل ۴). این روند با در نظر گرفتن غلظت اولیه با شیب $-2/18$ و R^2 معادل $0/91$ (جدول ۱) نشان‌دهنده درصد راندمان کاهشی ۸۵ بوده است (جدول ۲).

۳۰ درصد کاهش به غلظت $1/00 \pm 7/00$ میلی گرم بر لیتر رسید و در ادامه روند نزولی معنی‌داری مشاهده شد ($P < 0/05$)؛ به‌طوری‌که در دقیقه ۳۰، میانگین غلظت $1/53 \pm 3/33$ میلی گرم بر لیتر برآورد شد. این کاهش تا دقیقه ۶۰ ادامه داشت و مقدار نهایی



شکل ۴- تغییرات غلظت فسفات در فصول و زمان‌های مختلف (محلول ۱۰ میلی گرم بر لیتر).

Figure 4. Changes in phosphate concentration at different seasons and times (10 mg/L solution).

در فصل بهار، غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم بود و در دقیقه ۱۵ به $0/5 \pm 2$ میلی گرم بر لیتر کاهش یافت. سپس یک روند افزایشی معنی‌دار ($P < 0/05$) مشاهده شد؛ به‌طوری‌که غلظت به $0/5 \pm 4$ میلی گرم بر لیتر در دقیقه ۳۰ رسید. غلظت اندازه‌گیری شده در دقیقه ۴۵، $1/26 \pm 4/83$ میلی گرم بر لیتر بود. در نهایت، در دقیقه ۶۰، غلظت $1/04 \pm 2/83$ میلی گرم بر لیتر ثبت شد (شکل ۴). این روند کاهشی با شیب $-1/15$ با R^2 معادل $0/33$ (جدول ۱) نشان‌دهنده درصد راندمان کاهشی $71/67$ بود (جدول ۲).

در فصل زمستان با غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم بر لیتر، در دقیقه ۱۵ میزان غلظت به مقدار $1/00 \pm 11/00$ میلی گرم بر لیتر بود که درصد راندمان افزایشی ۱۰ را نشان می‌دهد. در دقیقه ۳۰ غلظت به $1/00 \pm 6/00$ میلی گرم بر لیتر رسید که نشان‌دهنده کاهش معنی‌داری نسبت به غلظت اولیه بوده است ($P < 0/05$). با گذشت زمان اما، غلظت به تدریج افزایش یافت و در دقیقه ۴۵ به $0/58 \pm 11/67$ و در دقیقه ۶۰ به $0/58 \pm 12/67$ میلی گرم بر لیتر رسید (شکل ۴). این روند با درصد راندمان افزایشی $26/66$ و شیب $0/6$ و R^2 معادل $0/13$ (جدول ۱) افزایش قابل‌توجهی در غلظت نمونه آخر نسبت به غلظت اولیه نشان می‌دهد (جدول ۲).

جدول ۲- راندمان روند تغییرات غلظت فسفات.

Table 2. Phosphate Concentration Change Efficiency.

فصل	زمان (دقیقه)	غلظت ۵ میلی گرم			غلظت ۱۰ میلی گرم		
		پاییز	زمستان	بهار	پاییز	زمستان	بهار
	۰	-	-	-	-	-	-
	۱۵	%-۹۰	%+۶/۶۶	%-۸۹/۳۳	%-۳۰	%+۱۰	%-۸۰
	۳۰	%-۴۶/۶۶	%+۱۲/۵	%+۳۷/۵	%-۵۲/۳۸	%-۴۵/۴۵	%+۱۰۰
	۴۵	%-۲۵	%-۱۶/۶۶	%+۱۷۲/۷۲	%-۳۵	%+۹۴/۴۴	%+۲۰/۸۳
	۶۰	%-۸۳/۳۳	%+۱۳/۳۳	%+۵۸/۳۳	%-۳۰/۷۶	%+۸/۵۷	%-۴۱/۳۸
	راندمان کل	%-۹۹/۳۳	%+۱۳/۳۳	%-۳۶/۶۶	%-۸۵	%+۲۶/۶۶	%-۷۱/۶۷

