

بررسی قابلیت گیاه پالایی در حذف سولفات از محیط‌های آبی

میلاذ تفضلی^۱

حسین گنجی‌دوست^۲

بینا آیتی^۳

(دریافت ۹۱/۴/۲۱)

(پذیرش ۹۲/۲/۱۹)

چکیده

گیاه پالایی روشی کم هزینه در تصفیه آلاینده‌ها، به دور از پیچیدگی‌های بهره‌برداری با مصرف انرژی پایین و عدم نیاز به دفع لجن می‌باشد. در این پژوهش از کشت هیدروپونیک برای بررسی و ارزیابی عملکرد دو گونه گیاه مردابی شامل بامبو و پامپاس گراس در حذف سولفات مهم ترین ترکیب گوگردی موجود در پساب خروجی استفاده شد. در این راستا ابتدا گونه‌های گیاهی در دو دوره آزمایش زمان ماند ارزیابی شده و پس از مشخص شدن ۷ روز به عنوان زمان ماند بهینه، آزمایش‌های اصلی به منظور بررسی رفتار دو گیاه از نقطه نظر راندمان حذف و جذب جرمی سولفات انجام گرفت. همچنین آنالیز واریانس و آزمون T-Test در سطح معنی‌داری ۵ درصد صورت گرفت. طبق نتایج حاصل، گیاه پامپاس گراس در تمامی غلظت‌های مورد آزمایش ۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب دارای راندمان ۴۴، ۳۶، ۳۴/۲۲، ۳۰/۵۵، ۱۵/۹۳، ۹/۷۲، ۷/۷۷ و ۴/۴۴ درصد بود که نسبت به گیاه بامبو با راندمان ۴۴، ۳۵/۳۳، ۳۰/۶۷، ۲۶/۶۷، ۱۲/۵۹، ۵/۵۶، ۴/۴۵ و ۲/۲۲ درصد عملکرد بهتری نشان داد.

واژه‌های کلیدی: کشت هیدروپونیک، گیاه پالایی، پامپاس گراس، بامبو، سولفات

Study of Phytoremediation Capability in Sulfate Removal from Water

M. Tafazzoli¹

H. Ganjidoust²

B. Ayati³

(Received July 11, 2012 Accepted May 9, 2013)

Abstract

Phytoremediation is known as a pollutants method with low cost, without operational complexity, with low energy consumption and no need for sludge disposal. In this study, hydroponic cultivation was chosen for estimation of sulfate removal as a significant sulfur compound in effluents on two fenny plants: pampas grass and bamboo. In this case, the plants were examined under two different retention times and after determining the optimum time (7 days), the main experiments were done for evaluating the plants removal efficiency and sulfate mass absorbance by plants. For better analysis, T-Test and ANOVA with significant influence ($p < 0.05\%$) were also done. Finally, the removal efficiency in pampas grass for all concentrations of 50, 200, 300, 600, 900, 1200, 1500 and 3000 mg/L were 44, 36, 34.22, 30.55, 15.93, 9.72, 7.77 and 4.44 percent, respectively, which were up to two times higher for the bamboos.

Keywords: Hydroponic, Phytoremediation, Pampas Grass, Bamboo, Sulfate.

1. M.Sc. Student of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, Tehran
2. Prof. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 82883332 h-ganjji@modares.ac.ir
3. Assoc. Prof. of Civil and Environmental, Eng., Tarbiat Modares University, Tehran

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
- ۲- استاد گروه مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (نویسنده مسئول) ۸۲۸۸۳۳۳۲ (+۲۱) h-ganjji@modares.ac.ir
- ۳- دانشیار گروه مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۱- مقدمه

از جمله مسائل جدی که در سالهای اخیر به آن توجه گردیده، نقش گوگرد و ترکیبات مختلف آن به عنوان بخشی از آلاینده‌های موجود در پساب‌های خروجی است. گزارشهای در دسترس حاکی از عبور سولفات از طریق منافذ خاکی و آلوده‌سازی منابع آب زیرزمینی در کشور می‌باشد که از جمله می‌توان به غلظت سولفات موجود در آب چاههای مسیر رودخانه زاینده‌رود اشاره کرد به طوری که در بالادست در حدود ۵۰ میلی‌گرم در لیتر است و با حرکت به سمت پایین، این مقادیر افزایش یافته تا در نهایت در چاههای پایین‌دست بیشتر از حد مجاز (در حدود ۲۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر) می‌شود [۱]. گوگرد یکی از عناصر مهم طبیعت محسوب شده و مقدار آن در خاک از ۰/۰۰۲ تا ۵ درصد متغیر (به طور متوسط بین ۰/۰۱ تا ۰/۵ درصد) بوده و به طور طبیعی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد آن به شکل سولفات است.

با وجود نقش مهم این عنصر در طبیعت، گوگرد اثرات سوئی نیز دارد. برای مثال مقدار کمی سولفید هیدروژن می‌تواند متابولیسم بدن را دگرگون کند. همچنین مقادیر بیشتر آن می‌تواند به سرعت باعث مرگ از راه فلج تنفسی شود. سولفید هیدروژن با سرعت حس بویایی را از بین می‌برد. دی‌اکسید گوگرد آلوده‌کننده مهم جوی می‌باشد. غلظت‌های بالای سولفات موجب لینت مزاج و کاهش آب بدن می‌شود. نمکهای سولفات در روده جذب شده و سپس با غلظتی تا ۱۰۰۰ یا ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر (غلظتهای اسهال آور) از طریق ادرار دفع می‌شود.

