

**"مقاله پژوهشی"****قابلیت گیاه‌پالایی منگنز و کروم موجود در پساب تصفیه‌خانه توسط نهال‌های ارغوان، توت سفید، زیتون تلخ و سرو خمره‌ای****بهاره سلاح‌ورزی^۱، حمید جلیلوند^۲، سید محمد حجتی^۳ و محمدرضا پور‌مجیدیان^۴**

۱- دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و آکولوژی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (نویسنده مسؤول: h.j_458_hj@yahoo.com)

۳- دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۴- استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۱۵

صفحه ۱۴۷ تا ۱۵۸

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: امروزه شهرهای بزرگ به دلیل آلودگی هوا نیازمند فضای سبز بیشتری هستند که با توجه به کمبود آب در شهرهایی که در مناطق خشک واقع شده‌اند جهت آبیاری فضای سبز باید به منابع نامتعارف مانند پساب‌ها روی آورد؛ اما با توجه به آلودگی‌های موجود در این منابع، باید از گونه‌هایی با قابلیت گیاه‌پالایی بالا استفاده کرد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق نهال‌های دوساله چهار گونه ارغوان، توت سفید، زیتون تلخ و سرو خمره‌ای در گلستان‌های کاشته شدند. نهال‌ها با پساب تصفیه‌خانه آب غرب تهران که حاوی منگنز و کروم بود، از اسفند ۹۵ تا مهر ۹۶ آبیاری شدند.

یافته‌ها: مقدار کروم و منگنز در اندام‌های گونه‌های آبیاری شده با پساب نسبت به آب معمولی افزایش معنی‌داری نشان داد؛ اما هر چهار گونه آبیاری شده با پساب تصفیه‌خانه رشد و نمو یکسانی در مقایسه با گونه‌های آبیاری شده با آب معمولی داشتند. بیشترین مقدار منگنز در برگ و کروم در ریشه هر چهار گونه بود. ضریب تجمع زیستی کمتر از یک، برای منگنز در هر چهار گونه نشان داد که قابلیت انبیاش این عنصر را ندارند؛ اما هر چهار گونه ارغوان (۱/۸۷)، توت (۲/۰۷)، سرو خمره‌ای (۱/۹۶) و زیتون تلخ (۱/۸۳) با داشتن فاکتور انتقال بیشتر از یک، برای برداشت منگنز مناسب هستند؛ هر چند به دلیل این که ضریب تجمع زیستی در آنها کمتر از یک است، نیاز به بررسی بیشتر وجود دارد. توت سفید و زیتون تلخ با ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال کمتر از یک، برای کروم مشخص شد که هیچ‌یک برای انبیاش و برداشت کروم مناسب نیستند؛ ولی ارغوان (۱/۳۹) و سرو خمره‌ای (۱/۴۳) با ضریب تجمع زیستی بیشتر از یک و فاکتور انتقال کمتر از یک، قابلیت انبیاش کروم در ریشه‌ها را دارند.

نتیجه‌گیری: می‌توان نتیجه گرفت که ارغوان و سرو خمره‌ای هم توان انبیاش کروم و هم توان برداشت منگنز را دارند و گونه‌های بهتری برای گیاه‌پالایی این دو عنصر در خاک آبیاری شده با پساب هستند. نتایج این پژوهش مؤید آن است که استفاده مجدد از پساب این تصفیه‌خانه با توجه به عدم کاهش پارامترهای رشد هر چهار گونه، می‌تواند راه کار مناسبی برای جبران کمبود آب در تهران باشد؛ ولی بررسی‌های بیشتر و پایش شرایط به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین گونه‌ها برای پالایش فلزات سنگین و همچنین اثرات طولانی مدت آبیاری با پساب الزامی است.

واژه‌های کلیدی: انبیاش گیاهی، برداشت گیاهی، ضریب تجمع زیستی، فاکتور انتقال، فلزات سنگین، کمبود آب

موثر عناصر سمی را در بافت‌های خود ذخیره می‌کنند و تولید زی توده بیشتری دارند. در حقیقت هنوز گونه‌های درختی که به دلیل طول عمر بیشتر نسبت به گونه‌های علفی در فرایند طولانی تصفیه محیط از آلودگی موثرترند، به طور کامل و صحیح شناخته نشده‌اند (۱۴،۵۳). بنابراین انتخاب مناسب یعنی گونه‌هایی با سیستم ریشه‌ای توسعه یافته و قابلیت تبخیر و تعرق بالا برای تثبیت فلزات و یا استخراج آن‌ها در موقوفیت فرآیند گیاه‌پالایی موضوعی حیاتی است (۴۲،۵۳). در تهران روزانه صدها لیتر فاضلاب خانگی و صنعتی و حتی بیمارستانی رها می‌شود که به آب‌های زیزمه‌نی نفوذ می‌کند. از طرفی گسترش بی‌رویه شهر و آلودگی هوای آن باعث افزایش نیاز به فضای سبز بیشتر می‌شود. از آنجایی که کمبود آب عامل محدودکننده ایجاد فضای سبز است، لذا می‌توان از ۸۰ درصد آب مصرفی شهرهای تهران که به پساب تبدیل می‌شود، برای توسعه نهال‌کاری و ایجاد کمرندهای جنگلی و گذر از بحران خشک‌سالی استفاده کرد (۳۲). یکی از انواع پساب‌های موجود در تهران پساب تصفیه‌خانه‌ای آب شرب است. تاکنون مطالعاتی در خصوص واکنش درختان گوناگون از جمله انواع بلوط، انواع کاج، افاقتی، راش، صوبه، بید، توس، توسکا، چنار و زبان گنجشگ نسبت به غلظت‌های مختلف فلزات سنگین در خاک و آب انجام شده است

مقدمه

در کشورهای مدیرانه‌ای تقاضا برای منابع محدود آب به طور مداوم افزایش می‌یابد؛ بنابراین در این منطقه و سایر مناطق خشک جهان به‌منظور مقابله با کمبود آب، پساب منبعی ارزشمند برای استفاده مجدد در آبیاری در نظر گرفته می‌شود (۳۸). اگرچه استفاده از پساب می‌تواند مکمل‌های تقدیمی که اثر مطلوبی بر تولید و رشد گیاهان دارد را نیز فراهم کند؛ اما با تخریب ساختمان خاک و داشتن آلودگی‌های خط‌رنگی مانند فلزات سنگین کیفیت خاک را تغییر می‌دهد (۱۰). غلظت بالای فلزات سنگین در محیط بر سلامت بشر اثرات شدید گذاشته و افزایش غلظت آنها با ایجاد تغییرات در فرآیند های طبیعی موجب اختلال در عملکرد بوم‌سامانه‌ها می‌شود (۱۸،۵۰). یافتن روش‌های مناسب برای سازگاری و کاهش خطر و اثرات منفی ناشی از این عناصر سمی در محیط زیست بسیار مهم است. یکی از ابزارهای حفاظتی، روش‌هایی زیستی مانند گیاه‌پالایی است. این روش که از نظر اقتصادی بسیار مقرر و به صرفه است، راه حلی با تأثیر بلند مدت پس از فراهم کردن شرایط بنیادی و اجرای کامل است که از منظر زیبایی محیط هم اهمیت بسزایی دارد (۳۷). انتخاب گیاهان مناسب یعنی آنها که مقاوم‌ترند، تحت شرایط محیطی آلوده قادر به زنده ماندن و رشد بیشتر هستند، به طور

