Archive of SID

مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره هجدهم، شماره ۳، سال ۱۳۹۷

تحلیل آماری حذف همزمان شوری و بار آلی توسط فرآیند گیاه‌پالایی

حسین کلهر[۱]، حسین گنجی‌دوست[۲*]، بیتا آیتی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

***h-ganji@modares.ac.ir**

تاریخ دریافت: [۹٤/۱۲/۱۲] تاریخ پذیرش: [۹۵/۳/۱۹]

چکیده

فاضلاب‌های با شوری بالا یکی از مشکلات عمده زیست محیطی به شمار می‌آید و تصفیه آن‌ها با استفاده از سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی متداول موجود در تصفیه خانه‌ها به دلیل از بین رفتن میکروارگانیسم‌ها کاری دشواری است. یکی از روش‌های مورد توجه در تصفیه این فاضلاب ها گیاه پالایی است که علاوه بر موثر بودن، دوستدار محیط زیست و کم هزینه است. در این پژوهش عملکرد گیاه وتیور *Chrysopogon zizanioides* و نخل مرداب *Cyperus alternifolius* در حذف همزمان شوری و بارآلی با پنج کیفیت فاضلاب مختلف با شوری به ترتیب (۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ dS/m)، COD به ترتیب (۰، ۷۵، ۱۵۰، ۲۲۵ و ۳۰۰ mg/L) و آب خالص به عنوان شاهد بررسی شد. نتایج نشان داد که هر دو گیاه در راکتورهای با شوری کمتر عملکرد بهتری به لحاظ رشد و حذف شوری و بارآلی از خود نشان دادند. نشانه‌های مسمومیت شوری شامل سوختگی و پلاسیدگی در برگ‌ها در گیاه‌های وتیور و نخل مرداب به ترتیب در شوری بالاتر از ۷/۵ dS/m و ۵ مشاهده شد. میزان کاهش شوری در تیمارهای مختلف برای گیاه وتیور، متفاوت و از ۵۳ الی ٤ درصد متغیر بود. میزان کاهش بار آلی نیز در تیمارهای گوناگون از ٦۰ الی ۱۲ درصد مشاهده شد. برای گیاه نخل مرداب میزان کاهش شوری و بار آلی در تیمارهای مختلف به ترتیب از ۲۹ الی ۱ درصد و ٤۹ الی ۵ درصد متغیر بود. آزمون مقایسه T مستقل نشان داد که افزایش شوری بر مشخصه‌های مورفولوژیک هر دو گیاه در بازه اطمینان ۹۵ درصد به صورت معنی‌داری تاثیر گذار است. همچنین برازش رگرسیون تعمیم یافته نشان داد که وجود بارآلی روی مشخصات مورفولوژیکی گیاهان تاثیر قابل توجهی ندارد و تنها میزان شوری فاضلاب کنترل کننده مشخصات رشدی گیاه است.

واژگان کلیدی: گیاه پالایی، تحلیل آماری، وتیور، نخل مرداب

۱- مقدمه

کمبود آب منجر به انجام پژوهش‌های گسترده در خصوص یافتن منابع آب جایگزین شده است. در بیشتر نقاط دنیا آب مصرفی مردم دارای کیفیت مطلوب نبوده و از کدورت و شوری بالایی برخوردار است در نتیجه فاضلاب حاصل از اماکن مسکونی و جوامع شهری دارای شوری بالا است. همچنین برخی از واحدهای صنعتی مانند دباغی، چرم-سازی، کارخانجات تولید غذاهای آماده، کارخانجات

www.SID.ir

Archive of SID

کنسروسازی، کشتارگاه‌ها، کارخانجات یخ‌سازی، صنایع لبنی، صنایع نوشابه‌سازی، صنایع شیمیایی مانند کارخانجات تولید حشره‌کش‌ها، علف‌کش‌ها، مواد دارویی، صنایع پتروشیمی و تولید نفت و گاز نیز فاضلاب‌های خیلی شور تولید می‌کنند. در بیشتر مناطق ساحلی و برخی از نواحی کویری نیز به دلیل مصرف آب با شوری بالا، فاضلاب‌های شور تولید می‌شود. یکی از موارد استفاده از فاضلاب، تصفیه و استفاده آن در آبیاری است این در حالیست که فاضلاب‌های شور علاوه بر غلظت بالای نمک دارای ترکیبات آلی نیز هستند و تصفیه آنها با استفاده از میکروارگانیسم‌های معمولی که در تصفیه‌خانه-های فاضلاب وجود دارند، کار دشواری است. زیرا شوری بالا باعث پلاسمولیز[1] شدن میکروارگانیسم‌ها و از بین رفتن آن‌ها می‌شود. به همین دلیل وجود نمک در فاضلاب می‌تواند بر راندمان حذف بارآلی تصفیه‌خانه‌ها نیز اثر منفی بگذارد [1].

شوری خاک و آب یکی از مشکلات عمده زیست محیطی جهانی است که می‌تواند باعث تخریب زمین، کاهش کیفیت آب و وارد آمدن آثار زیان آوری به گیاهان (نباتات) شود. نتایج برآوردها و ارزیابی‌های انجام شده توسط برنامه محیط زیست سازمان ملل مبین آنست که ۲۰ درصد از اراضی کشاورزی و ۵۰ درصد از اراضی تحت کشت محصولات کشاورزی در معرض تنش‌های ناشی از شوری خاک هستند. درجه شوری در اراضی خشک بواسطه تابش شدید نور خورشید و افزایش تبخیر تشدید می‌شود بنابراین مطالعه بر روی تصفیه فاضلاب‌های شور اهمیت کاربردی دارد [2]. ضمن اینکه کاهش اکسیژن محلول، از دست دادن کیفیت آب، مرگ آبزیان، تجمع فلزات سنگین و مواد سمی در بدن آبزیان و گیاهان و انتقال آن‌ها از طریق غذا به انسان، ایجاد پدیده مرگ رودخانه‌ها و یوتریفیکاسیون بر اثر تحمیل مواد مغذی نیتروژن و فسفر به منابع پذیرنده و انتقال بیماری‌ها مهم‌ترین پیامدهای تخلیه فاضلاب غیر استاندارد به محیط‌های آبی است [3].

تصفیه فاضلاب‌های شور با روش‌های مختلف فیزیکی همچون لاگون‌های تبخیری، روش حرارتی، اسمز معکوس، تبادل یونی و استفاده از روش‌های بیولوژیکی مانند لجن فعال، تماس دهنده‌های زیستی، راکتورهای بیوفیلمی با بستر ثابت و یا شناور و روش‌های اکسیداسیون نیز امکان‌پذیر است. روش‌های تصفیه جایگزین کم‌هزینه و دوستدار محیط‌زیست نیز مانند تالاب‌های مصنوعی از جمله روش‌های رایج در نواحی روستایی می‌باشد که اساس کار این تالاب‌ها مبتنی بر گیاه پالایی است. عامل اصلی اغلب فرآیندهای تصفیه در تالاب‌های مصنوعی، سازوکارهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی هستند. ویژگی‌های مهم گیاهان در تالاب‌های مصنوعی عبارتست از افزایش زمان ماند از طریق کاهش سرعت آب، ایجاد مانع در مقابل انتشار بو، ایجاد سطح کافی جهت رشد و نمو میکروارگانیسم‌ها، ایجاد فضای سبز و ظاهری زیبا در منطقه، ایجاد شاخص زیستی برای مدیریت و کنترل تالاب، کاهش میزان رسوب‌گذاری و کنترل مواد مغذی در تالاب که با در نظر گرفتن این موارد می‌توان به اهمیت حضور گیاهان در این نوع تصفیه پی‌برد. باید به این نکته نیز توجه داشت که گیاه انتخابی نه تنها بایستی با شرایط آزمایش سازگاری داشته باشد، بلکه باید نسبت به شوری مقاومت خوبی از خود نشان دهد [4].

استفاده از گیاه‌پالایی در تالاب مصنوعی برای کاهش شوری فاضلاب، اولین بار به وسیله هویت[2] در سال ۱۹٦٦ برای تصفیه فاضلاب خانگی شور شهرکی در حومه سرزمین فلسطین اشغالی انجام شد. پس از او شلف[3] و همکاران به انجام پژوهش‌هایی در این زمینه پرداختند و با آزمایش‌های خود موفقیت گیاه‌پالایی در تالاب‌ها را برای کاهش بار آلی و شوری فاضلاب به اثبات رساندند [5-7].

