فـصـلنامـه علمی ـ پژوهشی علـوم‌محیـطی، دوره یازدهم، شـمـاره ۳، پائیز ۱۳۹۲
Environmental Sciences Journal, Vol. 11, No. 3, Fall 2013

تعیین نسبت بهینه نیترات به فسفات در فرایند گیاه‌پالائی
(مطالعه موردی: گیاهان بامبو و پامپاس‌گراس)

علی علافی‌پور[۱]، حسین گنجی‌دوست*[۲] و بیتا آیتی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران -محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس
[۲] استاد گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس
[۳] دانشیار گروه مهندسی محیط‌زیست ، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ... تاریخ چاپ:.....

چکیده

در این پژوهش نسبت بهینه نیترات به فسفات در فرایند گیاه‌پالایی توسط دو گونه گیاه وتلندی پامپاس‌گراس و بامبو در محیط هیدروپونیک در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از فاضلاب سنتزی تعیین شد. ابتدا با انجام آزمایشات اولیه زمان ماند بهینه ۸ روز تعیین شد و بر این اساس تحقیقات ادامه یافت. کلیه نتایج در هر مرحله با استفاده از آزمون t بررسی شد. نتایج حاصله نشان داد که در سطح خطای ۵درصد بیشترین راندمان حذف مجموع آلاینده‌ها در میان تیمارهای پامپاس‌گراس در نسبت نیترات به فسفات (۵۰:۵۰) و به میزان ۴۵/۸۴ درصد و در بین تیمارهای بامبو در نسبت (۲۵:۲۵) و به میزان ۳۳/۵۴ درصد اتفاق افتاد، در حالی که میزان جذب مجموع آلاینده‌ها در نسبت (۱۰۰:۱۰۰) در تیمار هر کیلوگرم وزن خشک گیاه پامپاس‌گراس به‌میزان ۷۶/۲ گرم و به‌ازای هر کیلوگرم وزن خشک گیاه بامبو به‌میزان ۸۲/۱گرم بود. طبق نتایج حاصله، راندمان حذف و جذب گیاه پامپاس‌گراس در سطح خطای ۵ درصد از گیاه بامبو بالاتر بود.

کلمات کلیدی: غلظت، pH، زمان ماند، هیدروپونیک.

Determination of Nitrate and Phosphate Optimal Ratio in Phytoremediation Process (Case Study: Pampas Grass and Bamboo Vtlndy)

Ali Allafipour,[1] Hossein Ganjidoust[2*] and Bita Ayati[3]

[1] *M.Sc. student in Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University*
[2] *Full Professor, Civil & Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University,*
[3] *Associated professor, Civil & Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University*

Abstract

In this study, the optimal ratio of nitrate to phosphate in the lab scale phytoremediation by two species of Pampas Grass and Bamboo Vtlndy using synthetic sewage was determined. After initial experiments, optimal retention time of 8 days was determined and on this basis, the study was continued. All results at each stage were examined using T-test analysis. The results showed that in the maximum error of 5%, maximum removal of 84.45 and 54.33 percent in Pampas Grass and bamboo were occurred in nitrate to phosphate ratio of 50:50 and 25:25, respectively while the total amount of pollutants were removed in the ratio of 100:100 and the rate of 2.67 and 1.82 gr/kg based on dry weight, respectively using Pampas Grass and bamboo. The results showed that in the range of 5 percent error level, the rate of removal and absorption of Pampas Grass was higher than bamboo.

Keywords: Concentration, pH, Detention Time, Hydroponic.

* Corresponding author. *E-mail Address*: h-ganji@modares.ac.ir

۱- مقدمه

نیترات و فسفات از آلاینده‌های مهم موجود در فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی هستند [۱]. نیتروژن ترکیبی است که گیاهان بدون آن قادر به زندگی نیستند و نیترات یا ترکیبات آمونیومی تأمین‌کننده این نیاز هستند. به‌همین دلیل کودهای شیمیایی را برای بهبود رشد گیاهان مصرف می‌کنند. اما آلودگی نیترات زمانی روی می‌دهد که نیترات بیشتر از مقدار جذب شده توسط گیاهان در خاک حضور داشته باشد. مازاد نیترات می‌تواند به‌راحتی به‌وسیله آبیاری، بارش باران یا ذوب شدن برف و یخ، از خاک‌ها و صخره‌ها حرکت کرده و در نهایت به آب‌های زیرزمینی برسد. علاوه بر کودهای شیمیایی صنایعی که پساب آن‌ها نیتروژن بالایی دارد نیز می‌توانند در آلوده‌ساختن منابع آب مؤثر باشند [۲]. در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری نیز با تکمیل فرایند نیتریفیکاسیون (شوره‌گذاری) مقادیر قابل توجهی نیترات تولید می‌شود. نیترات بر سلامتی انسان اثرات سوء دارد. احیای نیترات پس از ورود به سیستم گردش خون، آهن هموگلوبین را اکسید کرده و از ظرفیت ۲ به ۳ تبدیل می‌کند. مت‌هموگلوبین در مقایسه با هموگلوبین ظرفیت اکسیژن‌رسانی بسیار کم‌تری دارد و در نتیجه اکسیژن کافی به بافت‌ها نمی‌رسد و بعد از مدتی رنگ پوست، به‌خصوص در ناحیه دور چشم و دهان، به تیرگی می‌گراید؛ این پدیده را «سندروم بچه‌آبی» می‌گویند. اثرات فوق بیان‌گر ضرورت تصفیه پساب‌ها از نیترات است. حذف نیترات با استفاده از روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی امکان‌پذیر است. سازمان محیط‌زیست آمریکا بیشترین مقدار مجاز نیترات در آب آشامیدنی را ۴۴ mg/l برحسب نیترات تعیین کرده است [۳].