سولفات در کارخانجات تولید فیلم و عکس، تولید باتری‌ها و اتومبیل کاربرد دارد و در جریان تولید محصول وارد پساب خروجی می‌شود. همچنین از زهکش معادن، مقدار قابل توجهی سولفات از طریق اکسیداسیون پیریت وارد آب می‌شود. در صنایع و واحدهای تولید الکل نیز مقادیر قابل توجهی از سولفات در حدود ۴۰۰۰-۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر شناسایی شده که با مقادیر استاندارد تفاوت شایانی دارد [۲ و ۳].

در رابطه با استاندارد تخلیه به منابع آبی سطحی و چاه جاذب، میزان سولفات فاضلاب خروجی نباید از ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشتر باشد و در صورت تخلیه برای مصارف کشاورزی و آبیاری این میزان حداکثر می‌تواند ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر باشد. همچنین در مصارف صنعتی نیز بسته به رده‌بندی این مقدار نهایتاً به ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر محدود می‌شود. این مقدار در آب آشامیدنی ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر و حداکثر مجاز آن ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد [۴ و ۵].

روشهای مؤثر در تصفیه پساب‌های حاوی یون سولفات به سه دسته شیمیایی، غشایی و بیولوژیکی تقسیم می‌شوند:

روشهای شیمیایی شامل استفاده از آهک/سنگ آهک، نمک‌های باریم، روش ترکیبی آهک و سولفات آلومینیوم (SAVMIN) و روش ترکیبی آهک و لخته‌سازهای انحصاری دیگر (CESR) و روشهای غشایی و یونی شامل استفاده از اسمز معکوس (RO)، غشاهای الکترودیالیزی (ED)، تبادل یونی (GYP-IX) و غشاهای فیزیکی اسمز معکوس (SPARRO) و نیز روشهای بیولوژیکی شامل استفاده از انواع بیوراکتورها، تالاب‌های مصنوعی، روش ترکیبی آهک و تصفیه خاک^۱ و دیواره‌های نفوذپذیر زیرزمینی^۲. در کل مشکلاتی نظیر تولید لجن و گران بودن مواد اولیه (در برخی موارد)، گرفتگی و عمر کوتاه غشاهای و عدم کاربری (در برخی موارد) در روشهای شیمیایی، غشایی و یونی منجر به کاربرد روشهای بیولوژیکی به دلیل سازگاری با محیط زیست، امکان بازیافت برخی مواد در صنعت، عدم تولید لجن فراوان و غیره در چند دهه اخیر شده است [۶].

از جمله روشهای مطلوب بیولوژیکی جهت بهره‌گیری در حذف آلاینده‌ها استفاده از گیاهان و به بیان دیگر گیاه پالایی است. در واقع در گیاه پالایی استفاده از پتانسیل‌های فیزیولوژیکی گیاهان سبز (انواع علف‌های هرز، گیاهان آبی و مردابی، گیاهان زراعی و حتی درختان) در کنترل و جذب آلاینده‌های آلی و معدنی به صورت پالایش سبز در کنار سایر روشهای تصفیه فاضلاب مطرح می‌شود. به عبارت دیگر گیاه پالایی عبارت است از تکنیک استفاده از گیاهان به منظور تمیز کردن یا کنترل گونه‌های آلودگی اعم از فلزات، حشره‌کش‌ها، روغن‌ها و غیره [۷].

یکی از ارکان مهم در زمینه گیاه پالایی، فراهم آوردن شرایط محیطی و بستری مناسب برای کشت و پرورش گیاه است. هیدروپونیک یکی از این روشهاست که از ترکیب دو واژه یونانی «هایدرو» به معنای آب و «پونوس» به معنای کار و تلاش، ساخته شده است که اولین بار توسط گریک به کار گرفته شد [۸]. در حالت کلی مکانیسم‌های مؤثر در حذف آلاینده‌ها توسط گیاه را به ۶ دسته تجزیه گیاهی، استخراج گیاهی، تجزیه ریشه‌ای، فیلتراسیون ریشه‌ای، تبخیر گیاهی و تثبیت گیاهی طبقه‌بندی می‌کنند [۷].

در این راستا مطالعات متعددی بر روی حذف آلاینده‌های مختلف انجام شده که در ادامه به چند مورد آن اشاره می‌شود:

قادری تحقیقی بر روی تصفیه فاضلاب شهری تهران توسط گیاه نی (فراگماتیس استرالیس) انجام داد. وی گیاه را در سه دوره ۴۵ روزه با سه میزان مختلف دبی ۵، ۱۰ و ۲۰ لیتر بر دقیقه مورد آزمایش قرار داد. نتایج حاصل بیانگر کاهش BOD، COD و TSS اولیه به مقادیر ۱۹، ۴۰ و ۳۶ میلی‌گرم در لیتر بود [۹].

¹ Alkaline Systems

² Permeable Barriers

خاندار و همکاران در سال ۲۰۱۱، پژوهشی بر روی دو فاضلاب خروجی صنایع نساجی بوسيله گیاه آستر *Aster amellus* Linn^۱ انجام دادند که نتایج حاکی از حذف COD به میزان ۶۰ و ۷۵ درصد؛ BOD ۷۵ و ۴۸ درصد و TOC ۵۴ و ۶۹ درصد بود [۱۰].

در تحقیقی نقش گیاه لویی در جذب رنگ کنگو قرمز در محیط آبی با مطالعه اثر پارامترهایی مانند تعداد ریشه‌ها، مدت زمان تماس، pH و دما در سیستم ناپیوسته بررسی شد. میزان حذف با افزایش تعداد ریشه‌ها افزایش یافت ولی با افزایش دما کاهش نشان داد. در نهایت بیشترین میزان حذف در دماهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس برابر ۳۸/۷۹، ۳۴/۵۹ و ۳۰/۶۱ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد [۱۱].