مقایسه و مطالعه نتایج حاصل از اضافه نمودن ترکیبات فسفات (۱۰ میلی گرم بر لیتر) نشان دهنده تغییراتی است که تا حدودی وابسته به میزان جذب گیاه است. از آنجایی که جذب فسفات در گیاهان عمدتاً تحت تأثیر دوره های گلدهی و رشد زایشی و متناوباً رشد رویشی است (۳، ۶)، در فصل زمستان دریافت آن توسط توده گیاهی روند کاهشی در طول دوره نمونه برداری داشته است و حتی در انتهای آزمایش میزان آن در محفظه بیش از میزان اولیه شده است. مشاهده میدانی در این زمینه گویای این است که زی توده سایر زیست مندان گیاهی نیز بسیار ضعیف بود به عنوان مثال خبری از *Lemna minor* نبود. در مقابل در نمونه برداری فصل پاییز، شدت جذب بسیار سریع اتفاق افتاد به نحوی که مقادیر باقی مانده فسفات در محفظه نزدیک به صفر (کمتر از ۳ میلی گرم در لیتر) قابل جذب نیستند.

به طور کلی آن چنان که مشخص است کارایی گیاه پالایی تحت تأثیر عوامل کلیدی متعددی از جمله نوع گونه گیاهی، آب و هوای محیط اطراف (مانند دما و نور خورشید)، شرایط محیطی (مانند در دسترس بودن مواد مغذی) و جذب لوکس قرار دارد (۳، ۱۰، ۱۱). این نکته روند متفاوت جذب و پالایش فسفات

توسط گیاه علف چشمه را در سه فصل مختلف پاییز، زمستان و بهار توضیح می دهد زیرا که شرایط محیطی، میزان تابش نور، دما و میزان دسترس بودن مواد مغذی در این سه فصل با یکدیگر متفاوت می باشد (۸). در نهایت با استناد به آزمایش های صورت گرفته و نتایج به دست آمده، رفتار گیاه در دو غلظت ۵ و ۱۰ میلی گرم بر لیتر تقریباً شبیه یکدیگر بوده و گیاه به اندازه توان خود عمل جذب فسفات را انجام داده است. در هر دو غلظت مطالعه شده و در زمستان به علت جذب کم نیز نوساناتی دیده شد که اختلافات معنی دار نیستند. به طور کلی با استناد به شواهد و نتایج به دست آمده و در نظر گرفتن تغییرات در عوامل محیطی یاد شده، می توان از گیاه علف چشمه به عنوان یک پالاینده فسفات در فاضلاب ها و منابع آبی آلوده به این آلاینده، نام برد.

نتیجه گیری

به طور کلی، نتایج نشان می دهند که فصل پاییز با کاهش مداوم غلظت، زمستان با روند نوسانی و سپس افزایشی، و بهار با نوسانات شدید و نهایتاً کاهش در طول زمان همراه بوده است. این نتایج بیانگر تفاوت های زیستی، شیمیایی یا فیزیکی مرتبط با

شرایط فصلی در منطقه مورد مطالعه باشند که قدرت گیاه‌پالایی گیاه علف چشمه تحت تأثیر آن‌ها بوده است.

داده‌ها و اطلاعات

این پژوهش براساس داده‌ها و سنجش‌های آزمایشگاهی حاصل از طرح پژوهش اولیه مرتبط با پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول تدوین شده است. آزمایش‌ها و سنجش‌ها در آزمایشگاه هیدروبیولوژی و لیمنولوژی گروه شیلات دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران صورت گرفته است.