فسفات یکی دیگر از آلاینده‌های مغذی است که در فاضلاب‌های شهری (معمولاً ۴ تا ۱۶ میلی‌گرم بر لیتر برحسب فسفر) و با مقادیر متفاوتی در فاضلاب‌های صنعتی یافت می‌شود؛ غلظت آن در دریاچه‌ها و دریاها به‌دلیل استفاده از شوینده‌های آلی به‌سرعت در حال افزایش است [۴ و ۵]. فسفات یکی از ریزمغذی‌های ضروری برای رشد جلبک‌های فتوسنتزی و سیانوباکترهاست. ورود پساب‌های حاوی فسفات و نیترات به محیط‌زیست به‌خصوص رودها و دریاچه‌ها باعث ایجاد پدیده نوتریفیکاسیون (شوره‌گذاری) می‌شود [۶ و ۷]. به این منظور لازم است فسفات موجود در پساب‌ها با استفاده از روش‌های مناسب حذف و به حد استاندارد رسانده شود. عمده‌ترین روش‌های مورد استفاده برای حذف فسفر از پساب عبارت‌اند از: رسوب‌دهی، شیمیایی، و زیست‌شناختی [۵ و ۷]. استاندارد ایران غلظت فسفات را برای تخلیه به آب‌های سطحی به ۶ میلی‌گرم بر لیتر برحسب فسفر و ۱۸ میلی‌گرم بر لیتر برحسب فسفات محدود می‌کند. تصفیه این نوع فاضلاب‌ها با استفاده از روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی به‌لحاظ تکنولوژی اغلب پیچیده و پرهزینه است و نیاز به اپراتور و نیروی انسانی متخصص دارد. افزون بر این در مواردی که تصفیه خاک مد نظر باشد، این روش‌ها ممکن است باعث تخریب بیوتیک خاک شود [۸].

گیاه‌پالایی به‌عنوان کاربرد گیاهان سبز شامل گونه‌های گیاهی گراس‌ها، گیاهان پهن‌برگ علفی و چوبی یا مردابی برای جذب، حذف یا کم‌خطر کردن آلودگی‌های زیست‌محیطی در خاک، آب یا هوا تعریف می‌شود. پیش‌زمینه اولیه برای حرکت به سمت توسعه تکنولوژی گیاه‌پالایی هزینه کم و راندمان بالای آن بود اما مزایای قابل توجه این فناوری در دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفت به‌طوری که هم‌اکنون مراحل تجاری شدن را طی می‌کند. برای مثال ۳۰درصد پروژه‌های تحقیقات سازمان محیط‌زیست آمریکا در سال ۲۰۰۰ اختصاص به پروژه‌های گیاه‌پالایی فلزات سنگین و مواد رادیو اکتیو داشته است [۸].

در زمینه حذف نیترات و فسفات به‌وسیله فرایند گیاه‌پالایی تحقیقات فراوانی در سطح دنیا انجام گرفته است. به‌عنوان مثال در تحقیقی، از گیاه سنبل آبی برای حذف نیتروژن با غلظت اولیه ۵۶ میلی‌گرم بر لیتر و فسفر با غلظت اولیه ۱۵/۴ میلی‌گرم بر لیتر از فاضلاب استفاده و ۱۰۰درصد حذف حاصل شد [۹]. همچنین در پژوهشی اثر نیتروژن و فسفر بر رشد بیومس گیاه *Typh domingensis* بررسی و رشد بیومس جدید در حالت نیتروژن تنها ۱۱۰ گرم، فسفر تنها ۷۱ گرم، ترکیب آن دو ۱۳۷ گرم و در حال کنترل ۶۷ گرم گزارش شد [۱۰]. در پژوهشی دیگر، حذف نیترات به‌وسیله گیاه *Water Hyacinth* بررسی شد. آزمایشات در ۷ سطح نیتروژن از ۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر انجام و زمان ماند آزمایشات ۴ هفته در نظر گرفته

شد. نتایج نشان‌گر کاهش ۶۰ تا ۸۵ درصد مقدار نیتروژن بود [۱۱]. در تصفیه فاضلاب یک واحد پروش مرغابی شامل مقدار COD اولیه ۲۷۰ میلی‌گرم بر لیتر، نیتروژن کل ۱۲/۷۲ میلی‌گرم بر لیتر، و فسفر کل ۸/۸۶ میلی‌گرم بر لیتر، امکان استفاده از گیاه سنبل آبی به‌عنوان غذای مرغابی مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیقات نشان داد که سیستم قادر به حذف ۶۴/۴۴ درصد COD، ۲۱/۷۸ درصد نیتروژن کل (TN)، و ۲۳/۰۲ درصد فسفر کل (TP) است [۱۲]. بررسی تصفیه فاضلاب شهری با وتلند مصنوعی و گیاه *Kandelia candel*، به‌عنوان تصفیه ثانویه در هنگ‌کنگ، نشان داد که ۷۶/۱۶ تا ۹۱/۸۳ درصد نیتروژن آمونیومی، ۴۷/۸۹ تا ۶۳/۳۷ درصد نیتروژن غیرآلی، ۷۵/۱۵ تا ۷۹/۰۶ درصد نیتروژن کل، و نیز ۹۷ درصد ارتوفسفات و ۸۶/۶۵ تا ۹۱/۸۳ درصد فسفر کل حذف شده است [۱۳]. آزمایشاتی که در زمینه حذف نوترینت‌ها توسط گیاه بامبو در مدت ۲ سال انجام گرفت نشان داد که بامبو همراه با خاک قابلیت حذف ۹/۹۹ درصد نیترات با غلظت اولیه ۸۶ میلی‌گرم بر لیتر، و ۹۹/۴ درصد فسفر با غلظت اولیه ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر را دارد [۱۴].