در مطالعه سایاوان و همکاران، اثر و نقش گوگرد (به صورت سولفات) در میزان تجمع دو عنصر سلنیوم و مولیبدن به همراه اثر متقابل این دو عنصر بر نحوه انتقال و جذب سولفات در گیاه *براسیکا جایکا*^۲ انجام شد. برای انجام آزمایش اثر و نقش سولفات (به صورت نمک سولفات متیزیم) بر میزان تجمع دو عنصر فوق ۶ دسته آزمایش در غلظت ۲۰۰ میکرومولار سولفات (+S)، بدون سولفات (-S)، و مولیبدن با سولفات و بدون سولفات در غلظت ۲۰۰ میکرومولار از هر دو سولفات و بدون سولفات در غلظت ۲۰۰ میکرومولار از هر دو مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای ارزیابی اثر دو عنصر سلنیوم و مولیبدن بر سولفات دو دسته آزمایش با ۲۰۰ میکرومولار سولفات اضافی (+S+S) و بدون سولفات اضافی (-S-S) در مدت زمان ۲۴ ساعت انجام شد. آنچه به عنوان نتایج کار گزارش شد نشان‌دهنده اثر مهم سولفات و نقش بسزای این عنصر به عنوان یک نوترینت و محدود کننده اثرات منفی عناصری چون مولیبدن و سلنیوم بود، به طوری که در گونه‌های فاقد سولفات اثرات کاهشی رشد و جذب سولفات پس از ۱۰ دقیقه نمایان می‌شد [۱۲].

ترکیبات گوگردی بالاخص نوع سولفات آن، نقش بسزایی در رشد و نمو ریشه و برگ‌های گیاه دارد به طوری که یکی از عوامل تولید سیستئین، متونین و آنزیم‌های تولیدکننده پروتئین در گیاه است [۱۳]. به همین دلیل و نیز به جهت اهمیت سولفات به عنوان یک آلاینده صنعتی، هدف از این تحقیق بررسی قابلیت گونه‌های گیاهی مردابی یا حاشیه رودخانه‌ای در حذف سولفات انتخاب شد. لذا در این تحقیق بامبو و پامپاس گراس به عنوان گونه‌های موجود انتخاب شد تا اثر سولفات بر گیاه به همراه میزان کاهش آلاینده در محیط هیدروپونیک بررسی گردد. در عمل این تحقیق پوششی است بر مطالعات قبلی انجام گرفته با در نظر گرفتن محیط هیدروپونیک

و گیاهانی که تاکنون مورد آزمایش قرار نگرفته‌اند. پامپاس گراس یا به اختصار پامپاس که جزء تیره گندمیان و خانواده *Poaceae* است، جزء گونه‌های مقاوم، پربزرگ و همیشه موجود می‌باشد که در ایران در کنار اکثر نوارهای ساحلی و دشت‌ها و به صورت پراکنده در شهرها قابل رویت است [۱۴ و ۱۵]. از خصوصیات این گیاه می‌توان به فراوان بودن آن در مراتع و اماکن دارای تالاب اشاره کرد. همچنین در خصوص جذب مواد مغذی و آب از محیط و نیز نور خورشید در مقایسه با سایر گونه‌های موجود در منطقه، از پتانسیل بسیار بالایی برخوردار است. لذا از لحاظ تنوع اکولوژیکی به عنوان یک گونه نامطلوب شناخته شده، ولی از لحاظ جذب مواد موجود در محیط رشد و مقاوم بودن نسبت به شرایط، گونه‌ای بسیار مطلوب می‌باشد که می‌توان در موارد مربوط به حذف آلاینده‌ها از آن استفاده نمود. از دیگر خصوصیات این گیاه قابلیت تحمل در سرمای زمستان، تابش شدید و گرمای تابستان و کمبود غذای نسبی می‌باشد [۱۶].

بامبوها از خانواده علوفه هستند که دارای گونه‌های بسیاری در جهان می‌باشند. بامبو یکی از سریع‌الرشدترین گیاهان جهان است که این رشد بی‌نظیر مرهون ریزوم است. مقدار آب باید تا اندازه‌ای باشد که تقریباً تا ۲/۵ سانتی‌متر بالاتر از انتهای پایینی ساقه قرار گیرد. این گیاه نور فراوان اما غیر مستقیم آفتاب و دمای ۱۸ تا ۲۲ درجه سلسیوس را ترجیح می‌دهد. بامبو که در زبان فارسی به نی خیزران شهرت دارد گیاهی است که در دامنه کوه‌ها و تپه‌هایی که دارای رطوبت ۶۵ تا ۹۰ درصد باشد، روئیده یا کشت می‌شود. میزان رطوبت، حرارت موجود در منطقه و نوع خاک، تعیین‌کننده کیفیت و مرغوبیت بامبو بوده و هرچه میزان رطوبت و حرارت بیشتر باشد، کیفیت محصول نیز بهتر خواهد بود. گیاه بامبو که تاکنون بیش از ۶۶۲ نوع آن شناخته شده دارای قطر و ضخامت متفاوت است و در ایران می‌توان لیالستان لاهیجان علی‌آباد (در فاصله سخت سر و تنکابن)، قاسم‌آباد در رودسر و تقریباً بیشتر نقاط شمال کشور را در زمره مساعدترین مناطق رویش بامبو به حساب آورد. بامبو به دلیل سهولت تکثیر، نیروی زیاد تجدید حیات، رشد خیلی سریع، بلوغ زودرس، دوره بهره‌برداری کوتاه مدت، شکل زیبا، استحکام توأم با سبکی، مستقیم بودن، سختی ساقه و سهولت کارکردن با آن دارای مصارف متنوع اقتصادی است که از آن جمله احیای منابع طبیعی، استفاده در صنایع چوب و فرآورده‌های چوبی، عمرانی و ساختمانی، داروسازی، عطرسازی، ابریشم مصنوعی و کنسروسازی است [۱۷ و ۱۸].