گیاه پالایی عبارتست از استفاده از گیاهان برای رفع یا کنترل آلودگی‌های آب و خاک. نمک‌های محلول، فلزات سنگین، مشتقات نفت، روغن و مواد رادیواکتیو از جمله آلاینده‌هایی هستند که تاکنون با استفاده از گیاه‌پالایی از محیط‌های مختلف حذف شده‌اند. در دو دهه گذشته استفاده از گیاه‌پالایی در تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی و

1 Plasmolysis

2 Hewitt
3 Shelef

www.SID.ir

Archive of SID

همچنین تصفیه خاک‌های کم عمق آلوده رونق گرفته است. تامین کننده اصلی انرژی در این روش خورشید بوده و به لحاظ ایجاد مواد ثانویه ناشی از تصفیه بسیار پاک است [8].

کالهروس[1] و همکاران، تاثیر دو گیاه *Typha latifolia* و *Phragmites australis* بر تصفیه فاضلاب صنایع چرمسازی را مقایسه کردند. نتایج این مقایسه نشان داد گیاه اول بازده بهتری دارد. این گیاه COD و BOD را از مقدار اولیه mg/L ۱۷۵۸ و ۷۱۲ به ترتیب به mg/L ۳۱۵ و ۲۰۸ رساند و همچنین میزان هدایت الکتریکی را از dS/cm ۷/۵ به ۶/۸ کاهش داد [9].

کالهروس و همکاران، با کشت دو گیاه *Arundo donax* و *Sarcocornia* در مخلوطی از خاک رس و ماسه درون یک سری وتلند مصنوعی، فاضلاب شور حاوی gr/L ۱۱/۵ کل مواد جامد حل شده را تصفیه نمودند. COD اولیه در حدود mg/L ۲۱۸ و راندمان حذف آن برای دو گیاه به ترتیب ۵۸ الی ۶۷ درصد و مقدار BOD پنج روزه mg/L ۴۰ و میزان حذف آن به ترتیب ۶۰ الی ۷۷ درصد گزارش شد. در این آزمایش میزان شوری زیاد فاضلاب، حذف مواد آلی توسط این دو گیاه را با مشکل یا کاهشی مواجه نکرد. اما میزان حذف شوری اندک بود تا آنجا که رسانایی الکتریکی جریان ورودی برابر با mS/cm ۱۷ و در خروجی تالاب تنها با یک واحد کاهش برابر mS/cm ۱۶ اندازه گیری شد. علاوه بر فرایند جذب، رشد انواع گوناگون باکتری‌ها در منطقه ریشه گیاه نیز باعث تجزیه مواد آلی محلول در فاضلاب ورودی به تالاب مصنوعی شد [10].

شلف و همکاران، گیاه پالایی شوری در چهار نمونه فاضلاب با شوری‌های dS/m ۱، ۵، ۸ و ۱۶ را با استفاده از گیاه *Bassia indica* بررسی کردند. این آزمایش به مدت ۶۳ روز در سیستم هیدروپونیک صورت گرفت. راندمان حذف شوری فاضلاب با شوری dS/m ۱، ۵، ۸ و ۱۶ به ترتیب ۶۱/۸، ۲۲/۲، ۱۲/۹ و ۱۲/۹ درصد بدست آمد [7].

هوانگ[2] و همکاران، گیاه *Sesuvium portulacastrum* را پس از یک دوره رشد ۳ ماهه به یک بستر مصنوعی معلق منتقل کرده و سپس تاثیر این بستر معلق بر میزان حذف بار آلی در مقیاس گلخانه‌ای به مدت ۲۰ روز را اندازه‌گیری نمودند. سپس این بسترهای معلق را به مدت ۸ ماه در لاگون یوندانگ (واقع در جنوب شرقی چین) به کار بستند. برای تطبیق گیاه با شرایط لاگون میزبان، آب کشت گیاه به صورت ترکیبی به نسبت ۱ واحد فاضلاب لاگون و ۴ واحد آب دریا آماده شد. نتایج این مطالعه نشان داد گیاه‌پالایی با بستر شناور حاوی گیاه ذکر شده برای حذف بارآلی در آب‌های آلوده‌ی شور و نیمه‌شور مناسب است. میزان حذف DOC با مقدار اولیه mg/L ۸/۶ برابر ۴۹/۹ درصد و میزان حذف TDN با مقدار اولیه mg/L ۵۱/۶ برابر ۴۹/۹ درصد و راندمان حذف شوری لاگون نیز ۲۷ درصد گزارش شد [11].

سوزا[3] و همکاران، برای گیاه‌پالایی بارآلی و مواد مغذی از گیاه *Myriophyllum aquaticum* کمک گرفتند. آزمایش در یک گلخانه و در راکتورهای به صورت تانک شیشه‌ای و در یک دوره ۳۰ روزه به انجام رسید. ۶ تانک به عنوان شاهد و ۶ تانک دیگر به عنوان راکتورهای انجام آزمایش انتخاب شدند. نمونه‌های فاضلاب از رودخانه‌ای در برزیل که فاضلاب شهری و صنعتی نیز به آن تخلیه می‌شد تهیه شد. میزان پارامترهای مهم فاضلاب اولیه عبارتست از هدایت الکتریکی ۷۴۸ dS/cm، COD=۱۰۱ mg/L، BOD=۷۲ mg/L. نتایج این پژوهش کاهش قابل ملاحظه COD و BOD به ازای زمان ماند ۱۵ روز را گزارش کرد و میزان حذف پس از ۳۰ روز برای BOD و COD به ترتیب ۷۵/۴ و ۶۷/۴ درصد گزارش شد. میزان هدایت الکتریکی نیز در گروه‌های شاهد پس از ۳۰ روز به dS/cm ۶۴۰ و در گروه‌های حاوی گیاه به dS/cm ۵۹۴ رسید که مقدار قابل توجهی به نظر نمی‌رسد [12]

لتو[4] و همکاران، تاثیر دو گیاه *Cyperus alternifolius L* و *Typha latifolia L* بر ترکیبات فاضلاب شهری غرب سیسیل ایتالیا در یک تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی را بررسی کردند. در سه تالاب از هر نوع گیاه کاشته شد و سه تالاب نیز

1 Calheiros
2 Huang
3 Souza
4 Leto

www.SID.ir

Archive of SID

به عنوان شاهد بدون کاشت گیاه باقی ماندند. مجموع مساحت تالاب‌های مصنوعی برابر ۹۹ متر مربع و نرخ بار هیدرولیکی برابر ۹ cm/d تنظیم شد. با زمان ماند یک‌ساله فاضلاب در تالاب‌ها، برای گیاه تیفا، راندمان حذف BOD و COD با مقدار اولیه به ترتیب ۲۵ mg/L و ٥٤، ۷۲ و ۷٦ درصد گزارش شد. برای تالاب‌های حاوی گیاه سایپروس هم میزان حذف BOD و COD به ترتیب به ٦٥ و ٦٦/٦ درصد رسید. در تالاب‌های گیاه‌کاری نشده میزان حذف BOD و COD به ترتیب ٤٩/٦ و ٤٩/٢ درصد به دست آمد [۱۳].

کوماری[1] و تریپاتی[2]، تاثیر هوادهی و کشت مخلوط *Eichhornia crassipes* و *Salvinia natans* را در حذف آلاینده‌ها و کاهش پارامترهای اساسی فاضلاب در ۷ راکتور ناپیوسته ۷۵ لیتری بررسی کردند. دو راکتور حاوی یک نوع گیاه و یک راکتور حاوی کشت ترکیبی از هر دو گیاه بود. در ۳ راکتور هوادهی با نرخ ۰/۵ لیتر بر دقیقه از پایین انجام شد، ۳ راکتور بدون هوادهی و ۱ راکتور نیز بدون گیاه‌کاری و هوادهی به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. در پایان آزمایش با زمان ماند ۳٦ ساعت و هوادهی ۰/۵ لیتر بر دقیقه راندمان حذف BOD پنج روزه با مقدار اولیه ۱٥٤ mg/L، ۸٤/٥ درصد و راندمان حذف COD با مقدار اولیه ۳۰۹ mg/L، ۸۳/۲ اندازه گیری شد که استاندارد تخلیه فاضلاب به محیط را اغنا می‌کرد و نیاز به تصفیه ثانویه در آن مشاهده نمی‌شد. در حالی‌که در ظروف بدون هوادهی میزان حذف بارآلی در حدود ۵۰ درصد گزارش شد. در ظروف بدون گیاه و بدون هوادهی نیز میزان حذف تنها حدود ۲۷ درصد برای BOD و COD به دست آمد. در نهایت کشت گیاه *Eichhornia crassipes* به صورت تکی همراه با هوادهی منجر به حذف ۸۲ درصدی بارآلی شد [14].