در این تحقیق از گیاهان پامپاس‌گراس و بامبو استفاده شده است. گیاه پامپاس‌گراس در مراتع و اماکن دارای تالاب یا وتلند به‌وفور یافت می‌شود و از خصوصیات آن برخورداری از پتانسیل بالاتر جذب مواد مغذی، گرفتن آب از محیط و جذب نور خورشید، در مقایسه با سایر گونه‌های موجود در منطقه است. بامبو نیز از جمله سریع‌الرشدترین گیاهان در جهان است که این رشد چشم‌گیر مرهون ساختمان بی‌نظیر آن، به‌نام «ریزوم» است [۱۵]. از گیاه بامبو در موارد متعدد برای حذف فلزات سنگین و نوترینت‌ها استفاده شده است.

با توجه به مطالب مذکور، هدف این تحقیق تعیین نسبت بهینه نیتروژن به فسفر در فرایند گیاه‌پالایی توسط دو گونه گیاه وتلندی پامپاس‌گراس و بامبو و براساس دو پیش‌فرض جداگانه بود: ۱. بیشترین راندمان حذف مجموع آلاینده‌ها؛ ۲. بیشترین میزان جذب گیاه. همچنین در طول تحقیق نحوه تغییرات pH در ورودی و خروجی پایلوت‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

برای ساخت فاضلاب سنتزی با نسبت‌های متفاوت نیترات و فسفات [۱۶ و ۱۷] از نمک‌های KNO_3 و KH_2PO_4 ساخت شرکت مرک و آب مقطر استفاده شد. گیاهان پامپاس‌گراس و بامبو در محیط هیدروپونیک و در شرایط گلخانه‌ای در دمای ۱۹ تا ۲۳ درجه سیلسیوس پرورش داده شدند و پس از آن در گلدان‌های مورد نظر قرار گرفتند. از ظرف‌های استوانه‌ای پلاستیکی به‌قطر ۱۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر (ظرفیت حداکثر ۲/۵ لیتر) برای گیاه بامبو، و از ظرف‌هایی به قطر ۴۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر (ظرفیت حداکثر ۱۸ لیتر) برای گیاه پامپاس‌گراس استفاده شد (شکل‌های ۱الف و ۱ب).

(الف)

(ب)

شکل ۱- الف) پایلوت گیاه پامپاس‌گراس؛ ب) مجموعه ۵ پایلوت گیاه بامبو

نکته قابل ذکر این که در پایلوت‌های پامپاس‌گراس ۳ عدد گیاه و در پایلوت‌های بامبو ۶ عدد گیاه قرار داده شد به‌طوری که وزن تمامی پایلوت‌های گیاه پامپاس‌گراس با یکدیگر، و نیز گیاه بامبو با هم برابر باشند. در ضمن محل استقرار پایلوت‌ها به‌نحوی در نظر گرفته شد که در طول روز تحت تابش ملایم نور خورشید قرار داشته باشند.

در ابتدا آزمایشات زمان ماند در دو سطح نیترات و دو سطح فسفات و در مجموع ۳ تیمار آغاز، و میزان کاهش نیترات و فسفات به‌صورت روزانه ثبت شد. سپس بخش اصلی آزمایشات در ۶ سطح غلظت نیترات و یک سطح فسفات و در مجموع ۶ تیمار راه‌اندازی شد. بعد از تعیین نسبت بهینه در این مرحله، آزمایشات در سطح نیترات بهینهٔ به دست آمده از مرحله قبل، و سطوح متفاوت فسفات متناسب با سطح غلظت نیترات، ادامه یافت و در نهایت نسبت بهینه تعیین شد. یادآور می‌شود که وزن کلیه گیاهان قبل از شروع آزمایشات به‌عنوان وزن تر گیاه ثبت شد.

برای تشخیص میزان تبخیر از ظروفی با همان ابعاد و میزان آب اما بدون گیاه، در محیط آزمایشگاه استفاده شد و مطابق با کاهش حجم مایع در این ظروف آب مقطر به پایلوت‌ها اضافه شد. کل آزمایشات با در نظر گرفتن زمان پرورش گیاهان ۹ ماه به طول انجامید. در طول آزمایشات غلظت نیترات و فسفات و میزان pH هر بار در سه تکرار اندازه‌گیری و ثبت شد. به‌منظور اندازه‌گیری میزان فسفات و نیترات به‌ترتیب مطابق دستورالعمل‌های شماره ۸۱۱۴ (در طول موج ۴۳۰ نانومتر) و ۸۰۳۹ (در طول موج ۵۰۰ نانومتر) دستگاه اسپکتروفتومتر DR۵۰۰۰ ساخت شرکت Hach استفاده شد. pH محیط هیدروپونیک با استفاده از pHسنج با الکترود دیجیتالی ساخت شرکت Hach مدل Sension۳۸۷، اندازه‌گیری و در طول آزمایشات از اسیدسولفوریک و هیدروکسید سدیم برای تنظیم و کنترل میزان pH در محدوده خنثی استفاده شد. در انتها نیز وزن تر گیاه و وزن خشک آن تعیین شد. در طول آزمایشات و در مراحل مختلف از روش آماری آزمون t و نرم‌افزار SPSS برای تحلیل نتایج استفاده شد.