۲- مواد و روشها

روش مورد مطالعه در این تحقیق توصیفی-تحلیلی بوده که جامعه

¹ *Aster amellus* Linn

² *Brassica juncea*



(الف)



(ب)

شکل ۱- پایلوت‌های مورد آزمایش در محیط هیدروپونیک حاوی گیاه
الف) بامبو ب) پامپاس گراس

حالت اول پس از محلول‌سازی، گیاهان در همان شرایط اولیه حاصل از ساخت محلول (pH=5/9) به مدت ۱۱ روز در پایلوت‌ها قرار داده شدند که روزانه از این محلولها نمونه‌گیری صورت می‌گرفت. برای قرائت میزان سولفات نمونه‌ها در غلظت‌های بالا نیاز به رقیق‌سازی بود که در محدوده غلظت تعیین شده توسط شرکت سازنده معرف‌های سولفات (به شماره کاتالوگ ۶۹-۲۱۰۶۷ در محدوده ۲-۷۰ میلی‌گرم در لیتر) به عمل آمد و در نهایت با جایگذاری نمونه‌ها در دستگاه اسپکتروفوتومتر DR 5000 ساخت شرکت هیچ^۲ (مطابق با روش ۸۰۵۱ استاندارد متد با شماره برنامه ۶۸۰ در طول موج ۴۵۰ نانومتر) میزان غلظت موجود در پایلوت‌ها به صورت روزانه انجام گرفت. علاوه بر این اسیدیته محلول‌ها نیز به طور روزانه توسط دستگاه pH متر مدل sension378 ساخت شرکت هیچ با الکتروود دیجیتالی کنترل می‌شد. در حالت دوم پس از محلول‌سازی، مقداری سود به محلول‌ها اضافه گردید تا شرایط pH خنثی در محدوده ۷ به وجود آید و سپس گیاهان در پایلوت‌ها قرار داده شده و سایر مراحل مانند حالت اول انجام یافت. در نهایت اثر pH بر درصد حذف توسط نرم افزار SPSS ver. 15 به وسیله آنالیز T-Test در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام گرفت که نتایج حاکی از اثر مثبت این عامل برای شروع آزمایش‌های اصلی بود.

² Hach

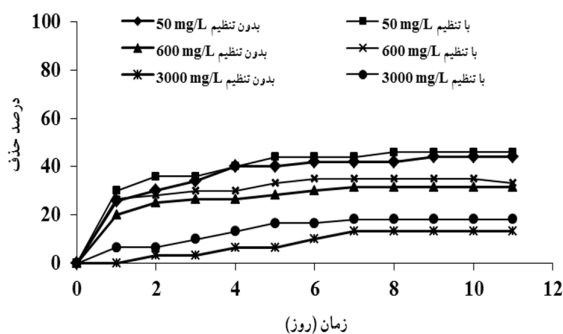
مورد آزمایش به صورت سنتزی و در مقیاس آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. ۸ غلظت مختلف سولفات شامل ۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر که توسط نمک سولفات سدیم ساخت شرکت مرک^۱ به شماره ۱۳۲۱۳ به عنوان نمایندگانی از غلظتهای موجود در آب رودخانه زاینده‌رود برای محلول‌سازی، به همراه دو گیاه مردابی پامپاس گراس و بامبو، مناسب اقلیم آب و هوایی ایران برای مطالعات انتخاب شدند.

به منظور بارزتر شدن اثر سولفات بر گیاهان، در ابتدا گیاهان پامپاس گراس و بامبو به صورت هیدروپونیک (محیط کشت آبی در پایلوت‌های تحت آزمایش به مدت یک ماه) در دمای ۱۹ تا ۲۳ درجه سلسیوس در محیطی که به طور متوسط ۱۲ ساعت زیر تابش غیرمستقیم نور آفتاب قرار داشت، تطابق داده شدند، تا از اثر متقابل خاک بر سولفات کاسته و از طرف دیگر گیاه با شرایط بستری - محیطی مورد مطالعه سازگار شود. همچنین محلول‌ها توسط آب مقطر ساخته شدند تا از اثر متقابل سایر یون‌های موجود در آب بر فعل و انفعالات درون گیاهی بر سولفات کاسته و تنها رفتار سولفات بر گیاه بررسی شود.

به این منظور گیاهان بامبو و پامپاس گراس زیر نظر کارشناسان کشاورزی کشت داده شدند به طوری که در انتها هر شاخه بامبو با وزن متوسط بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ گرم و هر شاخه پامپاس بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ گرم تهیه شدند. سپس از ظروف دایره‌ای شکل به قطر ۴۰ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر برای قرار دادن سه عدد گیاه پامپاس گراس در هر پایلوت به وزن تقریبی ۲۲۰۰-۲۱۰۰ گرم و حجم آب ۱۳/۵ لیتر و ظروف استوانه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر برای استقرار ۶ عدد بامبو به وزن تقریبی ۷۰۰ گرم در حجم ۱/۵ لیتر استفاده شد. به طوری که در هر دو پایلوت سطح آب تمامی ریشه‌های گیاهان را به طور کامل می‌پوشاند (شکل ۱). در ابتدا آزمایش‌هایی برای تعیین زمان ماند بهینه به منظور انجام آزمایش‌های اصلی صورت گرفت. به این منظور سه غلظت ۵۰، ۶۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر سولفات به منظور تعیین زمان ماند مطلوب در حداکثر راندمان حذف سولفات در نظر گرفته شد.