هدف از این پژوهش مقایسه دو گیاه غیر بومی ولی سازگار با اقلیم ایران با قابلیت رشد هیدروپونیک، اندازه گیری میزان حذف همزمان بار آلی و شوری در نمونه‌های سنتز شده فاضلاب و همچنین مقایسه مشخصات مورفولوژیکی دو گیاه تحت تاثیر تنش‌های شوری و بارآلی با ادامه انجام آزمایشات است. با اطلاعات به دست آمده از این تحقیق می‌توان با رشد دادن گیاه در تالاب‌های طبیعی یا مصنوعی، علاوه بر تصفیه زیستی و ارزان فاضلاب شور، به هدف‌های جانبی مانند تامین زیبایی، تامین خوراک دام و همچنین جلوگیری از فرسایش خاک رسید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و تجهیزات

بخش راه‌اندازی سیستم شامل ۵ مرحله اصلی شامل تهیه گیاه بالغ، ساخت پایلوت آزمایشگاهی، آماده سازی فاضلاب مصنوعی، تعیین غلظت‌های مختلف فاضلاب، تعیین تعداد گیاهان در هر تانک، انتقال گیاهان به پایلوت و در نهایت اضافه کردن فاضلاب به راکتورها بود. به منظور اطمینان از کارآیی و سلامت گیاهان، نیاز به گیاهان ریشه‌دار با عمر حداقل دو ماه بود. به همین منظور با مراجعه به مزرعه وتیور متعلق به انجمن ایرانی ترویج و توسعه گیاه وتیور در تنکابن، گیاه مورد نیاز تهیه شد. نخل مرداب نیز از مرکز پرورش گیاهان آپارتمانی سیحون تامین و به آزمایشگاه منتقل شد. پایلوت دارای ۱۷ راکتور ناپیوسته با حجم ۱/۷ لیتر و از جنس پلکسی بود (شکل ۱). هدف از کاربرد چنین پایلوتی ایجاد بستر مناسب برای شبیه‌سازی تالاب مصنوعی، وجود تانک‌های متعدد به منظور اعمال سطوح مختلف شوری و مقادیر مختلف بارآلی به هر گیاه و همچنین مقایسه مقادیر حذف در تانک‌های حاوی گیاه با تانک‌های شاهد بود. پایلوت بر اساس روش غرقابی دائم تنظیم شد. در این روش از یک سکوی نگهدارنده که معمولا یک صفحه گیاه را نگه داشته و مستقیما روی محلول تقویت شده شناور است، استفاده شد. یک پمپ هوا نیز هوا را به درون سنگ‌های هوا پمپ کرده و حباب‌های ریز هوای ایجاد شده در محلول، اکسیژن لازم را به ریشه گیاه می‌رساند [15]. هوادهی علاوه بر تامین اکسیژن مورد نیاز ریشه‌ها، اختلاط در محلول را نیز فراهم می‌کرد.

1 Kumari
2 Tripathi

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱. پایلوت مورد استفاده در پژوهش

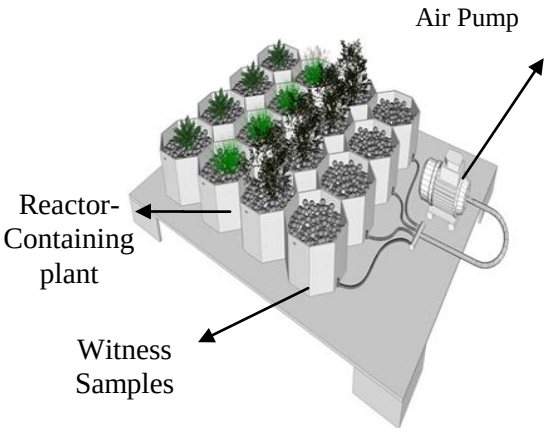

Fig. 1. Schematic of constructed reactor

برای اندازه‌گیری پارامترها از دستگاه اسپکتروفتومتر Hach مدل DR 4000، ترازوی دیجیتالی مدل PJ300 ساخت شرکت Mettler با دقت ۰/۰۰۱ گرم، EC متر Martini مدل MI 805 استفاده شد. سنجش قطر ساقه با کولیس ورنیه با دقت ۰/۰۱ سانتی‌متر و سنجش سطح برگ با دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ DeltaT area meter mk2 صورت گرفت. برای خشک کردن برگ از آون ATF استفاده شد. به منظور برقراری هدایت الکتریکی در محلول از NaCl و برای تامین منبع کربن و COD مورد نیاز از نشاسته فوق خالص[1] شرکت Merck و برای تهیه محلول‌ها از آب مقطر دو بار تقطیر استفاده شد. همچنین گیاهان با کود مایع پوکون[2] بعنوان ماکرونوترینت با نسبت عناصر مغذی N، P و K به ترتیب ٦، ٦ و ۵ ساخت کشور هلند طبق دستور العمل مندرج در بسته بندی کود به میزان ۵ میلی‌لیتر کود مایع در هر لیتر آب تغذیه شدند.

۲-۲- روش کار

پنج نوع فاضلاب با مقادیر متفاوت هدایت الکتریکی و بارآلی به صورت مصنوعی در آزمایشگاه سنتز شد. کیفیت این پنج نوع فاضلاب در جدول (۱) آمده است.

هر دو گیاه نخل مرداب و وتیور علاوه بر تیمار با ۵ نوع فاضلاب ذکر شده، با یک تیمار آب مقطر به عنوان شاهد نیز آبیاری شدند. تعداد ۵ راکتور فاقد گیاه نیز با فاضلاب‌های ذکر شده آبیاری شدند تا تاثیر صرف هوادهی در کاهش میزان پارامترهای هدایت الکتریکی و COD مشاهده شود. در هر راکتور میزان ۵ mL کود مایع جهت تامین عناصر مغذی و حفظ نسبت NPK به مقدار ۵:۷:۷ مورد نیاز گیاه اضافه شد. یک بار کوددهی با این میزان برای یک دوره دو ماهه رشد گیاه کفایت می‌کرد. این مقدار بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده کود انتخاب شد. در شکل (۲) آرایش راکتور و چگونگی قرارگیری راکتورهای شاهد و حاوی گیاه ارائه شده است.

جدول ۱. مقدار شوری و COD در محلول‌های مختلف

Sample No.	COD (mg/L)	Electrical (Conductivity dS/m)
1	300	0
2	225	2.5
3	150	5
4	75	7.5
5	0	10

Table 1. Amount of salinity and COD in different solution

شکل ۲ چیدمان راکتورها و نوع فاضلاب و گیاه هر راکتور

Fig. 2. Reactor configuration based on the plants and wasewater

۲-۳- تعیین تعداد گیاهان در هر راکتور

برای محاسبات این پژوهش از مدل ارائه شده توسط مصلحی مصلح آبادی و همکاران (۱۳۸۹) استفاده شد [16]. در این مدل همان‌طور که ریشه‌های جدید در خاک نفوذ می‌کنند و فعالیت میکروبی را افزایش می‌دهند، خاک اطراف ریشه نیز تبدیل به ریزوسفر می‌شود. با مرگ ریشه، ریشه و ریزوسفر مربوط به آن به ناحیه مرگ ریشه منتقل می‌شوند که سرانجام توسط فرایند خاک‌سازی به خاک برمی‌گردند. برای شبیه سازی گیاه‌پالایی گیاهان متفاوت، از توابع رشد و مرگ

1 Ultrapure
2 Pokon

www.SID.ir

Archive of SID

مختلفی استفاده می‌شود.