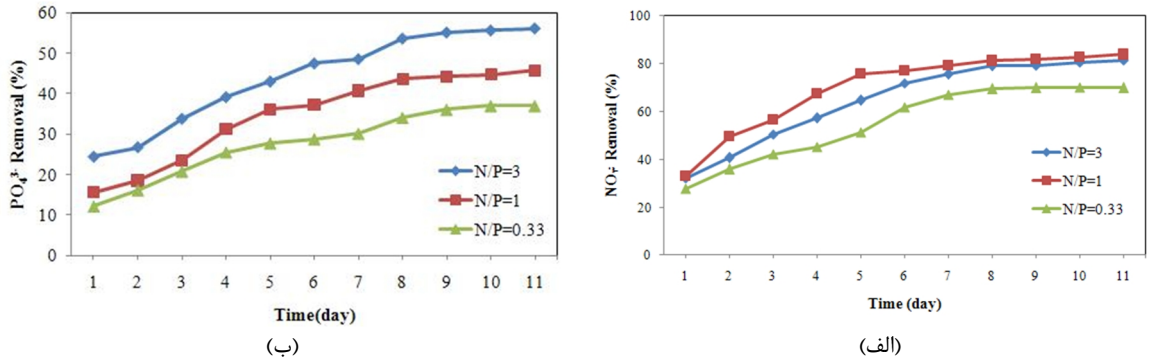
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین زمان ماند

برای انجام این آزمایش نسبت‌های نیترات به فسفات به‌صورت ۰/۳۳=(۲۵:۷۵)، ۱=(۲۵:۲۵) و ۳=(۷۵:۲۵) انتخاب شد. در شکل‌های ۲ و ۳ راندمان حذف نیترات و فسفات (درصد) توسط گیاهان پامپاس‌گراس و بامبو در روزهای مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل ۲الف، به‌طور متوسط در هر سه نسبت، در ۷ روز نخست مقدار ۶۰ تا ۷۵ درصد نیترات حذف می‌شود. بعد از روز هفتم از شیب حذف کاسته شده و به‌طور تقریبی در ۴ روز بعد راندمان حدود ۵ تا ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. شکل ۲ب بیان‌گر حذف ۴۵ درصد فسفات در گیاه پامپاس‌گراس تا روز هشتم است و بعد از آن به‌طور تقریبی این شدت کاهش یافته و حدوداً ثابت شد.

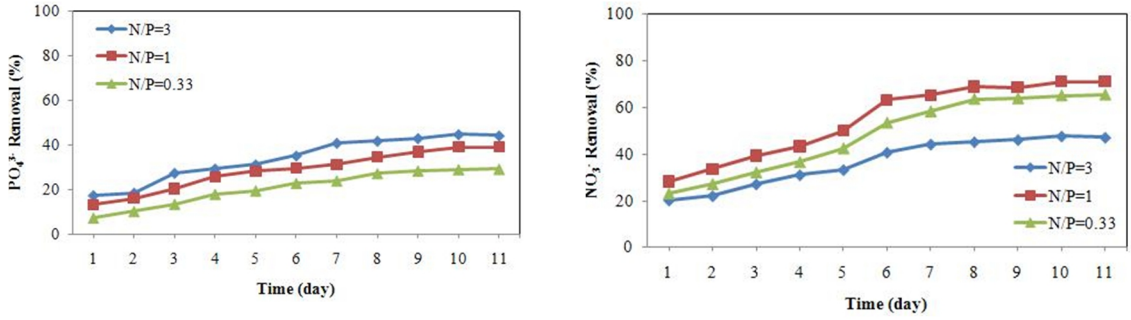
مطابق شکل‌های ۳الف و ۳ب در گیاه بامبو روند کلی حذف نیترات و فسفات و مدت زمان آن شبیه گیاه پامپاس‌گراس است، با این تفاوت که راندمان حذف در حد پایین‌تری است.

با توجه به نتایج حاصله، زمان ماند برای انجام آزمایشات ۸ روز انتخاب شد، و در ادامهٔ آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت.



(الف) (ب)

شکل ۲- تعیین زمان ماند حذف: الف) نیترات؛ ب) فسفات در پامپاس گراس



(ب) (الف)

شکل ۳- تعیین زمان ماند حذف: الف) نیترات؛ ب) فسفات در بامبو

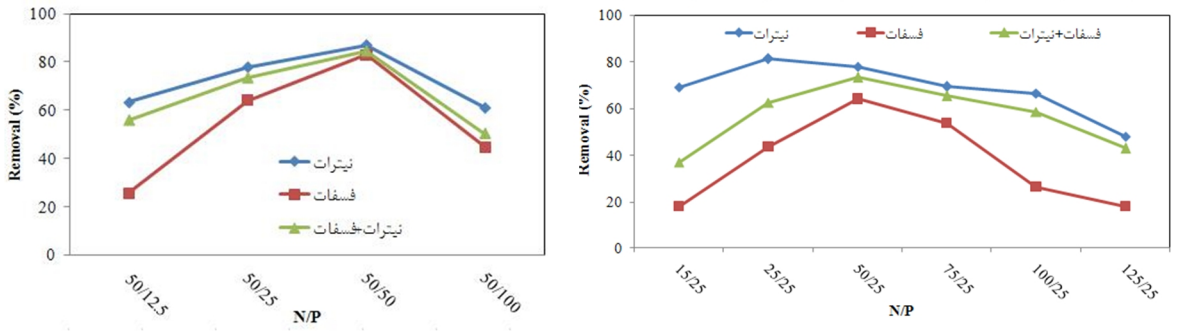
۳-۲- تعیین نسبت بهینه بر مبنای بیشینه راندمان

شکل ۴الف بیان‌گر درصد راندمان حذف نیترات و فسفات در سطوح مختلف نیترات، و سطح ثابت فسفات توسط گیاه پامپاس‌گراس در زمان ماند ۸ روز است.