کرج زیر نظر سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور تهیه و پس از اندازه‌گیری ابعاد اولیه در گلستان‌های سه لیتری که با خاک غیر آلوه و معمولی نهالستان پر شده بودند، در اسفند ۹۶ در محلی در مجاورت تصفیه‌خانه غرب تهران در رده‌های شامل سه تکرار بیست‌تایی برای هر نوع آب (پساب و آب معمولی) مستقر شدند. هر دو ماه یک‌بار ارتفاع و قطر یقه نهال‌ها و در انتهای فصل رویش مقدار زی توده تر و خشک برگ، ساقه و ریشه نهال‌ها اندازه‌گیری شد (۳۰، ۴۵). نمونه‌های آب (پساب و آب معمولی) هر ماه از فروردین تا مهر ۹۶ از تصفیه‌خانه فراهم شد که شامل نه نمونه آب معمولی در هر ماه (سه روز در ماه و هر روز سه نمونه در سه ساعت بین هفت صبح تا یک بعد از ظهر برای تهیه نمونه‌های ترکیبی از هر روز) بود (۴۹). بنابراین از ابتدای تا پایان فصل رویش ۱۰۸ نمونه آب شامل پساب و آب معمولی تهیه شد. نمونه‌های خاک در پایان فصل رویش از خاک محل رسیده در عمق صفر-۱۵ سانتی‌متری جمع‌آوری شدند که برای هر گونه (ارغوان، توت، سرو خمره‌ای و زیتون تلخ) از هر نوع آب، در هر تکرار یک نمونه به صورت تصادفی سیستماتیک انتخاب شد و در گیسه پلاستیکی به آزمایشگاه منتقل شد. همچنین برای چهار گونه ارغوان، توت، سرو خمره‌ای و زیتون تلخ از دو نوع آب پساب و آب معمولی در هر تکرار یک نهال به صورت تصادفی سیستماتیک انتخاب شد و پس از جاسازی بخش‌های مختلف به آزمایشگاه منتقل شد.

روش‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق واکنش (pH) و هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌های آب در محل جمع‌آوری اندازه‌گیری، سپس با رساندن pH نمونه‌ها به کمتر از دو، (با افزودن یک میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب) نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و در دمای چهار درجه سانتی‌گراد برای جلوگیری از میکروبی شدن نگهداری شدند (۲). سپس نیترات نمونه‌های آب با روش نیتراتاسیون اسید سالیسیلیک با دستگاه اسپکتروفوتومتر (۴۱)، فسفات با روش کالری‌متری با استفاده از کلرید استانو با دستگاه اسپکتروفوتومتر، پتاسیم به روش فلیم فوتومتر (۱۲) و فلزات سنگین نمونه‌های آب نیز با جذب اتمی با شعله (۲) اندازه‌گیری شدند. همچنین، در آزمایشگاه تجمع عنصری مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزم، کلسیم، منگنز و کروم در نمونه‌های خاک و در اندام‌های مختلف نهال شامل: ریشه، ساقه و برگ در پایان فصل رویش قبل از خزان اندازه‌گیری شد. پس از انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه ابتدای در هوای آزاد و سپس در آون در دمای ۴۰ درجه سانتی-گراد خشک شده و در نهایت پس از خرد شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. واکنش (pH) نمونه‌های خاک از روش پتانسیومتری با استفاده از دستگاه pH متر و هدایت الکتریکی (EC) با دستگاه هدایت‌سنچ (۴۴)، کربن الی خاک به روش تیتراسیون با تعییر رنگ ارتوفنانترولین (روش والکی و بلاک) اندازه‌گیری شد. نیتروژن موجود در خاک با استفاده از روش تیتراسیون بعد از مراحل هضم و تقطیر در سیستم کجدال (۳۷)، فسفر خاک به روش اولسن با دستگاه اسپکتروفوتومتر و پتاسیم خاک از روش عصاره‌گیری با استات

(۱۷، ۳۵، ۳۶، ۴۲۵۰) صنعتی، شهری و خانگی بر خاک و گیاهان تحت آبیاری بررسی شده است (۸۰، ۴۸، ۴۹). اما تحقیقات بسیار کمی در مورد اثر پساب تصفیه‌خانه‌های آب بر درختان و درختچه‌های بومی و مورد استفاده در کشور عناصر موجود در این نوع در حالی است که بررسی ابتدایی عناصر موجود در این نوع پساب به لحاظ فلزات سنگین و عناصر تغذیه‌ای نشان می‌دهد که این پساب نسبت به سایر پساب‌های صنعتی و خانگی به حدود مجاز برای استفاده در آبیاری فضای سبز غیر مضر نزدیک‌تر است (۴۵، ۲۳). به نظر می‌رسد با یک پیش‌تصفیه و کاهش مقدار فلزات سنگین می‌توان از این پساب برای آبیاری فضای سبز غیر مضر استفاده کرد.

از این رو هدف این تحقیق تعیین اثرات پساب تصفیه‌خانه آب شرب غرب تهران که تا کنون تحقیقی بر روی آن انجام نشده است بر رشد و پالایش (ابناشت و برداشت) منگنز و کروم توسط نهال‌های دوساله چهار گونه درختی ارغوان، توت سفید، زیتون تلخ و سرو خمره‌ای، بود. در این مطالعه فرضیه‌های زیر مورد توجه قرار گرفت: ۱- آبیاری با پساب موجب کاهش پارامترهای رشد نهال‌ها نمی‌شود. ۲- تعدادی از گونه‌های مورد مطالعه در گیاه‌پالایی منگنز و کروم مؤثر هستند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محل پیاده‌سازی تحقیق مجاور تصفیه‌خانه آب شرب غرب تهران که تأمین کننده آب شرب منطقه غرب تهران است و در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی در ارتفاع ۱۳۳۰ متری بالاتر از سطح دریا با میانگین بارندگی سالیانه ۴۶۰/۱ میلی متر و میانگین دمای سالیانه ۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد قرار داشت. در این منطقه با اقلیم خشک (طبق روش هماقليم سیلیانینف) تیمهای با میانگین دمای ۳۳/۶ درجه سانتی‌گراد گرم‌ترین و دی‌ماه با میانگین دمای ۱/۱ درجه سانتی‌گراد سردترین ماه‌های سال هستند (۴۴). آب ورودی به تصفیه‌خانه غرب با دبی هشت متر مکعب در ثانیه که از رودخانه کرج تأمین و به صورت شیمیایی با کلوروفریک تصفیه می‌شود. پس از تصفیه آب ورودی با انجام فرآیندهای تصفیه، این آب تبدیل به آب شرب شده وارد شبکه می‌شود که در مراحل مختلف فرآیند تصفیه از شامل زلال سازی انعقاد و فیلتراسیون یا عبور از صافی‌ها علاوه بر تولید آب شرب، پس ابی هم تولید و در خوبچه‌های تخلیه می‌شود که حاوی ناخالصی‌هایی از جمله فلزات سنگین است و روزانه معادل ۱۹۰۰۰ تا ۲۲۰۰۰ متر مکعب است (۵۱).