با توجه به این که حذف مواد آلی در ناحیه ریزوسفری انجام می‌شود، پایلوت باید به گونه‌ای طراحی میشد تا درصد حجمی ریزوسفر در هر تانک، برابر درصد حجمی ریزوسفر در تالاب مصنوعی باشد. از آن‌جا که ۲ تا ۳ درصد حجم کل خاک، خاک ریزوسفری است باید تعداد گیاهان به گونه‌ای باشد تا حجم ریزوسفر ایجاد شده، ۳ درصد حجم داخلی راکتور باشد [17]

اندازه‌گیری دقیق تجربی حجم ریزوسفر بسیار مشکل است. در پژوهش‌های مختلف روش‌هایی برای تخمین قابل اطمینانی از این پارامتر ارائه شده است (رابطه ۱). برای محاسبه حجم لایه‌های ریزوسفر، سیستم استوانه‌ای با شعاع r و لایه‌هایی به ضخامت RT در نظر گرفته می‌شود. بنابراین:

$$V_i=\pi L.([r+(i)RT]^2- [r+ (i- 1)RT^2) \quad (۱)$$

که در آن i معرف لایه i ام است و از لایه‌های داخلی شروع می‌شود. با واحد فرض کردن یک ناحیه ریزوسفر، حجم ریزوسفر از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$V_i=\pi L.([r+RT]^2- [r]^2) \quad (۲)$$

به علاوه به رابطه‌ای بین حجم ریشه و حجم ریزوسفر نیاز است که فرض بر این است که فاکتور مهم در تولید ریزوسفر، تغییر در طول ریشه است و نه در قطر آن. با توجه به این فرض نشان داده می‌شود که ضریب حجمی ویژه ریزوسفر β_{max} برای هر لایه از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\beta_i^{max}= (2\alpha+ 2i- 1)/\alpha^2 \quad (۳)$$

که α برابر است با نسبت شعاع به ضخامت لایه i ریزوسفر (r/RT). برای سیستم‌های با چگالی کم ریشه، رابطه بالا تخمین خوبی از حجم ریزوسفر خواهد بود اما در سیستم‌های با چگالی بالای ریشه که برای گیاه‌پالایی مورد نیاز است، این رابطه مقادیری بیش از مقدار واقعی را نشان می‌دهد که این امر به دلیل همپوشانی لایه‌های ریشه‌های مختلف است به عنوان یک فرض برای در نظر گرفتن این همپوشانی از مقداری برابر β_{max} =۰/٤ استفاده می‌شود [18].

با فرض یک لایه ریزوسفر و برآوردهای موجود از طول و شعاع ریشه و همچنین ضخامت لایه ریزوسفر، تعداد گیاهان در هر تانک برای دو گیاه نخل مرداب و وتیور به دست می‌آید.

$$1.738L*0.03= 0.05264\ L \quad (٤)$$

حجم خاک ریزوسفری مورد نیاز ۵۲ cc است. با توجه به فرض تحقیق مبنی بر توانایی گیاهان به حذف مواد آلی و هم‌چنین رابطه معکوس βimax با α، می‌توان مقدار α را با ضریب اطمینان بالا و تقریب خوبی برابر ۱ در نظر گرفت، پس با فرض یک لایه ریزوسفر، مقدار β_i^{max} برابر ۳ به‌دست می‌آید. با در نظر گرفتن ضریب حجمی ویژه ریزوسفر β^{max}=۰/٤، مقدار نهایی ضریب حجمی ریزوسفر برابر ۱/۲ شد. در نتیجه میزان ریشه مورد نیاز حدود ٤۳/٤۷ میلی‌لیتر شد. حجم ریشه یک شاخه وتیور بالغ بعد از دو ماه آبیاری با فاضلاب شور حاوی بار آلی، ۱٤/۵ cm^3 است [19]. در نتیجه تعداد وتیور در هر تانک برابر ۳ در نظر گرفته شد. حجم ریشه نخل مرداب رشد یافته در فاضلاب شهری در شرایط بالغ ۱٦/۱۱ سانتی‌متر مکعب است [20]. بنابراین استفاده از ۳ گیاه نخل مرداب برای پژوهش در نظر گرفته شد.

در بخش انتهایی تحقیق با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل داده‌های حاصل از اندازه‌گیری مشخصات مورفولوژیک و همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده تغییرات هدایت الکتریکی و COD محلول‌های فاضلاب انجام پذیرفت. این آزمون‌های آماری به سه فاکتور گیاه، سطوح مختلف شوری و سطوح مختلف بار آلی بر پایه طرح کاملا تصادفی صورت گرفت.

در تحلیل آماری مشخصات مورفولوژیکی گیاهان، جامعه آماری شامل تمام گیاهان تیمار شده با فاضلاب‌های با کیفیت متفاوت و نمونه‌های شاهد است. نمونه‌های مورد مقایسه نیز تیمارهای مختلف در بین یک گونه است. فرض صفر یا H0 در این آزمون‌های مقایسه مستقل، عدم تاثیر تیمار با فاضلاب بر مشخصات مورفولوژیک گیاه است که با رد شدن این فرض، تاثیر معنادار تیمار با فاضلاب‌های گوناگون بر مشخصات مورفولوژیک گیاه نتیجه‌گیری می‌شود. این فرض برای هر کدام از ویژگی‌های مورفولوژیکی شامل وزن خشک، میانگین سطح برگ، میانگین قطر ساقه و حجم ریشه به طور

www.SID.ir

Archive of SID

مجزا در نظر گرفته شده و با آزمون مقایسه دو دامنه‌ای بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه حذف بار آلی و شوری

برای مقایسه نتایج روند کاهش COD و هدایت الکتریکی توسط دو گونه گیاه مورد آزمایش، منحنی‌های مربوط به تغییرات COD و هدایت الکتریکی فاضلاب درون راکتورها نسبت به زمان به ترتیب در شکل‌های (۳ و ٤) ارائه شده است.

برای یافتن میانگین مورد قبول از سه دوره آزمایش، میانگین اعداد گرفته شد. سپس بازه‌ی میانگین اعداد به علاوه و منهای سه برابر مربع واریانس به عنوان بازه اطمینان در نظر گرفته شد. داده‌هایی که در این بازه قرار می‌گرفتند. به عنوان داده قابل اعتماد و داده‌هایی که در این بازه قرار نمی‌گرفتند، به عنوان داده پرت منظور شدند. سپس با میانگین گیری دوباره از اعداد قابل اعتماد، میانگین درصد حذف بارآلی و هدایت الکتریکی در هر گیاه محاسبه شد.

همانگونه که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، در تمامی راکتورها میزان حذف بارآلی در وتیور بیشتر از نخل مرداب است. در شکل (٤) نیز می‌توان مشاهده نمود که در تمامی راکتورها میزان حذف بار هدایت الکتریکی در وتیور بیشتر از نخل مرداب است. بیشتر بودن میزان حذف با ویژگی‌های ذاتی گیاه وتیور، تحمل بیشتر این گیاه به تنش‌های شوری و سازوکارهای متفاوت گیاه‌پالایی ارتباط دارد [21].

شکل ۳. تغییرات حذف بار آلی در راکتورهای مختلف

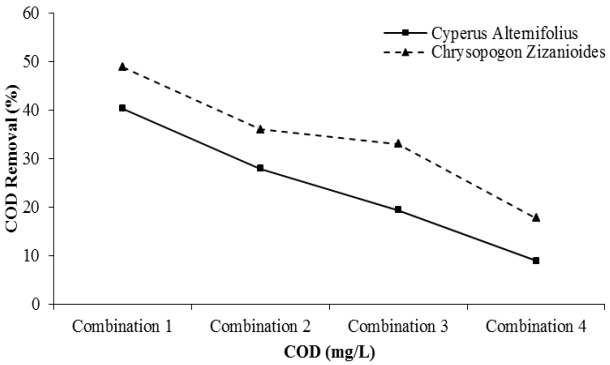

Fig. 3. COD removal in different reactors

شکل ٤. تغییرات حذف هدایت الکتریکی در راکتورهای مختلف

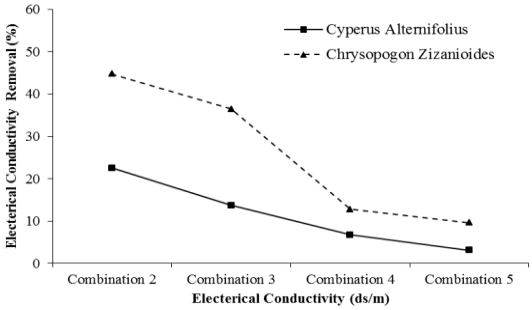

Fig. 4. Electerical conductivity removal in different reactors

۳-۲- بررسی مشخصات مورفولوژیک

شکل (۵) نشان دهنده مقدار حجم ریشه آغازین و حجم ریشه در پایان دوره ٦۰ روزه آزمایش برای هر دو نوع گیاه و مقایسه مقادیر رشد در راکتورهای شاهد فاقد شوری و بار آلی است. در تمام راکتورها رشد ریشه‌ی وتیور نسبت به نخل مرداب بیشتر است. در راکتورهای با هدایت الکتریکی بالا که در هر دو نوع گیاه با کاهش حجم ریشه همراه بوده است، میزان کاهش حجم ریشه در نخل مرداب بیشتر از وتیور مشاهده شد. در نهایت می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که ریشه گیاه وتیور نسبت به تنش‌های شوری مقاومت بیشتری نسبت به گیاه نخل مرداب از خود نشان می‌دهد. از آنجایی که حذف بارآلی در فاضلاب شهری و فاضلاب‌های با کیفیت مشابه توسط ریشه انجام می‌شود. پس در تالاب‌های مصنوعی یا طبیعی که با فاضلاب شهری شور آبیاری می‌شوند، استفاده از گیاه وتیور توصیه می‌شود. وتیور به دلیل مقاومت بیشتر ریشه در برابر تنش شوری، می‌تواند در شوری تا ۷/۵ دسی زیمنس بر متر نیز فرآیندهای گیاه پالایی ریشه‌ای (ریزو رمدیشن) را به انجام برساند.