در مجموع راندمان حذف نیترات+ فسفات، در pH تقریباً خنثی با زمان ماند ۸ روز، در غلظت ثابت فسفات ۲۵ mg/L و غلظت‌های متفاوت نیترات ۱۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵ میلی‌گرم در لیتر با استفاده از گیاه پامپاس‌گراس در نسبت‌های ۰/۶، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به‌ترتیب ۳۷/۱، ۶۲/۴، ۷۳/۳۰، ۶۵/۴۵، ۵۸/۶ و ۴۲/۹ درصد به دست آمد. تحلیل نتایج با استفاده از روش آزمون t نشان داد که میزان راندمان حذف مجموع آلاینده‌ها در نسبت نیترات به فسفات ۲= (۵۰:۲۵) در سطح خطای ۵ درصد تفاوت معناداری با سایر نتایج دارد. بنابراین در بین سطوح مختلف نیترات در حضور سطح ثابت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر فسفات، سطح ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات به‌عنوان نسبت با راندمان مجموع بالاتر در قیاس با سایر نسبت‌ها به دست آمد.

در ادامه آزمایشات، میزان راندمان حذف نیترات و فسفات در محلول‌های با غلظت ثابت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات و سطوح متفاوت فسفات در زمان ماند ۸ روز اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۴ب ارائه شده است.

در مجموع راندمان حذف نیترات+ فسفات در pH تقریباً خنثی با زمان ماند ۸ روز، در غلظت ثابت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات و غلظت‌های متفاوت ۱۰۰، ۵۰، ۲۵ و ۱۲/۵ میلی گرم در لیتر فسفات (نسبت‌های ۰/۵، ۱، ۲ و ۴) با استفاده از گیاه پامپاس‌گراس به‌ترتیب ۵۰/۱۷، ۸۴/۴۵، ۷۳/۳ و ۵۵/۷۶ درصد به دست آمد. راندمان حذف مجموع آلاینده‌ها در تیمار با نسبت نیترات به فسفات برابر ۱، در مقایسه با سایر تیمارها، در سطح خطای ۵ درصد دارای تفاوت معناداری بود و درنتیجه نسبت ۱= (۵۰:۵۰) با راندمان حذف مجموع نیترات+ فسفات به میزان ۸۴/۴۵ درصد به‌عنوان نسبت بهینه برمبنای بیشینه راندمان حذف در گیاه پامپاس‌گراس انتخاب شد. این نتایج نشان داد که با تغییر غلظت فسفات تا سطح غلظت نیترات و ایجاد محلولی با ترکیب ایده‌آل گیاه، میزان راندمان حذف دو



(ب) (الف)

شکل ۴- راندمان حذف در گیاه پامپاس‌گراس: الف) در سطوح مختلف نیترات و سطح ثابت فسفات؛ ب) در سطح ثابت نیترات و سطوح مختلف فسفات

آلاینده به‌صورت توامان افزایش می‌یابد. نسبت‌های برابر نیترات و فسفات در بسیاری از انواع کودها، از جمله کود کامل می‌تواند تأییدی بر نتایج تحقیق در این مرحله باشد.

آزمایشات مشابه قبل برای گیاه بامبو انجام شد. شکل ۵الف بیان‌گر درصد راندمان حذف نیترات و فسفات در سطوح مختلف نیترات و سطح ثابت فسفات توسط گیاه بامبو در زمان ماند ۸ روز است.

در مجموع راندمان حذف نیترات+ فسفات، در pH تقریباً خنثی با زمان ماند ۸ روز، در غلظت ثابت فسفات ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت‌های متفاوت نیترات ۱۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ میلی‌گرم در لیتر (نسبت‌های ۰/۶، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵) با استفاده از گیاه بامبو به‌ترتیب ۲۷، ۵۴/۳۳، ۴۹/۸، ۴۴/۳۲، ۳۹/۸۹ و ۲۹ درصد به دست آمد. تحلیل نتایج حاصله با استفاده از آزمون t نشان داد که میزان راندمان حذف مجموع آلاینده‌ها در نسبت نیترات به فسفات ۱=(۲۵:۲۵) در سطح خطای ۵ درصد تفاوت معناداری با سایر نتایج دارد. بنابراین در بین سطوح مختلف نیترات در حضور سطح ثابت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر فسفات و سطح ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نیترات با راندمان مجموع بالاتر در قیاس با سایر نسبت‌ها به دست آمد.

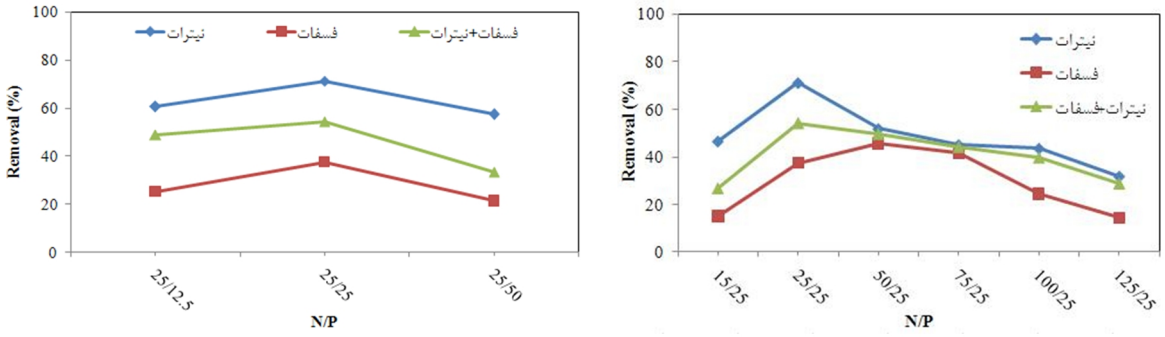
در ادامه میزان راندمان حذف نیترات و فسفات در محلول‌های با غلظت ثابت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نیترات و سطوح متفاوت فسفات در زمان ماند ۸ روز اندازه‌گیری شد. شکل ۵ب بیان‌گر میزان حذف آلاینده‌ها در این میزان راندمان حذف نیترات+ فسفات در pH تقریباً خنثی با زمان ماند ۸ روز، در غلظت ثابت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر فسفات و غلظت‌های نیترات متفاوت ۵۰، ۲۵ و ۱۲/۵ میلی گرم در لیتر (نسبت‌های ۰/۵، ۱ و ۲) با استفاده از نسبت‌هاست.