روش انجام تحقیق

برای انجام این تحقیق تعدادی از نهال‌های هماندازه و سالم دوساله گونه‌هایی که در فضای سبز شهری تهران متداول و یا نیاز آبی کمتری دارند و در سال‌های اخیر بیشتر مورد اقبال هستند، شامل ارغوان (*Cercis siliquastrum* L.), توت سفید (*Morus alba* L.), زیتون تلخ (*Melia azedarach* L.) و سرو خمره‌ای (*Thuja orientalis* L.) از نهالستان بزرگ

شاپیرو-ویلک انجام، سپس همگنی واریانس گروهها، با آزمون لون بررسی شد. آزمایش فاکتوریل با دو فاکتور گونه (ارغوان، توت، زیتون تلخ و سرو خمره‌ای؛ در چهار سطح)، نوع آب آبیاری (پساب و آب معمولی (شاهد)، در دو سطح) و با سه تکرار مساوی بیست تایی (میانگین) در قالب طرح کاملاً تصادفی پیاده شد. برای انجام مقایسه میانگین‌های پارامترهای رشد از آزمون مقایسه گروهی میانگین‌های SNK استفاده شد. برای داده‌های غیر نرمال از انواع تبدیل‌ها بر حسب نوع پارامترها، استفاده شد. برای داده‌هایی که نرمال نشدن از آزمون‌های ناپارامتری یا آزاد توزیع از قبیل کروسکال والیس استفاده شد.

نتایج و بحث

آب

نتایج تجزیه آب و پساب مورد استفاده برای آبیاری که در جدول ۱ ارائه شده نشان داد که واکنش، هدایت الکتریکی و مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، منگنز و کروم در پساب تصفیه‌خانه به طور معناداری ($p < 0.01$) نسبت به مقادیر آن‌ها در آب معمولی بالاتر است و به طور میانگین میزان منگنز $13/5$ برابر و کروم $2/5$ برابر در پساب نسبت به آب معمولی بیشتر است. اما مقدار کلسیم در پساب و آب معمولی تفاوت معناداری نداشت (جدول ۲). استفاده از پساب برای آبیاری دارای مزایایی از قبیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است؛ چراکه افزودن پساب به خاک به دلیل غنی بودن از عناصر تغذیه‌ای و مواد آلی مشابه یک کود یا تقویت کننده ارگانیک عمل کرده و موجب افزایش غلظت مواد مغذی و حاصل‌خیزی خاک می‌شود (۱۶) هرچند که آبیاری با پساب در کنار این امتحان، موجب تجمع فلزات سمی در خاک می‌شود و همین موضوع استفاده از آن را برای آبیاری محصولات کشاورزی و درختان مشمر محدود می‌کند؛ اما استفاده آز این نوع آب برای آبیاری فضای سبز شهری گزینه مناسبی است (۱۶, ۳).

آمونیوم یک مولار با $\text{pH} = 7$ اندازه‌گیری شد (۴). به منظور اندازه‌گیری غلظت کلسیم، منیزیم، منگنز و کروم در نمونه‌های خاک تهیه شده، از روش استخراج با بافر EDTA استفاده و در نهایت از محلول استخراج شده برای اندازه‌گیری فلزات با دستگاه جذب اتمی استفاده شد (۳۹). اندام‌های مختلف گیاه برای محاسبه زی توده تر توزین و در نهایت دمای ۷۰ درجه به مدت ۴۸ ساعت خشک و در نهایت قسمت‌های مختلف گیاه توزین و زی توده خشک محاسبه شد (۲۴). هر یک از اندام‌های گیاه به طور جداگانه آسیاب و از الک استیل ۵۰۰ میکرومتری عبور داده و عمل هضم انجام شد (۲۶). برای تعیین غلظت منگنز و کروم اندام‌های گیاهی، ابتدا نمونه‌ها هضم اسیدی و در نهایت غلظت فلزات نمونه‌های گیاهی با دستگاه جذب اتمی خوانده شد (۳۹).

روش محاسبه ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال
(Bioconcentration factor) (BCF) و فاکتور انتقال (TF) (Translocation factor)، مشخص کننده توانایی گیاهان برای تحمل و تجمع غلظت سنتگین در اندام‌ها است که این پارامترها با استفاده از نسبت غلظت فلز در ریشه بر مقدار فلز در خاک (ضریب تجمع زیستی ریشه)، غلظت فلز در اندام‌های هوایی تقسیم بر مقدار فلز در خاک (ضریب تجمع زیستی اندام‌های هوایی) و غلظت فلز در اندام‌های هوایی تقسیم بر غلظت فلز در ریشه (فاکتور انتقال) با روابط زیر محاسبه شد (۱۵).

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{ضریب تجمع زیستی ریشه (BCF)} = \frac{\text{غلظت فلز در خاک}}{\text{غلظت فلز در ریشه}}$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{ضریب تجمع زیستی اندام هوایی (BCF)} = \frac{\text{غلظت فلز در خاک}}{\text{غلظت فلز در ریشه}}$$

$$\text{رابطه (۳)} \quad \text{فاکتور انتقال (TF)} = \frac{\text{غلظت فلز در ریشه}}{\text{غلظت فلز در ریشه / غلظت فلز در اندام هوایی}}$$

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای اکسل و SAS نسخه ۹/۱ انجام شد. ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون

جدول ۱- میانگین (\pm اشتیاه معیار) ویژگی‌های شیمیایی پساب تصفیه‌خانه غرب تهران و آب معمولی

Table 1. Chemical characteristics of water treatment plant effluent and ordinary water (mean \pm SE)

WHO	EPA USA	پساب غرب تهران	آب معمولی	متغیر
۶/۵-۸/۵	۶/۵-۸/۵	۸/۱۲±۰/۰۳ ^a	۸/۱۶±۰/۰۳ ^b	واکنش
۳/۰۰	۳/۰۰	۰/۳۳±۰/۰۱ ^a	۰/۳۲±۰/۰۱ ^b	هدایت الکتریکی (دیزیمنس بر متر)
		۲/۲۳±۰/۰۳ ^a	۰/۲۱±۰/۰۱ ^b	نیتروژن (میلی گرم بر لیتر)
		۴/۴۸±۰/۰۳ ^a	۰/۴۷±۰/۰۳ ^b	فسفر (میلی گرم بر لیتر)
		۳/۱۸±۰/۰۲ ^a	۲/۱۲±۰/۰۲ ^b	پتاسیم (میلی گرم بر لیتر)
۵۰/۰۰	۵۰/۰۰	۱۶/۴۱±۰/۰۳ ^a	۱۱/۴۵±۰/۰۵ ^b	منیزیم (میلی گرم بر لیتر)
۷۵/۰۰	۷۵/۰۰	۵۹/۴۳±۰/۰۴ ^a	۴۹/۷۷±۰/۰۴ ^b	کلسیم (میلی گرم بر لیتر)
۱/۰۰	۰/۲۰	۰/۱۱±۰/۰۰۵ ^a	۰/۰۶±۰/۰۰۲ ^b	منگنز (میلی گرم بر لیتر)
۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۰۴±۰/۰۰۲ ^a	۰/۰۲±۰/۰۰۱ ^b	کروم (میلی گرم بر لیتر)

EPA USA: آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، WHO: سازمان بهداشت جهانی (۲۳) استانداردهای تعیین حدود مجاز عناصر برای مصارف شرب. حروف متفاوت انگلیسی

(a) و (b) در ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنادار ($p < 0.01$) میانگین ویژگی شیمیایی است.