سپس نتایج حاصل از حذف نمودارهایی برحسب زمان رسم شد و در نهایت نزدیک‌ترین زمان ممکن که شیب نمودار به یک ثبات نسبی می‌رسید (تغییرات حذف ناچیز) به عنوان زمان ماند بهینه انتخاب گردید. دلیل انتخاب سه غلظت فوق وجود غلظت‌های دیگر مابین این اعداد بود که در عمل برآوردی منطقی نسبت به زمان ماند مناسب برای تمامی غلظت‌ها می‌داد. در انجام این دسته از آزمایش‌ها نقش قلیائیت نیز در دو حالت بررسی گردید. در

¹ Merck



شکل ۳- تعیین زمان ماند مناسب برای پامپاس گراس در غلظت‌های مختلف سولفات

بالایی، بهترین زمان ماند ۷ روز انتخاب شد. به طور کلی می‌توان مراحل حذف را در هر دو گیاه به سه مرحله تقسیم نمود. در مرحله اول به دلیل قابلیت جذب بالای گیاه، این نرخ سریع بوده که با اشباع شدن نسوج گیاه کند و در نهایت در مرحله سوم به ثبات می‌رسد. این در حالی است که در غلظت بالاتر به دلیل شوک ناشی از آلاینده، نرخ افزایشی جذب با مقداری تأخیر همراه بوده و سپس به ثبات می‌رسد. همچنین در این حالت به دلیل میزان بالاتر آلاینده، دوره افزایش شیب محدودتر می‌شود.

۲-۳- بررسی روند حذف سولفات

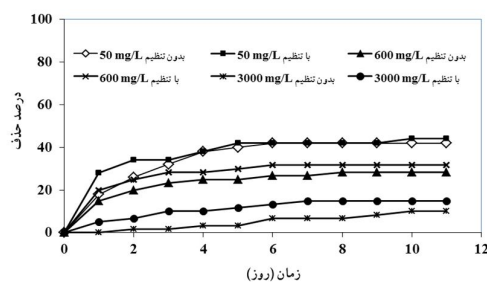
با توجه به اهمیت قلیائیت در روند حذف سولفات ملاحظه می‌شود که با افزایش این پارامتر، میزان راندمان حذف افزایش داشته که این تأثیر در غلظت‌های بالا مشهودتر است. دلیل این افزایش قرار گرفتن گیاه در شرایط مساعدتر و کمک به تولید ترشحات آلکالوئیدی از ریشه گیاه و در نتیجه جذب بیشتر سولفات توسط بافت گیاهی است. همچنین با افزایش غلظت، میزان راندمان حذف نسبت به غلظت‌های پایین‌تر از خود کاهش داشته که دلیل آن اثرگذاری سمیت سولفات در این غلظت‌ها است [۱۹ و ۲۰]. در ادامه نتایج حاصل از آزمایش‌های اصلی هر دو گیاه در جدول ۱

پس از مشخص شدن زمان ماند بهینه، در مرحله انجام آزمایش‌های اصلی از هر ۸ غلظت به منظور بررسی رفتار فیزیولوژیک گیاهان (اندازه‌گیری و ثبت قلیائیت ورودی و خروجی پایلوت‌ها، میزان راندمان حذف و جذب جرمی تجمع یافته در هر دو گیاه به وزن خشک آنها و در نهایت مقایسه عملکرد دو گیاه) استفاده شد. نکته قابل ذکر اینکه برای افزایش دقت، هر آزمایش در ۳ تکرار انجام شد تا میانگین اعداد قرائت شده به عنوان نتایج ارائه شود. همچنین در پایان هر دوره، کلیه گیاهان با آب مقطر شستشو داده شدند و پس از یک روز استراحت، مجدداً برای دوره بعدی استفاده می‌شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین زمان ماند بهینه

شکل‌های ۲ و ۳ بیان‌کننده نتایج حاصل از آزمایش‌های زمان ماند با و بدون تنظیم pH است.



شکل ۲- تعیین زمان ماند مناسب برای بامبو در غلظت‌های مختلف سولفات

همانطور که مشاهده می‌شود، در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر در ابتدا شیب نمودار با نرخ سریع تری رشد داشته و در ادامه به ثبات رسیده اما در غلظت‌های ۶۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر ابتدا این نرخ کندتر بود و در ادامه با جهش نسبی بیشتری نسبت به قبل ادامه یافت و در نهایت ثابت شد. بر اساس نرخ کاهش غلظت‌های

جدول ۱- تغییرات غلظت، pH و راندمان در گیاهان مورد بررسی

| غلظت (mg/L) | پامپاس گراس | | | بامبو | | |
|-------------|-------------|----------|-----------------|----------|----------|-----------------|
| | pH ورودی | pH خروجی | میانگین راندمان | pH ورودی | pH خروجی | میانگین راندمان |
| ۵۰ | ۶/۹۵ | ۶/۹۸ | ۴۴ | ۶/۹۵ | ۷/۲۱ | ۴۴ |
| ۲۰۰ | ۶/۹۳ | ۷/۰۵ | ۳۶ | ۶/۹۳ | ۷/۲۴ | ۳۳/۳۵ |
| ۳۰۰ | ۶/۹۳ | ۷/۱ | ۳۴/۲۲ | ۶/۹۳ | ۷/۲۶ | ۳۰/۶۷ |
| ۶۰۰ | ۶/۹۱ | ۷/۱۶ | ۳۰/۵۵ | ۶/۹۱ | ۷/۲۹ | ۲۶/۶۷ |
| ۹۰۰ | ۶/۹۰ | ۷/۱۹ | ۱۵/۹۳ | ۶/۹۰ | ۷/۳۶ | ۱۲/۵۹ |
| ۱۲۰۰ | ۶/۹۰ | ۷/۲۵ | ۹/۷۲ | ۶/۹۰ | ۷/۴۰ | ۵/۵۶ |
| ۱۵۰۰ | ۶/۹۰ | ۷/۳۱ | ۷/۷۷ | ۶/۹۰ | ۷/۳۱ | ۷/۷۷ |
| ۳۰۰۰ | ۶/۹۰ | ۷/۴۰ | ۴/۴۴ | ۶/۹۰ | ۷/۴۰ | ۴/۴۴ |