گیاه بامبو به‌ترتیب ۳۳/۲۵، ۵۴/۳۳ و ۴۸/۶۸ درصد به دست آمد. راندمان حذف مجموع آلاینده‌ها در تیمار با نسبت نیترات به فسفات برابر ۱، در مقایسه با سایر تیمارها در سطح خطای ۵ درصد دارای تفاوت معناداری بود و در نتیجه نسبت ۱=(۲۵:۲۵) با راندمان حذف نیترات+ فسفات به میزان ۵۴/۳۳ درصد به‌عنوان نسبت بهینه برمبنای بیشینه راندمان حذف در گیاه بامبو به دست آمد.

۳-۳- نسبت بهینه بر مبنای حداکثر جذب گیاه

شکل‌های ۶الف و ۶ب به‌ترتیب بیان‌گر میزان جذب نیترات و فسفات توسط گیاه پامپاس‌گراس و بامبو در سطوح مختلف نیترات و سطح ثابت فسفات در زمان ماند ۸ روز است. طبق نتایج حاصله در مجموع میزان جذب جرمی نیترات+ فسفات در یک لیتر محلول، در نسبت‌های (۱۵:۲۵)، (۲۵:۲۵)، (۵۰:۲۵)، (۷۵:۲۵)، (۱۰۰:۲۵) و (۱۲۵:۲۵) با استفاده از گیاه پامپاس‌گراس به‌ترتیب ۱۴/۸۵، ۳۱/۲، ۵۴/۹۵، ۶۵/۴۵، ۷۳/۲۵ و ۶۴/۴۳ میلی‌گرم و با استفاده از گیاه بامبو به‌ترتیب ۱۰/۸۳، ۲۷/۱۹، ۳۷/۳۶، ۴۴/۳۳، ۴۹/۸۶، ۳۵/۶۴ میلی‌گرم به دست آمد.

نتایج تحلیل آزمون t نشان داد که در تیمارهای هر دو گیاه، میزان جذب مجموع، در نسبت نیترات به فسفات معادل (۱۰۰:۲۵) در سطح خطای ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با سایر نسبت‌ها دارد. بنابراین بیشترین میزان جذب در تیمار با نسبت (۱۰۰:۲۵) اتفاق افتاد. در ادامه آزمایشات، میزان جذب جرمی نیترات و فسفات در محلول‌های با غلظت ثابت ۱۰۰میلی‌گرم بر لیتر نیترات و سطوح متفاوت فسفات در زمان ماند ۸ روز اندازه‌گیری شد. شکل‌های ۷الف و ۷ب به‌ترتیب بیان‌گر میزان جذب آلاینده‌ها توسط تیمارهای پامپاس‌گراس و بامبو در این



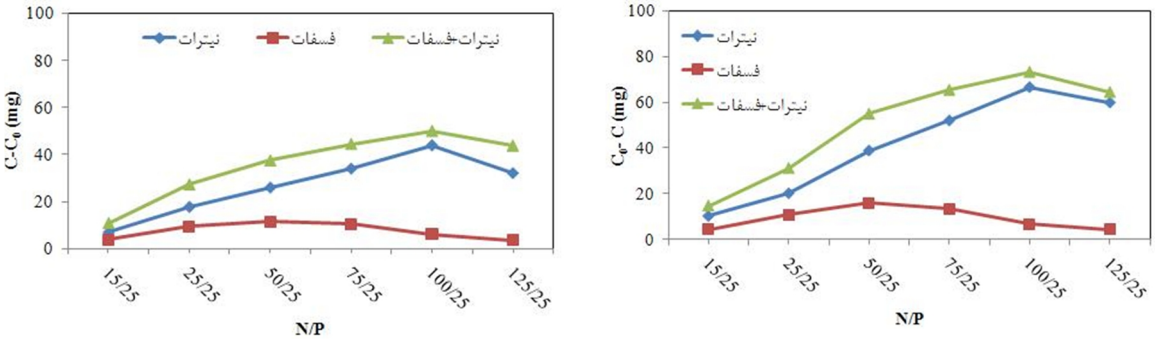
(ب) (الف)

شکل ۵- راندمان حذف در گیاه بامبو: الف) در سطوح مختلف نیترات و در سطح ثابت فسفات؛ ب) در سطح ثابت نیترات و در سطوح مختلف فسفات