جدول ۲- تجزیه واریانس مشخصه‌های شیمیایی آب و خاک پس از آبیاری با پساب و آب معمولی

Table 2. Analysis of variance of chemical characteristics of water and soil after irrigation with effluent and ordinary water

آب										
کروم	منگنز	منزیم	کلسیم	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	هدایت	واکنش	درجه	منبع
۱۶۲/۳۴**	۱۷۷۲/۸**	۶۳۹۹۶**	۳۲۴۴۹۵۸	۹۵۴۳۲/۶**	۹۳۹۱۲**	۴۵۶۶۱۷**	۶۲/۲۸**	۲۱۷/۷۶**	۱	آب
خاک										
کروم	منگنز	منزیم	کلسیم	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	کربن آلی	هدایت الکتریکی	واکنش	درجہ آزادی
F مقادار	F مقادار	F مقادار	F مقادار	F مقادار	F مقادار	منبع تعییرات				
۵۱/۳۹**	۹۰/۰۸	۴۶/۶۴**	۱۱/۰۲۸	۹/۳۰**	۶/۴۹	۲۱/۲۷**	۵۳/۶۳**	۱۴/۸۱**	۱۱/۱۴**	۳ گونه
۱۶/۲۳**	۱۷/۷۳**	۶۳/۹۱**	۳۲/۲۴**	۹۵/۶**	۹۳/۲۹**	۴۸/۳۷**	۱/۱۵ ns	۶۳/۲۸**	۲۲/۷۶**	۱ آب
۶/۶۳**	.۰/۲۹ ns	.۰/۱۷ ns	.۰/۰۳ ns	.۰/۱۳ ns	.۰/۱۳ ns	.۰/۲۲ ns	.۰/۴۰ ns	.۰/۲۱ ns	.۰/۰۳ ns	۳ گونه×آب

ns نبود معنی داری، **: معنی دار در سطح یک درصد

جدول ۳- مقایسه ویژگی‌های شیمیایی خاک پیش از آبیاری و پس از هفت ماه آبیاری با آب معمولی و پساب (میانگین ± استاندار معیار)

Table 3. Comparison of mean soil chemical properties before irrigation and after seven months of irrigation with ordinary water and effluent (mean ± SE)

نمونه خاک پیش از آبیاری شده با آب معمولی	نمونه خاک آبیاری شده با آب معمولی	نمونه خاک پیش از آبیاری شده با پساب	متغیر	نمونه خاک آبیاری شده با پساب	نمونه خاک آبیاری شده با آب معمولی	نمونه خاک آبیاری شده با آب معمولی	نمونه خاک آبیاری شده با پساب	متغیر
۱/۱۱ ^a ±۰/۰۷	۱/۰۴ ^a ±۰/۰۹	۰/۸۲	هدایت الکتریکی	۸/۲۱ ^a ±۰/۰۲	۸/۱۷ ^a ±۰/۰۲	۷/۹۵	واکنش	
۱۹۲/۸۸ ^a ±۹/۱۵	۱۶۴/۰۱ ^b ±۱/۱۶	۱۰۰/۱۱	منزیم	۱/۴۵ ^a ±۰/۰۹	۱/۳۳ ^a ±۰/۱۸	۱/۲۱	مواد آلی	
۱۵۰/۱۷۵ ^a ±۱۱۶/۵۳	۱۰۲۸/۴۰ ^b ±۰/۰۷۲۳	۸۵/۰۹۰	کلسیم	۰/۱۱ ^a ±۰/۰۰	۰/۱۱ ^a ±۰/۰۰	۰/۰۹	نیتروژن	
۵۷۸/۴۸ ^a ±۱۴/۴۵	۴۳۵/۷۳ ^b ±۱۴/۳۴	۳۴۶/۰۹	منگنز	۳۰/۵۰ ^a ±۱/۱۹	۲۸/۳۳ ^a ±۰/۰۸۵	۲۷/۲۳	فسفر	
۳۶/۹۴ ^a ±۰/۶۸	۳۱/۰۳ ^b ±۰/۰۵	۲۳/۵۰	کروم	۲۷۸/۲۳ ^a ±۱۶/۳۵	۲۶۵/۱۰ ^a ±۱۵/۳۸	۲۵۵/۰۰	پتاسیم	

حروف متفاوت انگلیسی (a) و (b) در ستون ها نشان دهنده تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) میانگین ویژگی شیمیایی است؛ مواد آلی و نیتروژن (درصد)، هدایت الکتریکی (دستی زیمنس بر متر) (بقهه (میلی گرم بر کیلوگرم))

ارتفاعی، قطر برابر سینه، رویش قطری، وزن تر و خشک برگ، ساقه و ریشه هر چهار گونه، آبیاری شده با پساب در مقایسه با آب معمولی نشان نداد و فقط قطر برابر سینه و رویش قطری زیتون تلخ آبیاری شده با پساب در مقایسه با آب معمولی افزایش معنادار داشت ($p < 0.05$). همچنین رویش ارتفاعی ($p < 0.01$) و رویش قطری ($p < 0.05$) سروخمره‌ای آبیاری شده با پساب در مقایسه با آب معمولی افزایش معنادار نشان داد (جدول ۴). شواهد بسیاری در مورد افزایش، کاهش و یکسان بودن مؤلفه‌های رشد پس از استفاده از پساب برای آبیاری گیاهان وجود دارد (۲۲). مشابه نتایج این تحقیق که در اکثر مشخصه‌ها، رشد و نمو یکسانی برای هر چهار گونه مشاهده شد، در مطالعات گوناگون رشد و نمو بهتر گیاهان چوبی در پی استفاده از پساب و لجن آن برای آبیاری و کوددهی گزارش شده که می‌توان به تحقیق بوریوگ و همکاران (۱۳) در مورد افزایش رشد گونه *Larix decidua* و مطالعات هوانگ و همکاران (۲۵) در خصوص بهبود رشد گونه *Paeonia suffruticosa* اشاره کرد. پساب موجب بهبود ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک در شهرها که دارای خاکی ضعیف، سخت و تخریب شده در نتیجه توسعه ناپایدار هستند، می‌شود (۵۶). پساب علاوه بر افزایش غلظت مواد معدنی خاک در بهبود تراکم، تخلخل، ظرفیت نگهداری آب و تنظیم pH خاک نقش مهمی دارد که مجموع این عوامل تأثیر بسزایی در جذب مواد غذایی و افزایش رشد طیف گسترده‌ای از گیاهان دارد (۱۱،۵۵).

نتایج مربوط به بررسی نمونه‌های خاک قبل و بعد از آبیاری نشان داد که ۲۳۰ روز آبیاری با پساب در لایه سطحی خاک (۱۵-۰) سانتی‌متر، افزایش معنادار ($p < 0.01$) (میزیم، کلسیم، منگنز و کروم را در مقایسه با خاک آبیاری شده با آب معمولی به همراه داشت. در حالی که واکنش، هدایت الکتریکی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و مواد آلی در خاک آبیاری شده با هر دو نوع آب تفاوت معناداری نداشتند. دویست و سی روز آبیاری با پساب تصفیه خانه غرب تهران موجب افزایش ۳۲/۷۶ درصدی منگنز و ۱۹/۰۸ درصدی کروم در خاک آبیاری شده با پساب در مقایسه با آب معمولی شد (جدول ۲ و ۳). اما میزان هیچ‌یک از این عناصر به حد سمیت خاک که توسط سالارینی (۴۳) تعیین شده بود (منگنز $0/2$ گرم بر کیلوگرم و کروم $0/5$ گرم بر کیلوگرم) نرسید. کروم از حد مجاز تعیین شده برای خاک توسط کابانا پندیاس (۲۹)، (50 میلی گرم بر کیلوگرم) کمتر، اما منگنز از حد مجاز تعیین شده توسط یو اس ای به ای (۵۲) (80 میلی گرم بر کیلوگرم) بیشتر بود. بهطور کلی انباشت فلزات سنگین در خاک در پی کاربرد پساب به عوامل متعددی از قبیل غلظت فلزات، زمان استفاده از پساب و ویژگی‌های خاک از قبیل pH، یافت و مواد آلی بستگی دارد و از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند (۲۱).