شکل ۵. مقایسه تغییرات حجم ریشه در گیاه وتیور و نخل مرداب

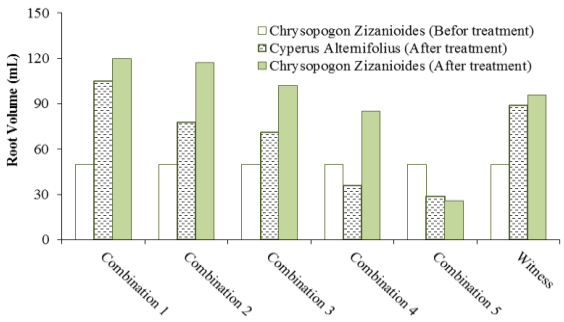

Fig. 5. Comparison of root volume in the plants under study

www.SID.ir

Archive of SID

در شکل (٦) مقایسه میانگین قطر ساقه دو گیاه، قبل و پس از انجام آزمایش‌ها در راکتورهای حاوی فاضلاب و راکتور شاهد ارائه شده است.

شکل ٦. مقایسه تغییرات میانگین قطر ساقه گیاه وتیور و نخل مرداب
الف) قبل و ب) پس از انجام آزمایش‌ها

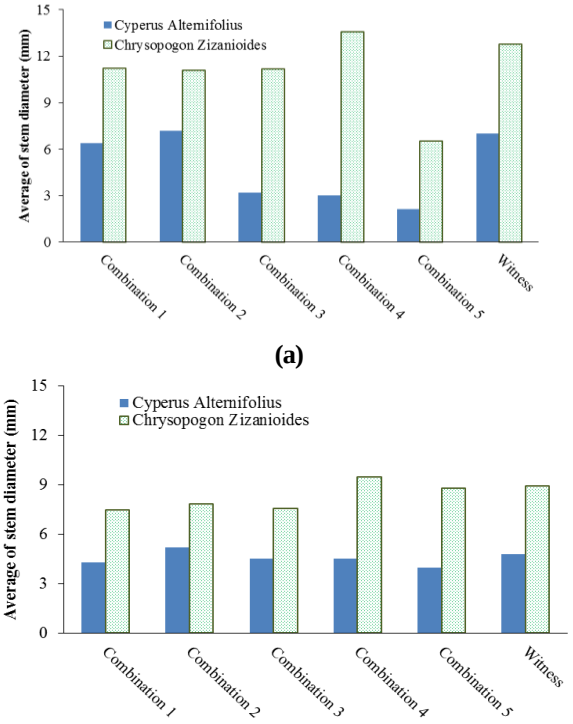

Fig. 6. Comparison of average stem diameter in the plants under study (a) before, (b) after treatment

به نظر می‌رسد در مورد پارامتر قطر ساقه نیز گیاه وتیور مقاومت بهتری از نخل مرداب در برابر تنش شوری نشان می‌دهد. در این نمودارها باید توجه داشت که ساقه وتیور یک حالت ماشوره‌ای و ساختاری گره‌ای دارد. این ساختار باعث می‌شود گیاه بعد از خشک شدن نسبی و از دست دادن مقدار مشخصی از رطوبت بافتی، کاهش بیشتری در قطر ساقه بروز ندهد. در حالی‌که ساقه گیاه نخل مرداب در اثر کاهش رطوبت، روند کاهشی قطر خود را تا خشک شدن ساقه به طور کامل ادامه می‌دهد و میزان قطر ساقه به طور مداوم کاهش می‌یابد. پس با وجود معنی دار بودن تفاوت میان قطر ساقه وتیور و نخل مرداب، نمی‌توان از آن به عنوان یک پارامتر قابل اطمینان به منظور سنجش مقاومت وتیور در مقابل تنش شوری و سایر تنش‌هایی که باعث خشکی گیاه می‌شوند، استفاده نمود [22] تغییرات میانگین سطح برگ دو گیاه، پیش و پس از انجام آزمایش‌ها در راکتورهای حاوی فاضلاب و شاهد در شکل (٧) ارائه شده است. نخل مرداب در فاضلاب با شوری ٠ dS/m و ٢/٥ نسبت به وتیور افزایش بیشتری را در سطح برگ نشان داد. رشد برگ نخل مرداب در تیمار با هدایت الکتریکی صفر و بار آلی ٣٠٠ mg/L به میزان ٤٦ درصد بیشتر از رشد برگ وتیور است.

شکل ٧. مقایسه تغییرات میانگین سطح برگ دو گیاه وتیور و نخل مرداب
الف) قبل و ب) پس از انجام آزمایش‌ها

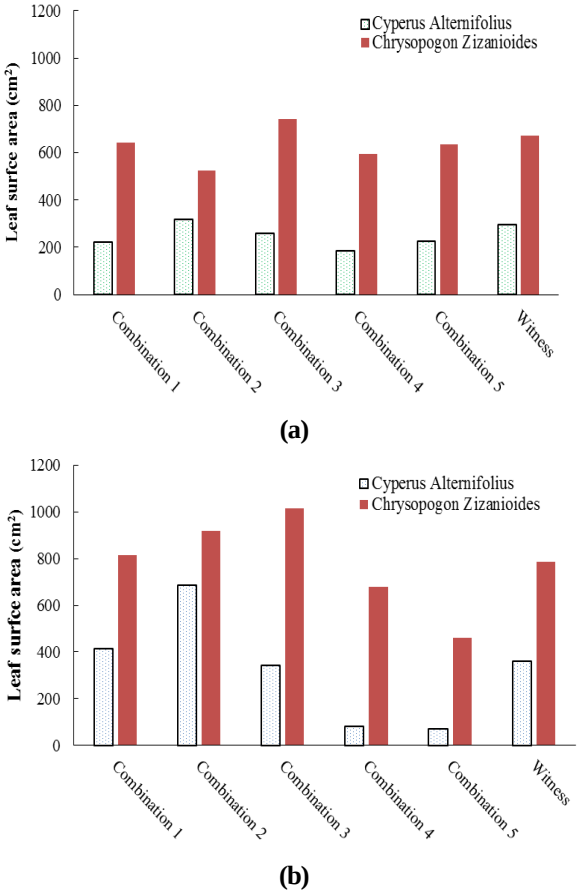

Fig. 7. Comparison of leaf surface area in the plants under study (a) before, (b) after treatment

همچنین در تیمار با هدایت الکتریکی ٢/٥ dS/m و بارآلی ٢٢٥ mg/L این مقدار ٢٤ درصد بیشتر بود. در تیمار با شوری ٥ dS/m و بارآلی ١٥٠ mg/L، میزان رشد سطح برگ نخل مرداب با میزان رشد سطح برگ وتیور تنها ٦ درصد تفاوت دارد. در تیمار ٧/٥ dS/m و بار آلی ٧٥ mg/L، نسبت رشد برگی نخل مرداب به رشد برگی وتیور به ٤٠ درصد رسید که حاکی از

www.SID.ir

Archive of SID

عملکرد ضعیف نخل مرداب نسبت به وتیور در تیمارهای شورتر از ۷/۵ dS/m است. با توجه به افزایش سریع میانگین سطح برگ برای نخل مرداب در تیمارهای ۰ الی ۵ dS/m در طراحی تالاب‌های مصنوعی یا طبیعی تصفیه فاضلاب شور، باید سرعت بالای تولید زیست توده در صورت استفاده از این گونه گیاهی را در نظر گرفت. همچنین تمهیداتی برای خارج کردن برگ‌ها از محل تصفیه اندیشید. زیرا در صورت هرس نکردن، برگ‌ها به آب داخل تالاب باز می‌گردند که باعث برگشت نمک ذخیره شده در برگ‌ها به آب می‌شود. همچنین افزایش COD به دلیل بازگشت ماده آلی به صورت برگ گیاه و نیز کاهش اکسیژن محلول در آب به دلیل اکسید شدن برگ‌ها و بروز شرایط بی‌هوازی از دیگر تهدیدات استفاده از نخل مرداب در فاضلاب‌های شور است [23].