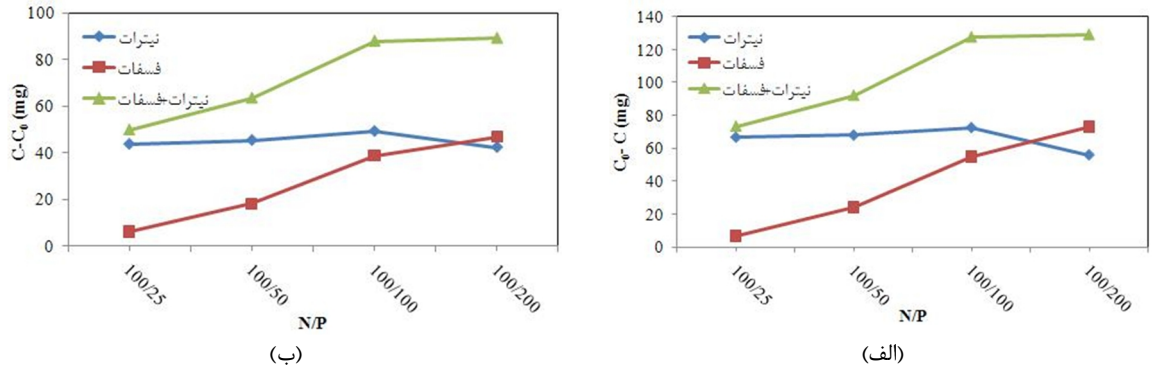
نسبت‌هاست. میزان جذب نیترات + فسفات در یک لیتر محلول، در pH تقریباً خنثی با زمان ماند ۸ روز، در غلظت ثابت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات و غلظت‌های متفاوت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر فسفات (نسبت‌های ۴، ۲، ۱ و ۰/۵) با استفاده از گیاه پامپاس‌گراس به‌ترتیب ۷۳/۲۵، ۹۲، ۱۲۷/۵ و ۱۲۸/۹ میلی‌گرم و با استفاده از گیاه بامبو به‌ترتیب ۴۹/۸۶، ۶۳/۴۵، ۸۷/۹ و ۸۹/۱۵ میلی گرم به دست آمد.

هر دو گونه گیاهی انتخاب شد.

در انتهای آزمایشات برای تعیین میزان جذب آلاینده‌ها در نسبت بهینه برحسب وزن خشک گیاه (۱۰۰:۱۰۰)، نسبت به تعیین وزن خشک گیاهان موجود در این پایلوت اقدام، و اندام هوایی و اندام زیر آب به‌صورت جداگانه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد میزان جذب جرمی نیترات و فسفات در پامپاس‌گراس به‌ترتیب ۱/۵۷ و ۱/۱۹ گرم و در بامبو ۱/۰۲ و ۰/۸ گرم به ازای هر کیلوگرم



شکل ۶- جرم جذبی در یک لیتر محلول توسط گیاه: الف) پامپاس‌گراس؛ ب) بامبو در سطوح مختلف نیترات و سطح ثابت فسفات



شکل ۷- جرم جذبی در یک لیتر محلول توسط گیاه: الف) پامپاس‌گراس؛ ب) بامبو در سطوح مختلف فسفات و در سطح ثابت نیترات

طبق نتایج آنالیز آزمون t، در تیمارهای هر دو گیاه، میزان جذب در نسبت‌های (۱۰۰:۱۰۰) و (۱۰۰:۲۰۰) در سطح خطای ۵ درصد با تفاوت معنی‌داری در قیاس با سایر نسبت‌ها در سطح بالاتری قرار داشت، اما بین این دو نسبت تفاوت معناداری در سطح خطای ۵ درصد وجود نداشت. در این میان نسبت (۱۰۰:۱۰۰) به دلیل این که غلظت خروجی نیترات و فسفات آن تفاوت کم‌تری با استانداردهای موجود در قیاس با غلظت خروجی نسبت (۱۰۰:۲۰۰) داشت، به‌عنوان نسبت بهینه جذب جرمی در وزن خشک گیاه است. همچنین میزان جذب جرمی مجموع نیترات و فسفات در تیمار پامپاس‌گراس به میزان ۲/۷۶ و در تیمار بامبو به میزان ۱/۸۲ گرم به‌ازای هر کیلوگرم وزن خشک گیاه، بیان‌گر حداکثر ظرفیت سایت‌های گیاه برای تجمع آلاینده‌های نیترات و فسفات است.

۳-٤- تغییرات pH

کیفیت مطلوب پایدار آب برای کشت هیدروپونیک ضروری است. pH یکی از عوامل مهم با تأثیرگذاری بالا در فرایند گیاه‌پالایی است. در طول آزمایشات میزان pH اولیه (قبل

از قرارگیری گیاه داخل ظرف) و ثانویه (در انتهای زمان ماند) اندازه‌گیری و ثبت شد. طبق نتایج حاصله در کلیه موارد، میزان pH ثانویه نسبت به اولیه افزایش داشت. در محلول‌های اولیه میزان pH تقریباً برابر و در محدوده ۶/۲ تا ۶/۵ بود، در حالی که میزان pH ثانویه در بعضی از غلظت‌ها تا ۷ افزایش می‌یافت. در نسبت‌های با میزان جرمی جذب مواد غذایی بالاتر، تغییرات pH بالاتری در مقایسه با سایر نسبت‌ها مشاهده شد که دلیل اصلی آن، مصرف مواد غذایی توسط گیاه و نیز ترشحات آلکالوئیدی و استرولی از ریشه‌ها بود.

۳-۵- مقایسه نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات

در جدول ۱ نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج سایر تحقیقات مقایسه شده است. البته در مقایسه باید متغیرهای اثرگذار در روش گیاه‌پالایی از جمله نوع گیاه، زمان ماند، غلظت محلول مورد پالایش، وزن خشک گیاه، pH، سطح زیر کشت و نوع آلاینده لحاظ شود، در غیر این‌صورت مقایسه بین دو گیاه نمی‌تواند صحیح باشد.