مشخصه‌های رشد نهال
بر اساس نتایجی که در شکل ۱ آورده شده آبیاری با پساب و آب معمولی تا ۲۳۰ روز تفاوت معناداری در ارتفاع، رویش

جدول ۴- تجزیه واریانس مشخصه‌های روشی گونه‌ها پس از آبیاری با پساب و آب معمولی

گونه	مقادیر F	ارتفاعی رویش	ارتفاعی مقادیر F	قطری رویش	قطری مقادیر F	وزن برگ ساقه	وزن خشک برگ	وزن تر ریشه	وزن تر ساقه	وزن خشک ریشه	وزن برگ ساقه	وزن تر ریشه	وزن تر ساقه	وزن خشک ریشه
ارغوان	۰/۲۳ns	۰/۳۷ns	۰/۰۱ns	۰/۳۳ns	۰/۱۹ns	۲/۹۳ns	۳/۱۰ns	۱/۲۵ns	۲/۵۹ns	۱/۲۵ns	۶/۵۰ns	۰/۰۹ns	۰/۱۹ns	۰/۰۱ns
توت	۰/۴۳ns	۰/۲۳ns	۰/۲۳ns	۱/۸۰ns	۲/۱۴ns	۰/۴۷ns	۰/۵۷ns	۰/۰۹ns	۰/۶۴ns	۰/۰۹ns	۰/۲۶ns	۰/۰۹ns	۰/۷۸ns	۰/۲۱ns
زیتون	۰/۱۸ns	۰/۰۶ns	۱۱/۴۵*	۹/۱۶*	۱/۰۴ns	۰/۷۸ns	۰/۳۰ns	۰/۰۴ns	۰/۰۴ns	۰/۰۴ns	۰/۲۱ns	۰/۰۴ns	۰/۰۷ns	۰/۲۵ns
سرخ	۲/۹۵ns	۲/۸۱**	۰/۳۴ns	۱۲/۷۳*	۵/۹۳ns	۰/۲۹ns	۰/۴۴ns	۶/۳۳ns	۰/۰۷ns	۰/۰۷ns	۰/۲۹ns	۰/۰۷ns	۰/۰۷ns	۰/۰۷ns

ns: معنی دار در سطح پنج درصد و **: معنی دار در سطح یک درصد

(۴۸/۸۷±۰/۰۶) میلی‌گرم بر کیلوگرم در ریشه ارغوان مشاهده شد که این مقدار با غلظت این عنصر در ریشه سه گونه دیگر، تفاوت معناداری داشت ($p<0.01$) و به ترتیب ۱/۱۲۵، ۱/۶۷ و دو برابر بیشتر از مقدار کروم در ریشه سرو خمره‌ای، توت سفید و زیتون تلح بود. افزایش معنادار فلزات سنگین در اندام‌های نهال‌ها ممکن است به دلیل افزایش آن‌ها در خاک به دنبال آبیاری با پساب باشد (۳۳). در همین راستا مادجون (۳۱) و بدیبیز و همکاران (۹) روی و منگنز را در برگ درختان زیتون و بلوط آبیاری شده با پساب مشاهده کردند. در حالی که البزیدی و همکاران (۳) تفاوت معناداری در غلظت منگنز و کروم در برگ درختان نخل آبیاری شده با پساب تشخیص ندادند.

تجمع فلزات سنگین در اندام‌های نهال‌ها

دوست و سی روز، آبیاری با پساب تصفیه‌خانه، منجر به تفاوت معنادار در تجمع غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف نهال‌ها شد؛ به طوری که برگ، ساقه و ریشه نهال‌های آبیاری شده با پساب حاوی مقدادر بالاتر منگنز و کروم بود ($p<0.01$) (جدول ۵) و (شکل ۱ و ۲). مقدادر منگنز و کروم نیز در بین گونه‌های مختلف نیز تفاوت نشان داد ($p<0.01$) (جدول ۵) و (شکل ۳). بیشترین غلظت منگنز در خانه (۱۴۱/۷۵±۰/۰۲۶) میلی‌گرم بر کیلوگرم در برگ زیتون تلح مشاهده شد که این مقدار با غلظت این عنصر در برگ سه گونه دیگر، تفاوت معنادار داشت ($p<0.01$) و به ترتیب ۱/۱۷، ۱/۲۳ و ۱/۵۲ برابر بیشتر از مقدار این عنصر در برگ توت سفید، ارغوان و سرو خمره‌ای بود. بیشترین غلظت کروم

جدول ۵- تجزیه واریانس فلزات سنگین در چهار گونه پس از آبیاری با پساب و آب معمولی

متغیرها	آب	آب ساقه	آب ریشه	منبع تغییرات	آب	آب ساقه	آب ریشه	منبع تغییرات	آب	آب ساقه	آب ریشه	منبع تغییرات	آب	آب
کروم برگ	۱۰/۵۳**	۴۹/۵۳**	۴۲/۱۸**	۱۰/۰۹**	۳۴/۰۸*	۱۷۲/۷۸**	۴۴/۳۴**	۹۸/۲۸**	۱۶۰/۰۴**	۱۹/۸۳**	۱۴/۰۹**	۱۴۱/۷۵**	۰/۰۹**	۰/۰۹**
کروم ساقه	۵۰/۱۳**	۴۹/۶۳**	۴۲/۱۸**	۵۰/۰۱**	۶۵/۷۲**	۱۲/۸۷**	۶۵/۷۲**	۱۴/۰۹**	۱۶۰/۰۴**	۱۲۷۴/۶۰**	۴۱۷/۲۰**	۱۴۰/۹۰**	۱۹/۸۳**	۱۹/۸۳**
کروم ریشه	۲۰۰/۷۳**	۴۲/۱۸**	۴۲/۱۸**	۲۰۰/۰۷**	۱۵۹/۷۵**	۲۳۸/۴۸**	۱۵۹/۷۵**	۴۱۷/۲۰**	۱۶۰/۰۴**	۱۲۳/۴۲**	۱۵/۴۶**	۱۵/۴۶**	۱۹/۸۳**	۱۹/۸۳**
منگنز برگ	۵۱۱/۵۶**	۱۵۴/۸۸**	۱۵۴/۸۸**	۵۱۱/۰۵**	۴۰۶/۱۱**	۶۲۰/۲۹**	۴۰۶/۱۱**	۱۵/۴۶**	۱۶۰/۰۴**	۲۲۸/۱۵**	۶۳/۰۰**	۶۳/۰۰**	۱۹/۸۳**	۱۹/۸۳**
منگنز ساقه	۷۲۶/۵۶**	۴۳۲/۴۷**	۴۳۲/۴۷**	۷۲۶/۰۱**	۱۸۰/۰۵**	۷۰۱/۱۹**	۱۸۰/۰۵**	۶۳/۰۰**	۱۶۰/۰۴**	۱۰۲/۸۸**	۳۳۲/۵۶**	۳۳۲/۵۶**	۰/۰۹**	۰/۰۹**
منگنز ریشه	۸۱۵/۸۳**	۱۱۷۸/۰۸**	۱۱۷۸/۰۸**	۸۱۵/۰۱**	۱۳۹۳/۸۵**	۲۷۲/۵۹**	۱۳۹۳/۸۵**	۳۳۲/۵۶**	۱۶۰/۰۴**	۱۹/۸۳**	۱۹/۸۳**	۱۹/۸۳**	۰/۰۹**	۰/۰۹**