آوردن نسبت فوق به نوعی بیانگر قابلیت گیاه در حذف آلاینده طی دوره زمانی مورد نظر است [۲۳]. نتایج حاصل از جذب جمعی سه دوره، وزن خشک و نسبت جذب به وزن خشک گیاه در انتهای آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین جذب جمعی در هر دو گیاه در غلظت ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر اتفاق افتاده که نشان‌دهنده مطلوب بودن غلظت مذکور برای گیاهان است. همچنین با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که گیاه پامپاس گراس نسبت به بامبو از عملکرد بهتری برخوردار بوده که این تفاوت در سه غلظت انتهایی در سطح ۵ درصد قابل ملاحظه است.

۳-۴- مشاهدات فیزیکی

از جمله مشاهدات فیزیکی هر دو گیاه می‌توان به رشد و جوانه زدن ریشه‌های جدید، رشد برگ‌ها و افزایش وزن تر گیاهان در پایان آزمایش‌ها اشاره کرد. هر چند که در غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر آثاری مانند سیاه‌شدگی ریشه‌ها و زرد شدن برگ‌ها در برخی مقاطع گیاه دیده می‌شد که ناشی از اثر سمیت سولفات بر گیاه بود. در شکل‌های ۴ و ۵ تصاویری از پایلوت‌ها و تغییرات آن نشان داده شده است. در جدول ۳ نیز نتایج حاصل از سایر تحقیقات ارائه شده است.

ارائه شده است. همانطور که از مقایسه راندمان حذف بین دو گیاه ملاحظه می‌شود، گیاه پامپاس گراس عملکرد بهتری نسبت به بامبو داشته به طوری که در تمامی غلظت‌های مورد آزمایش دارای راندمان حذف بیشتری می‌باشد (به جز ۵۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر که اولی به دلیل مساعد بودن و دومی به دلیل سمی بودن بیش از حد غلظت برای هر دو گیاه بوده است). یکی از دلایل عمده این عملکرد دارا بودن شرایط بهتر فیزیولوژیک و حجیم بودن ریشه‌های این گیاه نسبت به بامبو است که با فراهم آوردن شرایط قلیائیت منجر به بیشتر شدن ترشحات آکالوئیدی از گیاه می‌شود [۲۱ و ۲۲]. از موارد دیگر در مقایسه بین دو گیاه، کاهش راندمان حذف پس از دوره اول است. این نرخ کاهشی در غلظت‌های پایین‌تر، صفر و یا در حد آن بوده اما در غلظت‌های بالاتر به مراتب بیشتر شده به طوری که نرخ حذف در غلظت‌های ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر پس از دوره اول یا دوم به صفر رسیده و همان‌طور که اشاره شد این کاهش ناشی از پر شدن نسوج گیاهان و سمیت بیش از حد می‌باشد.

۳-۳- بررسی بیومس گیاهی

از فاکتورهای مهم دیگر در مقایسه بین دو گیاه، نسبت جذب سولفات در گیاه به وزن خشک آن است. در عمل دلیل به دست

جدول ۲- نسبت جذب جمعی به وزن خشک گیاه پس از پایان آزمایش‌ها

| غلظت (mg/L) | پامپاس گراس | | بامبو | |
|-------------|-------------|-------------------|-------|-------------------|
| | نسبت | وزن خشک گیاه (gf) | نسبت | وزن خشک گیاه (gr) |
| ۵۰ | ۸۹۱ | ۶۸۲/۸۳ | ۹۹ | ۷۱/۷۲ |
| ۲۰۰ | ۲۹۱۶ | ۷۰۷/۹۴ | ۳۱۸ | ۷۳/۴۴ |
| ۳۰۰ | ۴۰۲۳ | ۷۰۰/۹۲ | ۴۱۴ | ۷۵/۳۳ |
| ۶۰۰ | ۷۴۲۵ | ۷۲۴/۶۸ | ۷۲۰ | ۷۳/۹۶ |
| ۹۰۰ | ۵۶۷۰ | ۷۲۲/۵۲ | ۵۱۰ | ۷۴/۱۲ |
| ۱۲۰۰ | ۴۷۲۵ | ۷۴۱/۶۹ | ۳۰۰ | ۷۲/۱۳ |
| ۱۵۰۰ | ۴۷۲۵ | ۷۳۱/۴۳ | ۳۰۰ | ۷۲/۴۵ |
| ۳۰۰۰ | ۴۷۲۵ | ۷۲۷/۱۱ | ۳۰۰ | ۷۶/۲۲ |



ج



ب



الف

شکل ۴- گیاه پامپاس گراس (الف) ریشه‌های جوانه زده جدید (ب) ریشه‌های سیاه شده غلظت بالا پس از ۲ ماه (ج) زرد شدن تدریجی برگ‌ها از وسط گیاه پس از ۲ ماه