جدول ۱- مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات

آلاینده	گیاه	زمان	میزان حذف	مرجع
نیتروژن و فسفر	کالادیوم و اسفناج	۱۲روز	۸۱ و۵۲ درصد	[۱۸]
نیتروژن و فسفر	*Pistia stratiotes*	۱ سال	۱۷ و ۳ گرم در هر کیلوگرم وزن خشک گیاه	[۱۹]
فسفر	نی، بامبو، نخل مرداب	۲ روز	۵۹، ۴۵/۵، ۳۰/۶۵ درصد	[۱۷]
نیتروژن	*Water Hyacinth*	۴ هفته	۶۰ تا ۸۵ درصد	[۱۱]
COD، TN، TP	سنبل آبی	۳۰ روز	۶۴/۴۴ ، ۲۱/۷۸ و ۲۳/۰۲ درصد	[۱۲]
نیترات + فسفات	پامپاس گراس	۸ روز	۸۴/۴۵ درصد براساس راندمان ۲/۷۶ گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه	نتایج این تحقیق
	بامبو		۵۴/۳۳ درصد براساس راندمان ۱/۸۲ گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه	

٤- نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق نشان داد که دو گیاه منتخب پامپاس‌گراس و بامبو ظرفیت قابل قبولی برای حذف مواد مغذی نیترات و فسفات دارند و می‌توانند به‌عنوان یکی از گیاهان مورد استفاده در روش گیاه‌پالایی استفاده شوند؛ اگرچه هم در میزان راندمان حذف و هم جذب مواد مغذی نیترات و فسفات، گیاه پامپاس‌گراس نسبت به بامبو در مرتبه بالاتری قرار دارد.

تشکر و قدردانی

از مساعدت و همکاری اداره کل محیط‌زیست استان اصفهان در اجرای این پژوهش، به‌ویژه مدیریت محترم آقای مهندس احمدرضا لاریجان‌زاده و مسئول محترم واحد آزمایشگاه خانم مهندس حمیرا صفی‌قلی، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

[1] Huang W, Wang S, Zhu Z, Li L, Yao X, Rudolph V, Haghseresht F. Phosphate removal from wastewater using red mud, Journal of Hazardous Materials; **2008**; **158**(1): 35-42.

[2] Frost P C, Stelzer R S, Lamberti G A, Elser J J. Ecological stoichiometry of trophic interactions in the benthos: understanding the role of C: N: P ratios in lentic and lotic habitats; J. N. Am. Benthol. Soc.; **2002**; **21**(4): 515-528.

[3] www.epa.gov

[4] Veli S, Tuba O, Anatoly D. Treatment of municipal solid wastes leachate by means of chemical- and electro-coagulation, Separation and Purification Technology, **2008**; **61** (1): 82-88.

[5] Metcalf and Eddy. Wastewater engineering: Treatment and reuse, New York: McGraw-Hill; 2005.

[6] Sabah E, Majdan M. Removal of phosphorus from vegetable oil by acid-activated sepiolite, Journal of Food Engineering; **2009**, **91** (3): 423-427.

205-211

[7] Lu S G, Bai S Q, Zhu L, Shan H D. Removal mechanism of phosphate from aqueous solution by fly ash, Journal of Hazardous Materials; **2009**; **161** (1): 95-101.

[8] Taghizadeh M, Kafi M. Introduction to phytoremediation technology and green space purified plant, Municipalities Magazine; **2008**; **27**: 308-317.

[9] Jayaweera M W, Kasturiarachchi J C. Removal of nitrogen and phosphorus from industrial astewaters by phytoremediation using water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (*Mart.*) *Solms*), Water Sci. Technol.; **2004**; **50** (6):217-25.

[10] Escutia-Lara Y, Gómez Romero M, Lindig Cisneros R. Nitrogen and phosphorus effect on *Typha domingensis Presl.* Rhizome growth in a matrix of *Schoenoplectus americanus* (Pers.) Volkart ex Schinz and Keller, Aquatic Botany; **2009**; **90** (1): 74-77.

[11] Fox L J, Struik P C, Appleton B L, Rule J H. Nitrogen Phytoremediation by *Water Hyacinth* (*Eichhornia crassipes* (*Mart.*) *Solms*), Water, Air, Soil Pollution; **2008**; **194**:199-207.

[12] Lu J, Fu Z, Yin Z. Performance of a water hyacinth (Eichhornia crassipes) system in the treatment of wastewater from a duck farm and the effects of using water hyacinth as duck feed, Journal of Environmental Sciences; **2008**; **20** (5): 513-519.

[13] Wu Y, Chung A, Tam N F Y, Pi N, Wong M H. Constructed mangrove wetland as secondary treatment system for municipal wastewater, J. of Ecological Engineering; **2008**; **34** (2): 137-146.

[14] Arfi Ve´ronique, Bagoudoua, D, Korboulewskyb N, Bois G. Initial efficiency of a bamboo grove–based treatment system for winery wastewater, Desalination; **2009**; **247**: 70-78.

[15] www.bambooword.com

[16] Fallahi F. Lab Scale Study of Nitrate Removal by Phytoremediation, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University; **2009**. **[In Persian]**

[17] Rezamand Sh. Comparison of efficiency phosphorus removal in *reed*, *bamboo* and *umbrella plant* with phytoremediation, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University; **2009**. **[In Persian]**

[18] Zul Hilmi S, Ramlah M T, Dzaraini K, Norazah A R. Phytoremediation of nutrient contaminants from golf courses surface water, UMTAS 2011-Empowering Science, Technology and Innovation towards a Better Tomorrow; **2011**:

[19] Lu Q, He Z L, Graetz D A, Stoffella P J, Yang X. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic storm waters using water lettuce (Pistia stratiotes L.), Environ. Sci. Pollut. Res. Int.; **2010**; **17**(1): 84-96.