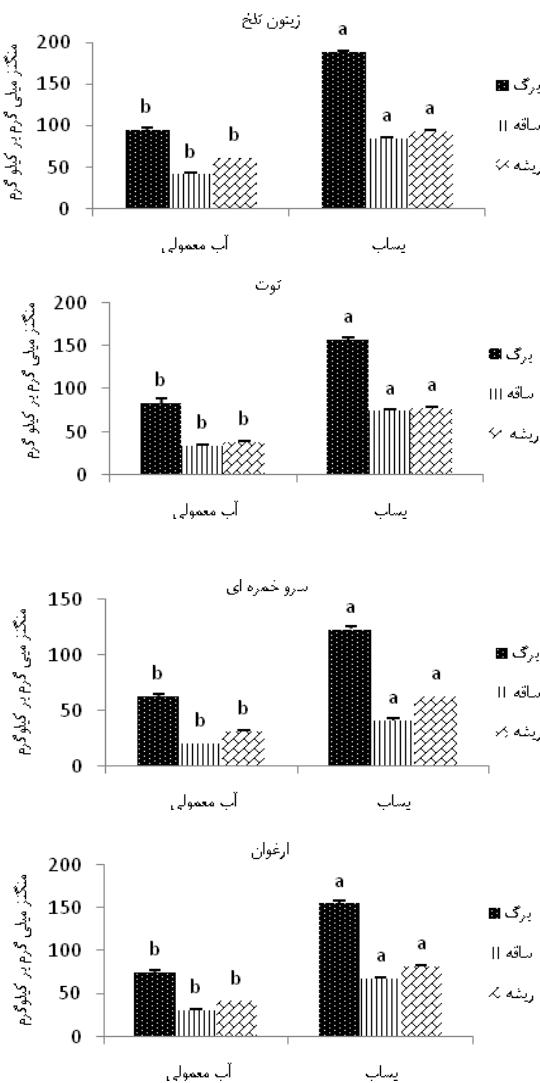
**: در سطح یک درصد معنی دار است. مقدار F در مقایسه آب معمولی و پساب

مختلف در منطقه صنعتی زنجان دریافتند که برگ *Populus nigra* بهترین جذب منگنز را در میان هشت گونه بومی دارد. همچنین الواز و همکاران (۶) بیان کردند که تجمع منگنز در اندام‌های درختان متفاوت است و تجمع آن در برگ *Frangula alnus* حدود چهار برابر برگ *Salix atrocinerea* و *Quercus robur* سه برابر شاخه است و به طور کلی میزان تجمع منگنز در *Frangula alnus* نسبت به دو گونه دیگر بیشتر است. تجمع بیشتر منگنز در برگ‌های پیر و در حال خزان نسبت به برگ‌های سبز آبیاری شده با پساب در گونه سرو نقره‌ای نشان دهنده مکانیسم دفاعی برای خروج مقدادر بیش از حد این عنصر است. به طور کلی ممکن است ترکیب شیمیایی اجزای

غلظت منگنز در برگ هر چهار گونه نسبت به سایر اندام‌ها بیشتر بود و به ترتیب در برگ زیتون تلح، توت سفید، ارغوان و سرو خمره‌ای مقدادر بالاتر نداشت. بطور کلی، عناصر غیر ضروری و سمی برای گیاهان مانند سرب بیشتر در ریشه تجمع دارد که می‌توان آن را یک راه کار تدافعی گیاهان دانست. در عین حال عناصر ضروری مانند منگنز و روی که در فرایند فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌ها نقش عمده ایفا می‌کنند بیشتر در بخش‌های هوایی گیاه مانند برگ و ساقه تجمع دارند (۵). در این راستا تحقیقات دسای و همکاران (۱۷) حاکی از آن بود که برگ *Betula pendula* نسبت به *Alnus glutinosa* مقدادر بیشتری منگنز جذب می‌کند. همچنین صبا و همکاران (۴۲) در مطالعاتشان بر روی گیاه‌پالایی عناصر

غلاظت ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم محدوده سمی و غلاظت ۲۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم محدوده قابل قبول منگنز برای گیاهان است. سالارینی (۴۳) حد بحرانی را ۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و سازمان بهداشت جهانی (۵۴) حد مجاز منگنز در گیاهان را ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم دانسته است. مقدار منگنز در نمونه‌های مختلف اندام‌های هر چهار مجاز و بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی بالاتر از حد سمی در گیاهان است.

گیاهان، منعکس‌کننده ترکیب شیمیابی خاکی است که در آن رشد می‌کنند و آبی که با آن آبیاری شده‌اند. اما این ارتباط توسط عوامل مختلف و پیچیده دیگری از جمله عوامل محیطی، مانند ویژگی‌های خاک از نظر واکنش، میزان مواد آلی خاک، ظرفیت تبادل عناصر و همچنین نوع گونه‌ها کنترل می‌شود. به هر حال تصور تعیین یک الگوی خاص برای جذب عناصر توسط گونه‌های گیاهی مختلف غیر ممکن است چرا که این فرایند پیچیده تنها با یک عامل کنترل نمی‌شود (۲۰). بر اساس گزارش کاباتا پندیاس و پندیاس (۲۸)



شکل ۱- مقایسه غلاظت منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در برگ، ساقه و ریشه نهال‌های آبیاری شده با پساب و آب معمولی حروف متفاوت انگلیسی (a و b) در ستون‌های هم الگو نشان دهنده تفاوت معنادار $p < 0.01$ میانگین ویژگی شیمیابی است.