شکل ۵- بامبو پس از پایان آزمایش‌ها (الف) ریشه‌های جوانه زده جدید (ب) ریشه‌های سیاه شده در غلظت بالا پس از ۲ ماه (ج) زرد شدن تدریجی ساقه و برگ در غلظت بالا

جدول ۳- مقایسه نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات

| مرجع | میزان حذف یا هدف از انجام | زمان | گیاه | آلاینده |
|--------------|---|----------------------------|--|------------------|
| [۲۴] | بررسی تغییرات فیزیکی گیاه | ۷ روز | <i>Lemnaceae</i> | سولفات روی |
| [۱۰] | COD: ۷۵٪ و ۶۰٪، BOD: ۴۸٪ و ۷۵٪، TOC: ۶۹٪ و ۵۴٪ | ۲/۵ روز | <i>Aster amellus Linn.</i> | فاضلاب نساجی |
| [۱۱] | میزان جذب شده رنگ در دمای ۳۴/۵۹، ۳۸/۷۹mg/g و ۳۰/۶۱ و ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس | ۱ روز | لوئی | رنگ کنگو قرمز |
| [۲۵] | توصیف رابطه بین دزها و ارزیابی اثرات مختلف دزها بر یکدیگر | ۴ روز | <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> | سلنیوم و سولفات |
| [۲۶] | ۱/۴۷۲ ± ۰/۰۹۴، ۲۶/۵۸۷ ± ۰/۰۳۸۱ و ۵/۳۷۹ ± ۰/۳۵۴ میلی‌گرم بر مترمربع جذب داشتند | _____ | <i>S. alterniflora</i> S. salsa و <i>P. australis</i> | ترکیبات سولفور |
| [۲۷] | اثر متقابل سولفات بر کادمیوم بر متابولیسم گیاه که سنبل آبی عملکرد بهتری داشت | ۳ روز | سنبل آبی و مریم | کادمیوم و سولفات |
| [۲۸] | به ترتیب گیاهان ذکر شده: ۲۷، ۳۰ و ۱۱ میکروگرم بر گرم وزن خشک گیاه | ۷ روز | <i>Lemna minor Elodea canadensis</i> و <i>Cabomba aquatica</i> | سولفات مس |
| [تحقیق حاضر] | بامبو: ۳۰۰۰ و ۱۵۰۰، ۱۲۰۰، ۹۰۰، ۶۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر پامپاس گراس: ۳۶٪، ۴۴٪ گیاه: ۳۰/۵۵، ۳۴/۲۲، ۹/۷۲، ۱۵/۹۳، ۷/۷۷، ۴/۴۴ راندمان: ۳۰/۵۹، ۲۶/۶۷، ۵/۵۶، ۴/۴۵، ۲/۲۲ نی: ۳۰/۶۷، ۳۵/۳۳، ۴۴٪ | دوره ۳ روزه دوره ۷ روزه | پامپاس گراس و بامبو | سولفات سدیم |
| [۲۹] | راندمان حذف در نی ۹۵٪، بامبو ۸۵٪ و نخل مرداب ۷۰٪ | ۱۰ دوره ۲ روزه | نی، بامبو و نخل مرداب | نیتروژن |
| [۳۰] | راندمان حذف در نی ۵۹٪، بامبو ۴۵/۵٪ و نخل مرداب ۳۰/۶۵٪ | ۱۰ دوره ۲ روزه | نی، بامبو و نخل مرداب | فسفر |
| [۳۱] | راندمان حذف نیتروژن و فسفر به ترتیب در پامپاس گراس ۸۶/۳٪ و ۷۹/۲۵ و بامبو ۶۸/۸٪ و ۳۴/۵۵٪ | ۴۵ روز در ۳ دوره | پامپاس گراس و بامبو | نیتروژن و فسفر |

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که دو گونه گیاهی پامپاس گراس و بامبو با توجه به شرایط محیطی و اقلیم، از پتانسیل خوبی برای حذف سولفات برخوردارند، اما فرایند گیاه پالایی در محیط کشت هیدروپونیک علی‌رغم میزان راندمان حذفی که در غلظت‌های مختلف دارد نمی‌تواند خواسته‌ها و قوانین زیست‌محیطی را در حد مطلوب و چشمگیر، آن هم در مقیاس‌های صنعتی برآورده سازد. با

این حال می‌توان از این روش در حدود زیباسازی محیط‌ها و به‌عنوان مرحله پایانی تصفیه بهره جست.

۵- قدردانی

به این وسیله از مدیریت محترم اداره محیط زیست استان اصفهان جناب آقای مهندس لاهیجان‌زاده و مسئول محترم آزمایشگاه آن در اداره کل، سرکار خانم صفی قلی تشکر به عمل می‌آید.