مشارکت نویسندگان

علیرضا غفارزاده (نویسنده اول): انجام نمونه‌برداری‌ها، آزمایش‌ها، آنالیز داده‌ها و نگارش اولیه مقاله
رضا رضائزاد (نویسنده دوم): انجام نمونه‌برداری‌ها، طرح پژوهش

غلامرضا رفیعی (نویسنده سوم): طرح پژوهش
کیادخت رضایی (نویسنده چهارم): انجام نمونه‌برداری‌ها، آنالیز داده‌ها

آرش جوانشیر خوئی (نویسنده پنجم و مسئول): طرح پژوهش، نظارت بر روند اجرا، اصلاح و بازبینی نهایی مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود نداشته و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

منابع

- 1.Enyoh, C. E., et al. (2023). Phytoremediation of heavy metals and organic pollutants using aquatic macro- and microphytes. *World Scientific News*, 76-103.
- 2.Zhou, Y., et al. (2023). Duckweeds for phytoremediation of polluted water. *Plants*.
- 3.Tan, H. W., et al. (2023). A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology & Innovation*.
- 4.Ozyigit, I. I., Can, H., & Dogan, I. (2021). Phytoremediation using genetically engineered plants to remove metals: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-26.
- 5.Ziarati, P., Asgarpanah, J., & Mir Mohammad Makki, F. S. (2015). Phytoremediation of heavy metal contaminated water using potential Caspian Sea wetland plant: Nymphaeaceae. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 12(3), 2467-2473.
- 6.Khoei, A. J., & Rezaei, K. (2017). *Inland waters ecology and applications*. Okhovat Publishing.
- 7.Zhuang, G. (2023). Current phytoremediation technologies and applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 2608.
- 8.Newete, S., & Byrne, M. J. (2016). The capacity of aquatic macrophytes for phytoremediation and their disposal with specific reference to water hyacinth. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(20), 10630-10643.
- 9.Enochs, B., et al. (2023). Short and long-term phytoremediation capacity of aquatic plants in Cu-polluted environments. *Heliyon*.

10. Ali, S., et al. (2020). Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: A review.
11. de Mazancourt, C., & Schwartz, M. W. (2012). Starve a competitor: Evolution of luxury consumption as a competitive strategy. *Theoretical Ecology*, 5(1), 37-49.
12. Vasconcelos, V. M., et al. (2021). Floating aquatic macrophytes for the treatment of aquaculture effluents. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 2600-2607.
13. Cuevas, D. G., et al. (2024). Prediction of nitrate, phosphate and ammonia removal in wastewater by phytoremediation-vortex system using artificial neural network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
14. KIRÁLY, K. Á., et al. (2013). Importance of ammonia detoxification by plants in phytoremediation and aquaponics. *Adria Scientific Workshop*, 99-102.
15. Ting, W. H. T., et al. (2018). Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 239-249.
16. ZENG, Z., et al. (2013). Sorption of ammonium and phosphate from aqueous solution by biochar derived from phytoremediation plants. *Journal of Zhejiang University Science B*, 14(2), 1152-1161.
17. Ghaffarzadeh, A., & Javanshir Khoei, A. (2025). Phytoremediation by macroFites in contaminated environments with heavy metals. In *Second International Conference on Interdisciplinary Studies in Health Sciences and Engineering Research* (pp. 1-10). <https://civilica.com/doc/2280391>.
18. Bortoloti, G. A., & Baron, D. (2022). Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: A biochemical and physiological approach. *Environmental Advances*.
19. Hammad, D. M. (2011). Cu, Ni, and Zn phytoremediation and translocation by water hyacinth plant at different aquatic environments. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(1), 11-22.
20. Arán, D. S., et al. (2017). Phytoextraction of Pb, Cr, Ni, and Zn using the aquatic plant *Limnobium laevigatum* and its potential use in the treatment of wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 18295-18308.
21. Harguinteguy, C. A., Pignata, M. L., & Fernández-Cirelli, A. (2015). Nickel, lead, and zinc accumulation and performance in relation to their use in phytoremediation of macrophytes *Myriophyllum aquaticum* and *Egeria densa*. *Ecological Engineering*, 78, 512-516.
22. Torbati, S. (2017). Feasibility study on phytoremediation of malachite green dye from contaminated aqueous solutions using watercress (*Nasturtium officinale*). *Iranian Journal of Health & Environment*, 9(4), 503-516.
23. Zhang, Z. B., et al. (2007). Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes. *Journal of Environmental Sciences*, 19(7), 902-909.