۳-۳- تحلیل آماری نتایج

اعمال فاضلاب می‌تواند تفاوت‌های معناداری را بین میانگین وزن خشک گیاهان ایجاد نماید. وجود این اختلاف معنی‌دار حاکی از آن است که وتیور و نخل مرداب هیچ کدام گیاهان شورزی نیستند. با وجود معنی دار بودن اختلاف وزن خشک گیاهان تیمار شده با گیاهان شاهد، این اختلاف برای گیاه وتیور در راکتور با شوری ۷/۵ dS/m و بار آلی ۷۵ mg/L و راکتور با شوری dS/m ۱۰ در سطح اطمینان بزرگتری معنادار است. این تحلیل نشان دهنده‌ی تاثیر پذیری بیشتر مشخصات مورفولوژیک وتیور در دو کیفیت فاضلاب ذکر شده است. برای تمام کیفیت‌های فاضلاب، گیاه نخل مرداب با وجود معنی‌دار بودن تغییرات وزن خشک، در سه راکتور ۵، ۷/۵ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر در سطح اطمینان بیشتر از ۹۵ درصد فرض صفر آزمون آماری را نقض می‌کند. این اتفاق بیانگر تاثیر بیشتر شوری بر مشخصات مورفولوژیک گیاه نسبت به بار آلی است. به دلیل استفاده از گیاهان بالغ در اجرای این آزمایش، مشخص می‌شود آبیاری گیاهان در طول دوره رشد و بلوغ نیز با آبی بوده که شوری و میزان بارآلی کمتری نسبت به فاضلاب‌های مصنوعی استفاده شده در این آزمایش دارد. در قدم بعدی با استفاده از روش رگرسیونی تعمیم یافته، تاثیر متقابل شوری و بارآلی موجود در هر کیفیت فاضلاب بر تغییر مشخصات مورفولوژیکی هر گیاه بررسی شد. به منظور بررسی ضریب تاثیر هر کدام از دو فاکتور شوری و بارآلی موجود در فاضلاب‌های مورد استفاده در آزمایش، از تفکیک واریانس و آزمون رگرسیون تعمیم یافته استفاده شد. در این آزمون فرض H0 بی‌تاثیر بودن هر کدام از دو پارامتر شوری و بارآلی در تغییر مشخصات مورفولوژیک گیاه و فرض H1 تاثیر این دو پارامتر بر مشخصات رشدی گیاه در نظر گرفته شد. اطلاعات مربوط به تاثیر شوری و بارآلی بر مشخصات رشدی گیاه وتیور در جدول (۲) آمده است.

بر اساس اطلاعات مندرج در این جدول، در سطح اطمینان ۹۵ درصد، تنها عامل تاثیر گذار بر پارامتر وزن خشک، حجم ریشه و میانگین قطر ساقه هدایت الکتریکی است. منفی بودن این ضریب که در ستون B جدول مقابل پارامتر هدایت الکتریکی (EC) درج شده است، حاکی از تاثیر منفی شوری و کاهش پارامترهای مورفولوژیک گیاه تحت تاثیر تنش شوری می‌باشد. با کاهش ضریب اطمینان به ۹۰ درصد، COD به عنوان پارامتر موثر در وزن خشک گیاه در خط رگرسیون عبوری خود را نشان می‌دهد. مثبت بودن ضریب COD در ستون B جدول، حاکی از کمک بارآلی موجود در فاضلاب به رشد وزنی گیاه می‌باشد. مقایسه پارامتر وزن خشک با سایر پارامترهای مورفولوژیک گیاه بیانگیر این حقیقت است که کاهش ضریب اطمینان باعث مشاهده تاثیر COD در تغییر سایر پارامترهای مورفولوژیک گیاه وتیور نمی‌شود. اطلاعات مربوط به تاثیر شوری و بارآلی بر مشخصات رشدی گیاه نخل مرداب در جدول (۳) آمده است. بزرگ بودن مقادیر منتسب به COD در ستون Sig جدول نشان دهنده عدم تاثیر قابل توجه میزان بارآلی بر ویژگی‌های رشدی نخل مرداب در بازه اطمینان ۹۵ درصد می‌باشد. ضریب تاثیر هدایت الکتریکی در هر سه جدول منفی و بیانگر تاثیر معکوس شوری بر روند رشد گیاه است. بدین معنی که با افزایش شوری هر سه مشخصه حجم ریشه، وزن خشک و میانگین قطر ساقه کاهش می‌یابد. در مورد پارامتر قطر ساقه و وزن خشک نخل مرداب، با کاهش بازه اطمینان تا حدود ۶۰ درصد، تاثیر بارآلی نیز در تغییر پارامترهای مورفولوژیک وارد می‌شود که از لحاظ آماری قابل اعتنا نیست. نکته قابل توجه دیگر در جداول مربوط به پارامترهای رشدی هر دو گیاه، عدم ترسیم جدول برای پارامتر میانگین سطح برگ می‌باشد. کشیدن خط رگرسیون برای پارامتر سطح برگ، ضریب R^2 برابر ۰/۲۷ یعنی از ۱ کوچک‌تر بود. دلیل این امر تبعیت نکردن پارامتر سطح برگ در گیاه نخل مرداب و وتیور از یک روند قابل پیش بینی و خطی بود.

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به این نکته که این گیاهان در یک حد شوری خاص با اقدام به پنجه زنی سعی می‌کنند با افزایش میزان زیست توده غلظت تجمعی یون‌های سمی را در بافت خود به حداقل برسانند. در نمودار تغییرات سطح برگ به میزان شوری فاضلاب، یک شکست محسوس به صورت سهمی معکوس مشاهده می‌شود. به همین دلیل ترسیم رگرسیونی تعمیم یافته برای اطلاعات سطح برگ صورت نگرفت. در نهایت می‌توان از تحلیل آماری مشخصات مورفولوژیک گیاه و رابطه دو پارامتر شوری و بارآلی فاضلاب نتیجه گرفت که در محدوده بارآلی مورد آزمایش، تغییر مشخصات رشدی سه پارامتر میانگین قطر ساقه، وزن خشک و حجم ریشه در بازه ۹۵ درصد اطمینان به صورت خطی تنها به میزان هدایت الکتریکی محلول فاضلابی که با آن تیمار شده‌اند، وابسته‌اند. با توجه به پایین بودن ضریب اطمینان وابستگی پارامتر سطح برگ به میزان بارآلی، می‌توان نتیجه گرفت که میانگین سطح برگ برای هر دو گیاه نخل مرداب و وتیور به صورت غیر خطی تنها به میزان هدایت الکتریکی فاضلابی که با آن آبیاری شده است وابسته می‌باشد. از سوی دیگر می‌توان نتیجه گرفت با وجود تاثیر مثبت و معنی دار COD در بازه اطمینان کمتر از ۹۰ درصد بر بعضی از ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه، بزرگ‌تر و منفی بودن اثر شوری باعث می‌شود پارامتر هدایت الکتریکی به عنوان تنها پارامتر موثر بر مشخصات مورفولوژیکی گیاهان شناخته شود. در پژوهشی مشابهی تاثیر کوددهی با کود آلی، لجن فاضلاب و کمپوست بر ویژگی‌های رشد گندم رقم الوند بررسی شده است. در این پژوهشی ۲ برابر کردن میزان کودآلی از ۳۰ به ۶۰ تن در هکتار تنها باعث افزایش قطر ساقه، در گندم رقم الوند شده است [24]

۳-۴- تحلیل آماری راندمان حذف شوری و بارآلی

در این قسمت برای بررسی این‌که گیاهان در کدام‌یک از تیمارها عملکرد بهتری در کاهش هدایت الکتریکی و بارآلی داشته‌اند از آزمون مقایسه T استفاده شد. در این آزمون همچنین معنی‌دار بودن تاثیر گیاهان در حذف شوری و بارآلی در راکتورها مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی آماری به منظور تایید نتایج بحث شده در رابطه با تغییر مشخصات مورفولوژیکی گیاه است. توضیحات کیفی مربوط به تغییرات سطح برگ، حجم ریشه و قطر ساقه در این بخش از لحاظ آماری و کمی مورد تحلیل قرار گرفته و صحت یا عدم درستی آن‌ها بررسی می‌شود.