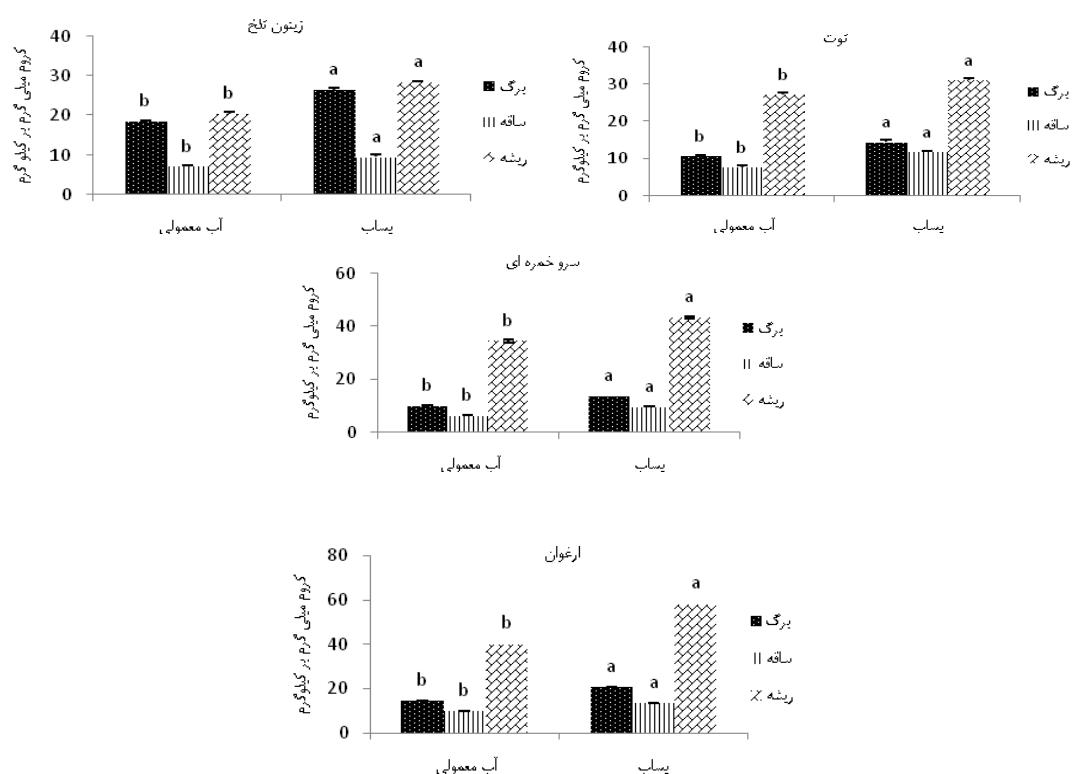
Figur 1. Comparison of Content of manganese (mg kg^{-1}) in the leaves, stems, and roots of seedlings growing under two types of water irrigation; ordinary water and water treatment plant effluent. Different superscripts (a and b) in the same pattern column indicate significant differences ($p < 0.01$)

مکانیسم خاصی برای جذب و انتقال این عنصر ندارند. ریشه‌ها عموماً حاوی مقادیر بیشتری از فلزات سمی مانند کروم نسبت به قسمت‌های هوایی گیاه هستند، که احتمالاً یک مکانیسم مقابله با سمیت عناصر در گیاهان از طریق

غلاظت کروم در ریشه هر چهار گونه نسبت به ساقه و برگ بیشتر بود و به ترتیب در ریشه ارغوان، سرو خمره‌ای، توت سفید و زیتون تلخ بیشترین مقادیر را داشت. کروم یک عنصر غیر ضروری و سمی برای گیاهان است؛ بنابراین گیاهان

کردن که بهترین جذب کروم توسط برگ مغایر با نتایج این تحقیق است؛ اماً نقاوت گونه‌ها در جذب این عنصر تأییدی بر نتایج این تحقیق است. تحقیقات بتارسه و همکاران (۸) نیز نشان داد که با وجود این که غلظت کروم در پساب بسیار کم بود، باز هم مقدار قابل توجهی از این عنصر در برگ درختان زیتون و مقدار نسبتاً کمتری از آن در میوه دیده شد. در حالی که با وجود غلظت بالای عناصری مانند نیکل و سرب در پساب مقدار جزیی از این دو عنصر در برگ و میوه زیتون مشاهده شد؛ که این موضوع اگر چه بر خلاف نتایج تحقیقات ما است اماً فرضیه جذب انتخابی عناصر توسط درختان را تأیید می‌کند. محدوده مجاز کروم در گیاهان ۵ تا ۱۰ و محدوده سمی ۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است (۲۸). با این حال اتحادیه اروپا (۱۹) مقدار مجاز این عنصر برای گیاهان را $2/3$ میلی‌گرم در کیلوگرم عنوان کرد. بنابراین مطابق هر دو استاندارد مقدار کروم در اندازه‌های مختلف گونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق که بین $8/73$ تا $58/25$ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، در محدوده سمی برای گیاهان است.

توقف فلزات در واکوئل‌های سلول‌های ریشه است (۴۷). مشابه با نتایج به دست آمده در این تحقیق، شاه و همکاران (۴۶) بیشترین انباشت کروم را در ریشه اوکالیپتوس ثبت کردن. همچنین تجمع بیشتر کروم در ریشه‌های توت سفید نسبت به شاخه‌ها در بی‌آبیاری با مخلوط کمپوست فاضلاب شهری و پساب‌های باغی همانند این تحقیق توسط سی و همکاران (۴۸) مشاهده شد. با این حال رفعتی و همکاران (۴۰) بالاترین غلظت کروم را در برگ‌های صنوبر و توت سفید مشاهده کردن و آن را نوعی مکانیسم تدافعی در فرایند گیاه‌پالایی برای خروج مقادیر اضافی این عنصر سمی در پایان فصل رویش تفسیر کردند. همچنین این محققان با ثبت انباشت بیشتر این فلز در برگ‌های *P. alba* نسبت به برگ‌های *M. alba* تفاوت عملکرد گونه‌ها را در جذب فلزات سنگین مانند تحقیق حاضر تأیید کردند. اشدق و همکاران (۷) هم بر خلاف نتایج بدست آمده در این تحقیق در بررسی چرخه کروم در خاک، توت سفید و کرم ابریشم این عنصر را فقط در برگ توت سفید مشاهده کردند. همچنین صبا و همکاران (۴۲) برگ سرو نقره‌ای را دارای بهترین جذب کروم در میان هشت گونه بومی در منطقه صنعتی زنجان معرفی



شکل ۲- مقایسه غلظت کروم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در برگ، ساقه و ریشه نهال‌های آبیاری شده با پساب و آب معمولی حروف متفاوت انگلیسی (a) و (b) در ستون‌های هم الگو نشان دهنده تفاوت معنادار $p < 0.01$ میانگین ویژگی شیمیایی است

Figur 2. Comparison of Content of chromium (mg kg^{-1}) in the leaves, stems, and roots of seedlings growing under two types of water irrigation; ordinary water and water treatment plant effluent. Different superscripts (a and b) in the same pattern column indicate significant differences ($p < 0.01$)

ضریب برای منگنز در ریشه زیتون تلخ (۱۶/۰) مشاهده شد. بیشترین مقدار فاکتور انتقال برای منگنز در برگ (۰/۷۰) و در ساقه (۰/۹۳) در توت سفید دیده شد (جدول ۳). بیشترین