۶- مراجع

1. Davies, T.D. (2007). "Sulphate toxicity to the aquatic moss, fontinoalis anitpyretica." *Chemosphere*, 66 (3), 444-451.
2. Besharati, H., Khosravi, H., and Fallah A. (2009). *Soil microbiology*, Aeej Pub, Tehran. (In Persian)
3. WHO. (2004). "Water sanitation health." <<http://www.who.int>> (Jan. 2011).
4. Institute of Standard and Industrial Research of Iran. (2009). *ISIRI 1053, Drinking water: Physical and chemical characteristics*, 5th Ed., Tehran. (In Persian)
5. Vice Presidency for Strategy Planning and Supervision. (2010). *Environmental criteria for treated wastewater and flow reuse No. 535*, Tehran. (In Persian)
6. International Network for Acid Prevention. (2003). "Treatment of sulfate in mine effluents." <http://www.inap.com.au/public_downloads/Research_Projects/Treatment_of_Sulphate_in_Mine_Effluents_-_Lorax_Report.pdf> Lorax Environmental.
7. Jadia, C.D., and Fulekar, M. H. (2009). "Phyto-remediation of heavy metals: Recent techniques." *African J. of Biotechnology*, 8 (6), 921-928.
8. Dordipoor, E., and Farshadirad, A. (2009). "Hydroponic and saving of water consumption." *The First Hydroponic Congress*, Isfahan University of Technology, Isfahan, 481-482. (In Persian)
9. Ghaderi, A.A. (2004). "The plant role in wastewater treatment; case study: Treatment of Tehran wastewater by constructed wetlands." *Geographic and Development Iranian Journal*, 3, 108-120. (In Persian).
10. Khandare, R.V., Kabra, A.N., Tamboli, D.P., and Govindwar, S.P. (2011). "The role of *Aster amellus* Linn. in the degradation of a sulfonated azo dye remazol red: A phyto-remediation strategy." *Chemosphere*, 82, 1147-1154.
11. Hu, Z., Chen, H., Ji, F., and Yuan, S. (2010). "Removal of Congo Red from aqueous solution by cattail root." *J. of Hazardous Materials*, 173 (1-3), 292-297.
12. Schiavon, M., Pittarello, M., Pilon-Smits, E.A.H., Wirtz, M., Hell, R., and Malagoli, M. (2012). "Selenate and molybdate alter sulfate transport and assimilation in *Brassica juncea* L. Czern: Implications for phyto-remediation." *Environmental and Experimental Botany*, 75, 41-51.
13. Zhang, B.Y., Zhenga, J.S., and Sharp, R.G. (2010). "Phytoremediation in engineered wetlands: Mechanisms and applications." *Procedia Environmental Sciences*, 2, 1315-1325.
14. Bacheta, G. (2009) "Biodiversity hotspots in the Mediterranean area: Species, communities and landscape

- level.” *Bacheta Scientific Committee of the 45th International Congress of SISV & FIP*, Sardina, Italy.
15. <www.dpiw.tas.gov.au> (May 2011)
 16. Saura-Mas, S., and Lloret, F. (2005). “Wind effects on dispersal patterns of the invasive alien *Cortaderia Selloana* in Mediterranean wetlands.” *Acta Oecologica*, 27, 129-133.
 17. Nath, A.J., Das, G., and Das, A.K. (2008). “Vegetative phenology of three bamboo species in subtropical humid climate of Assam.” *Tropical Ecology*, 49 (1), 85-89.
 18. www.Iran news paper.com
 19. Jazayeri, S.H. (2009). “Look at exploitation of hydroponic operation and analysis of advantages and disadvantages of applying this method.” *The First Hydroponic Congress*, Isfahan University of Technology, Isfahan, 412-413. (In Persian)
 20. Wang, M.Y., Wu, L.H., and Zhang, J. (2009). “Impacts of root sulfate deprivation on growth and elements concentration of globe amaranth (*Gomphrena globosa L.*) under hydroponic condition.” *Plant Soil Environ.*, 55 (11), 484-493.
 21. Wu, Y., Chung, A., Tam, N.F.Y., Pi, N., and Wong, M.H. (2008). “Constructed mangrove wetland as secondary treatment system for municipal wastewater.” *Ecological Engineering*, 34 (2), 137-146.
 22. Abreu, M.M., Tavares, M.T., and Batista, M.J. (2008). “Potential use of *Erica andevalensis* and *Erica australis* in phytoremediation of sulphide mine environments: São Domingos, Portugal.” *J. of Geochemical Exploration*, 96 (2-3), 210-222.
 23. Khellaf, N., and Zerdaoui, M. (2009). “Phyto-accumulation of zinc by the aquatic plant *Lemna gibba L.*” *Bioresource Technology*, 100 (23), 6137-6140.
 24. Lahive, E., O’Halloran, J., and Jansen, M.A.K. (2011). “Differential sensitivity of four *Lemnaceae* species to zinc sulphate.” *Environmental and Experimental Botany*, 71 (1), 25-33.
 25. Fournier, E., Adam-Guillermin, C., Potin-Gautier, M., and Pannier, F. (2010). “Selenate bioaccumulation and toxicity in *Chlamydomonas reinhardtii*: Influence of ambient sulphate ion concentration.” *Aquatic Toxicology*, 97 (1), 51-57.
 26. Zhou, C., An, S., Deng, Z., Yin, D., Zhi, Y., Sun, Z., Zhao, H., Zhou, L., Fang, C., and Qian, C. (2009). “Sulfur storage changed by exotic *Spartina alterniflora* in coastal salt marshes of China.” *Ecological Engineering*, 35 (4), 536 -543.
 27. Oliveira, J.A., de, Cambraia, J., Sousa, M. V., and de Oliva, M.A. (2009). “Sulphate uptake and metabolism in water hyacinth and salvinia during cadmium stress.” *Aquatic Botany*, 91 (4), 257-261.
 28. Olette, R., Couderchet, M., Sylvie, B., and Eullaffroy, P. (2008). “Toxicity and removal of pesticides by selected aquatic plants.” *Chemosphere*, 70 (8), 1414-1421.
 29. Falahi, F. (2009). “Lab-scale study of nitrate removal by phytoremediation.” M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran. (In Persian)
 30. Rezamand, Sh. (2009). “Comparison of efficiency phosphorus removal in reed, bamboo and umbrella plant with phytoremediation.” M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran. (In Persian)
 31. Alafipoor, A. (2012). “Optimum rate determination of nitrogen and phosphorus by phytoremediation.” M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran. (In Persian)