جدول (۲) مشخصات رشدی گیاه وتیور

(a) Dependent variable: Dry Weight

Parameters	B	Std. Error	t	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Intercept	67.1	7.216	11.624	0.000	52.401	81.799
EC	-4.468	0.991	-4.509	0.000	-6.484	-2.449
COD	0.013	0.033	0.400	0.692	-0.054	0.080
EC * COD	0.019	0.010	1.881	0.069	-0.002	0.040

(b) Dependent variable: Root Volume

Parameters	B	Std. Error	t	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Intercept	80	8.301	9.638	0.000	63.092	96.908
EC	-4.164	1.140	-3.653	0.001	-6.486	-1.842
COD	-0.009	0.038	-0.249	0.805	-0.087	0.068
EC * COD	-0.002	0.012	-0.193	0.848	-0.026	0.022

(c) Dependent variable: Stem Width

Parameters	B	Std. Error	t	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Intercept	67.1	7.216	11.624	0.000	52.401	81.799
EC	-4.468	0.991	-4.509	0.000	-6.484	-2.449
COD	0.013	0.033	0.400	0.692	-0.054	0.080
EC * COD	0.019	0.010	1.881	0.069	-0.002	0.040

Table 2. Growth cahracteristics of *Chrysopogon Zizanioides*

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. مشخصات رشدی گیاه نخل مرداب

(a) Dependent variable: Dry Weight

Parameters	B	Std. Error	t	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Intercept	89.650	6.902	12.989	0.000	75.591	103.709
EC	-2.324	0.948	-2.452	0.020	-4.252	-0.394
COD	0.009	0.032	0.270	0.789	-0.056	0.073
EC * COD	0.018	0.01	1.801	0.081	-0.002	0.038

(b) Dependent variable: Root Volume

Parameters	B	Std. Error	t	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Intercept	73	11.121	6.564	0.000	50.347	95.653
EC	-1.72	1.527	-1.126	0.268	-4.831	1.391
COD	0.041	0.051	0.812	0.423	-0.062	0.145
EC * COD	0.008	0.016	0.505	0.617	-0.024	0.040

(c) Dependent variable: Stem Width

Parameters	B	Std. Error	t	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Intercept	10.890	0.851	12.802	0.000	9.157	12.623
EC	-0.259	0.117	-2.218	0.034	-0.497	-0.021
COD	-0.006	0.004	-1.667	0.105	-0.014	0.001
EC * COD	0.002	0.001	1.731	0.093	0.000	0.005

Table 3. Growth cahracteristics of *Cyperus Alternifolius*

دلیل انتخاب آزمون T، توانایی آن در مقایسه دوتایی پارامترهای آماری در مواقعی است که واریانس داده‌ها نامعلوم است. از این رو مقدار میانگین مربعات به عنوان برآورد ناأریب[1] از واریانس، به عنوان داده خام این آزمون مورد استفاده قرار گرفت. فرض H_0 در این آزمون، موثر نبودن وجود گیاهان در کاهش پارامترهای شوری و بارآلی است. این فرض اولیه با توجه به داده‌های جدول (٤) برای گیاه وتیور و با توجه به داده‌های جدول (٥) برای گیاه نخل مرداب در یک بازه اطمینان ۹۵ درصدی رد شد.

٤- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که با استفاده از روش گیاه‌پالایی در تالاب مصنوعی، در سطوح مختلف شوری و بارآلی به طور متوسط برای هر واحد گیاه وتیور ۱۷ درصد و هر واحد گیاه نخل مرداب ۱۵ درصد کاهش شوری و فاضلاب را در پی داشته است. روند کاهش میزان هدایت الکتریکی در هر دو گونه با افزایش سطح شوری، کاهش یافت. بیشترین میزان جذب نمک توسط گیاه نخل مرداب ۳۰ و وتیور ۵۳ درصد و در تیمار با فاضلاب دارای هدایت الکتریکی ۲/۵ دسی زیمنس بر متر مشاهده شد. کاهش توانایی جذب نمک در هر دو گونه به دلیل تکمیل ظرفیت تجمع نمک در بافت‌ها بود. هم چنین پژمردگی و کاهش عملکرد گیاه با افزایش هدایت الکتریکی محلول فاضلاب مشهود بود. روند کاهش میزان بارآلی نیز در هر دو گونه با افزایش سطح شوری، کاهش یافت بطوری که بیشترین راندمان کاهش COD توسط گیاه نخل مرداب در هدایت الکتریکی ۰ و بارآلی ۳۰۰ mg/L در حدود ۵۰ درصد و برای گیاه وتیور تحت شرایط یکسان در حدود ۵۸ درصد مشاهده شد. در نهایت گیاه وتیور برای گیاه‌پالایی انواع فاضلاب شور حاوی بارآلی مناسب تشخیص داده شد. گیاه نخل مرداب نیز گرچه به طور معنی‌داری نسبت به راکتورهای فاقد گیاه توانایی خوبی در حذف شوری و بارآلی نشان داد اما با این حال تحمل کمتر گیاه نسبت به شوری و همچنین درصد کمتر حذف نسبت به وتیور آن را به عنوان بهترین گزینه برای انجام گیاه پالایی قرار نمی‌دهد. بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها و ماهیت گیاهان بیشترین میزان سطح برگ، وزن خشک و قطر ساقه مربوط به گیاه وتیور و بیشترین حجم ریشه مربوط به گیاه نخل مرداب بدست آمد. تمامی این مشخصات با توجه به آستانه تحمل شوری توسط گیاه، از زمان انتقال به پایلوت تا بروز سمیت و پژمردگی در گیاهان مذکور روند افزایشی داشته و از آن به بعد ثابت مانده و یا در اثر از بین رفتن گیاه و تخریب بافت مربوطه دچار کاهش شد.

1 Unbiased Estimate

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤. نتایج آزمون مقایسه مستقل تاثیر وتیور

Parameter	Equal variances	T-test for Equality of Means			
		Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference
					Lower
COD=300 mg/L	assumed	.018	31.0000	10.4307	6.9467
	not assumed	.035	31.0000	10.4307	3.3812
COD= 225 mg/L	assumed	.027	22.4000	8.3066	3.2449
	not assumed	.049	22.4000	8.3066	.1783
COD= 150 mg/L	assumed	.012	23.2000	7.2250	6.5392
	not assumed	.029	23.2000	7.2250	3.6940
COD= 75 mg/L	assumed	.046	13.0000	5.5027	.3107
	not assumed	.075	13.0000	5.5027	-2.0692
EC= 2.5 dS/m	assumed	.005	35.8000	9.2163	14.5472
	not assumed	.018	35.8000	9.2163	10.2115
EC= 5 dS/m	assumed	.007	29.2000	8.1695	10.3612
	not assumed	.023	29.2000	8.1695	6.5180
EC= 7.5 dS/m	assumed	.076	10.2000	5.0140	-1.3623
	not assumed	.112	10.2000	5.0140	-3.7210
EC=10 dS/m	assumed	.010	7.6800	2.3096	2.3540
	not assumed	.029	7.6800	2.3096	1.2674

Table 4. T-Test result of *Chrysopogon Zizanioides*

جدول (٥) نتایج آزمون مقایسه مستقل تاثیر نخل مرداب

Parameter	Equal variances	t-test for Equality of Means			
		Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference
					Lower
COD=300mg/L	assumed	.027	24.2000	8.9185	3.6339
	not assumed	.044	24.2000	8.9185	.9480
COD= 225 mg/L	assumed	.050	15.9000	6.8957	-.0014
	not assumed	.074	15.9000	6.8957	-2.2683
COD= 150 mg/L	assumed	.044	12.3000	5.1614	.3978
	not assumed	.067	12.3000	5.1614	-1.2985
COD= 75 mg/L	assumed	.046	5.9200	2.5049	.1437
	not assumed	.067	5.9200	2.5049	-.6237
EC= 2.5 dS/m	assumed	.006	18.0000	4.8477	6.8212
	not assumed	.021	18.0000	4.8477	4.5407
EC= 5 dS/m	assumed	.021	10.9400	3.8332	2.1006
	not assumed	.046	10.9400	3.8332	.2973
EC= 7.5 dS/m	assumed	.060	5.4000	2.4617	-.2767
	not assumed	.093	5.4000	2.4617	-1.4348
EC=10 dS/m	assumed	.153	2.5000	1.5811	-1.1461
	not assumed	.189	2.5000	1.5811	-1.8899

Table 5. T-Test result of *Cyperus Alternifolius*

www.SID.ir

Archive of SID

۵- منابع References

[1] Ruan C. J., da Silva J. A. T., Mopper S., Qin P., & Lutts S. 2010 Halophyte improvement for a salinized world. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **29**(6), 329-359.

[2] Parida A. K., & Das A. B. 2005 Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, **60**(3), 324-349.

[3] Davis M. 2010 *Water and wastewater engineering*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.

[4] Zhang B. Y., Zheng J. S., & Sharp R. G. 2010 Phytoremediation in engineered wetlands: Mechanisms and applications. *Procedia Environmental Sciences*, **2**, 1315-1325.

[5] Lavelle P., & Spain A. V. 2001 Soil ecology. Springer Science & Business Media.

[6] Hewitt E. J. 1966 *Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition* (Vol. 431). Farnham Royal: Commonwealth Agricultural Bureaux.

[7] Shelef O., Gross A., & Rachmilevitch S. 2012 The use of Bassia indica for salt phytoremediation in constructed wetlands. *water research*, **46**(13), 3967-3976.

[8] White Jr P. M., Wolf D. C., Thoma G. J., & Reynolds C. M. 2003 Influence of organic and inorganic soil amendments on plant growth in crude oil-contaminated soil. *International journal of phytoremediation*, **5**(4), 381-397.

[9] Calheiros C. S., Rangel A. O., & Castro P. M. 2009 Treatment of industrial wastewater with two-stage constructed wetlands planted with Typha latifolia and Phragmites australis. *Bioresource technology*, **100**(13), 3205-3213.

[10] Calheiros C. S. C., Teixeira A., Pires C., Franco A. R., Duque A. F., Crispim L. F. C., & Castro P. M. L. 2010 Bacterial community dynamics in horizontal flow constructed wetlands with different plants for high salinity industrial wastewater polishing. *water research*, **44**(17), 5032-5038.

[11] Huang L., Zhuo J., Guo W., Spencer R. G., Zhang Z., & Xu J. 2013 Tracing organic matter removal in polluted coastal waters via floating bed phytoremediation. Marine pollution bulletin, **71**(1), 74-82.

[12] Souza F. A., Dziedzic M., Cubas S. A., & Maranho L. T. 2013 Restoration of polluted waters by phytoremediation using Myriophyllum aquaticum (Vell.) Verdc., Haloragaceae. *Journal of environmental management*, **120**, 5-9.

[13] Leto C., Tuttolomondo T., La Bella S., Leone R., & Licata M. 2013 Effects of plant species in a horizontal subsurface flow constructed wetland–phytoremediation of treated urban wastewater with *Cyperus alternifolius* L. and Typha latifolia L. in the West of Sicily (Italy). *Ecological engineering*, **61**, 282-291.

[14] Kumari M., & Tripathi B. D. 2014 Effect of aeration and mixed culture of Eichhornia crassipes and Salvinia natans on removal of wastewater pollutants. *Ecological Engineering*, **62**, 48-53.

[15] Schwarz M. (1995*). Soilless culture management. Springer-Verlag*.

[16] Mosleh Abadi p., Vosoughi M., Ghadirian M. 2010 A Mathematical Model for Soil Pollution Removal by Phytoremediation Independent of Environmental Parameters, *Water and Wastewater magazine*, **1**, 85-91.(In Persian)

[17] Wang X., Lu X., & Sun X. 2008 *Studies on development of Vetiver root system in the rejuvenation period after transplanting: A fertilizer experiment.*

[18] Wang S., Xu Z., & Li H. 2009 Influence of plant tillering and root volume on flow pattern and water purification of vertical down flow wetlands for domestic wastewater treatment. *Water Science & Technology*, **59**(1).

[19] Wu L., & Dodge L. 2005 *Landscape plant salt tolerance selection guide for recycled water irrigation*. A Special Report for the Elvenia J Slosson Endowment Fund, University of California, Davis article, 40.

[20] Zhang X., Gao B., & Xia H. 2014 Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **106**, 102-108.

[21] Tuttolomondo T., Licata M., Leto C., Leone R., & La Bella S. 2015 Effect of plant species on water balance in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland planted with Arundo donax L. and *Cyperus alternifolius* L.–Two-year tests in a Mediterranean environment in the West of Sicily (Italy).*Ecological Engineering*, **74**, 79-92.

[22] Ezzatian R. 2008 *Laboratory research and mathematical modeling for purification of oily polluted soils by phtoremidiation with using native plants*. Ph.D. Thesis, College of Environmental, Sciences and Research Branch, Azad University, Tehran. (In Persian)

[23] Stecher M. C., & Weaver R. W. 2003 Effects of umbrella palms and wastewater depth on wastewater treatment in a subsurface flow constructed wetland. *Environmental technology*, **24**(4), 471-478.

[24] Ahmadinejad M. Najafi, N. Asgharzad, N. Avestan, S. 012 Effects of Organic and Nitrogen Fertilizerson Water Use Efficiency, Yield and the Growth Characteristics of Wheat. *Water and Soil Science*, **23**, 177-194. (In Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

Statistical analysis of simultaneous removal of salinity and organic loading from wastewater using phytoremediation process

Hossein Kalhor[1], Hossein Ganjidoust [2*], Bita Ayati[3]

1- M. Sc. Student of Civil & Env. Eng., Faculty of Civil and Env. Eng., Tarbiat Modares University.
2- Prof., Env. Eng. Division, Civil & Env. Eng. Faculty, Tarbiat Modares University.
3- Assoc. Prof., Env. Eng. Division, Civil & Env. Eng. Faculty, Tarbiat Modares University.

***h-ganji@modares.ac.ir**

Abstract:

High salinity wastewater is one of the main environmental issues. Using biological treatment systems to treatment this kind of wastewater is hard due to loss of microorganisms. Phytoremediation is one of the main methods to treat this type of wastewater, which is an environmental friendly and a low cost process. In this research we aim to study operation of two plants, including *chrysopogon zizanioides* known as Vetiver grass and *Cyperus alternifolius* know as umbrella, to simultaneous removal of salinity and organic loading. We assume five different combination of wastewater which are called statistical treatments and characterized by different amount of salinity and COD. Statistical treatments contain wastewater with Electrical conductivity 0,2.5,5,7.5,10 (ds/m) and 0,75, 150, 250, 300 (mg/L) COD respectively. Pure water is used as control treatment. Results show that in reactors with low level of salinity, both plants have better operation in removing of salinity and organic loading. For electrical conductivity above 5 and 7.5 ds/m, signs of salinity stress including Chlorosis and withering seen in leaves of both plants. For *chrysopogon zizanioides*, different statistical treatments results in different removal of organic loading range from of 60 to 12 percent. Salinity removal is ranged from 53 to 4 percent. For *Cyperus alternifolius* reduction in organic loading and salinity are respectively varied from 49 to 5 and 20 to 1 percent.

Results of this study in laboratory scale shows that using phytoremediation method in constructed wetland for different combination of salinity and organic loading results in 17 and 15 percent reduction in salinity and wastewater for each unit of *chrysopogon zizanioides* and *Cyperus alternifolius* respectively. By increasing the level of salinity the trend of electrical conductivity is decreased. For the wastewater with 2.5 ds/m electrical conductivity, the most absorbing salinity absorbing is seen for both plants, which is 53 percent for *chrysopogon zizanioides* and 30 percent for *Cyperus alternifolius*. Reduction in capability of absorbing salt occurred for both plants due to completeness of salt aggregation capacity of the plant. By increasing the electrical conductivity of wastewater solution, wither and reduction in operation of the plant is seen as well.

Increasing the salinity level results in decreasing the trend of organic loading reduction.

COD removal for *chrysopogon zizanioides* is greater than *Cyperus alternifolius* in all reactors, which is related to natural characteristics of this plant, higher tolerance of salinity fluctuations and different phytoremediation mechanism.

In statistical analysis of morphological characteristics of plants, the statistical population is all plants for different combination of wastewater and statistical controls. For each plant, results of different statistical treatments are compared to each other. The null hypothesis for independent tests assumes that the waste water treatment doesn't have effect on morphological characteristics of the plant. So, rejecting this hypothesis means that all combination of wastewater doesn't have the same effect on morphological characteristics. This hypothesis is considered separately for each of morphological characteristics by use of two sided independent sample T-test. These characteristics included dry weight, mean leaf area, mean stem diagonal and root volume. Results indicate that increasing salinity will affect the morphological characteristics with 95% confidence. Fitting the generalized linear regression shows that existing of organic loading doesn't have meaningful effect on morphological characteristics, and level of salinity of wastewater affect the growing characteristics of the plant.

Keywords:

Phytoremediation, Statistical analysis, *Chrysopogon zizanioides*, *Cyperus alternifolius*

www.SID.ir