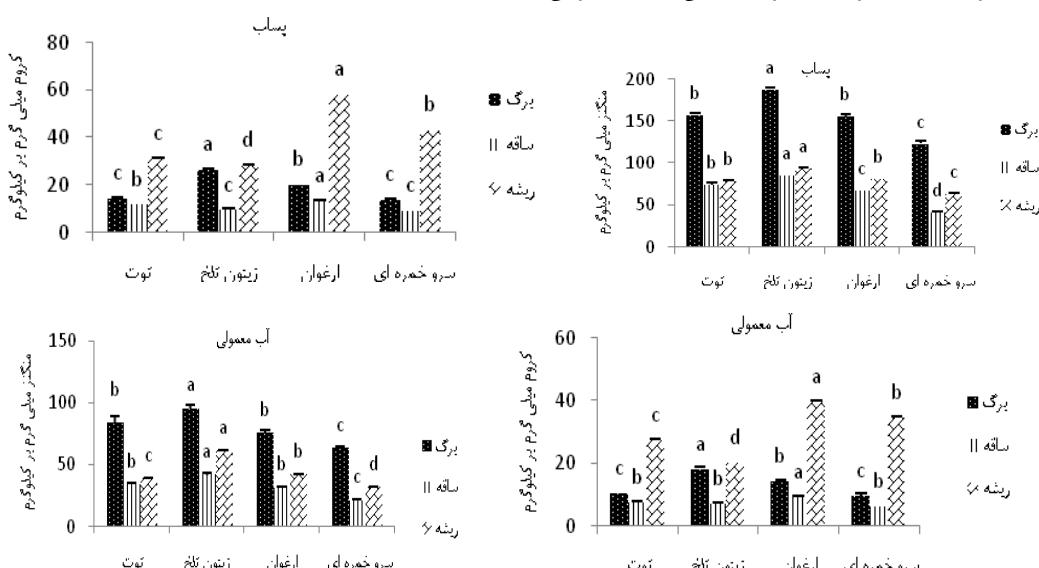
گیاه‌پالایی

بیشترین مقدار ضریب تجمع زیستی منگنز در برگ (۰/۳۲) و ساقه (۰/۱۴) توت سفید و بیشترین مقدار این

گیاه‌پالایی منگنز در نارون مشابه عملکرد چهار گونه مورد مطالعه ما در برداشت منگنز است. به این ترتیب هیچ یک از این چهار گونه برای تثبیت منگنز مناسب نیستند؛ اما هر چهار گونه با داشتن فاکتور انتقال بیشتر از یک برای برداشت منگنز مناسب هستند، هر چند که به دلیل این که ضریب تجمع زیستی برگ در آنها کمتر از یک است، بررسی‌های بیشتر ضروری است.

ضریب تجمع زیستی ریشه برای کروم به ترتیب در ارغوان، سرو خمره‌ای، توت سفید و زیتون تلخ بیشتر بود؛ ولی فقط در ارغوان و سرو خمره‌ای بیشتر از یک بود. میزان فاکتور انتقال برای این عنصر به ترتیب در زیتون تلخ، توت سفید، ارغوان و سرو خمره‌ای بیشتر بود؛ اما در هر چهار گونه کمتر از یک بود. سی و همکاران (۴۸) در بررسی اثرات مخلوط فاضلاب شهری و پساب باگی بر توت سفید ضریب تجمع زیستی کمتر از یک را برای کروم در این گونه مشاهده کردند. رفتی و همکاران (۴۰) نیز مشاهده کردند که ضریب تجمع زیستی کروم در توت سفید و صنوبر کمتر از یک و فاکتور انتقال بیشتر از یک بود. در تحقیق حاضر توت سفید و زیتون تلخ مشابه طلالات پیشین با ضریب تجمع زیستی کمتر از یک برای انباست کروم و فاکتور انتقال کمتر از یک برای برداشت این عنصر و انتقال به شاخه‌ها و برگ‌ها مناسب نیستند. اما گونه‌های ارغوان و سرو خمره‌ای برخلاف تحقیقات قبل دارای ضریب تجمع زیستی بالاتر از یک و فاکتور انتقال کمتر از یک برای کروم هستند؛ بنابراین این دو گونه دارای قابلیت انباست کروم و قادر توان برداشت آن هستند.

ضریب تجمع زیستی برای کروم در برگ زیتون تلخ (۰/۷۶)، ساقه (۰/۳۲) و ریشه (۱/۳۹) ارغوان مشاهده شد. بیشترین مقدار فاکتور انتقال کروم در برگ (۰/۹۲) و ساقه (۰/۳۴) زیتون تلخ مشاهده شد (جدول ۶). ضریب تجمع زیستی ریشه برای منگنز در هر چهار گونه کمتر از یک و بهتریت در زیتون تلخ، توت سفید، ارغوان و سرو خمره‌ای بیشتر بود. اما میزان فاکتور انتقال برگ برای منگنز در هر چهار گونه بیشتر از یک و بهتریت در توت سفید، سرو خمره‌ای، ارغوان و زیتون تلخ بیشتر بود. در این راستا عباسلو و بختیاری (۱) اعلام کردند که ضریب تجمع زیستی منگنز در هر دو گونه اوکالپیتوس و عرععر در تمام تیمارها کمتر از یک و فاکتور انتقال در برخی تیمارها بیشتر از یک بود. بنابراین می‌توان گفت گونه‌های مورد مطالعه ما در فرایند برداشت منگنز مشابه اوکالپیتوس و عرععر عمل می‌کنند. افزون برآن، مولچک و همکاران (۳۵) نیز ضریب تجمع زیستی کمتر از یک و فاکتور انتقال بیشتر از یک برای منگنز را در گونه بید (Salix viminalis) مشاهده و همانند نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر دلیل آن را غلظت بالای این عنصر در خاک و انتقال مؤثر منگنز از ریشه به برگ بید مشابه گونه‌های مورد مطالعه ما عنوان کردند. مولچک و همکاران (۳۶) در مطالعات دیگری، در نهال‌های نمدار (Tilia cordata) مقدار ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال بیشتر از یک را ثبت کردند که با نتایج ما مغایر بود؛ بنابراین تشابهی در رفتار گیاه‌پالایی منگنز توسط نمدار و گونه‌های این تحقیق وجود ندارد، اما در نارون (Ulmus laevis) ضریب تجمع زیستی کمتر از یک و فاکتور انتقال بیشتر از یک را برای منگنز تشخیص دادند. بنابراین



شکل ۳- مقایسه غلظت کروم و منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم) در برگ، ساقه و ریشه نهال‌های توت سفید، زیتون تلخ، ارغوان و سرو خمره‌ای آبیاری شده با آب معمولی و پساب حروف متفاوت انگلیسی (a و b) در ستون هم الگو نشان دهنده تفاوت معنادار $p < 0.01$ میانگین ویژگی شیمیایی است

Figur 3. Comparison of Content of manganese and chromium (mg kg^{-1}) in the root, stem, and leaves of four tree species *M. alba*, *M. azedarach*, *C. siliquastrum* and *T. orientalis* seedlings growing under ordinary water and water treatment plant effluent Different superscripts (a and b) in the same color column indicate significant differences ($p < 0.01$)

جدول ۶- ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال منگنز و کروم در نهالهای گونه‌های (توت سفید، زیتون تلخ، ارغوان و سرو خمره‌ای)

Table 6. Bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF) values for manganese and chromium in four tree species *M. alba*, *M. azedarach*, *C. siliquastrum* and *T. orientalis* seedlings

گونه	اندام	برگ	ساقه	ریشه	توت سفید	برگ	ساقه	ریشه	زیتون تلخ	برگ	ساقه	ریشه	توت سفید	برگ	ساقه	ریشه	زیتون تلخ	برگ	ساقه	ریشه
منگنز	BCF	.۰/۳۲	.۰/۱۴	.۰/۱۵	.۰/۱۳	.۰/۳۰	.۰/۱۵	.۰/۱۶	.۰/۲۱	.۰/۱۱	.۰/۰۹	.۰/۰۹	.۰/۰۵	.۰/۰۸	.۰/۱۵	.۰/۱۱	.۰/۱۵	.۰/۰۵	.۰/۰۸	
کروم	TF	.۲/۰۷	.۰/۹۳	-	.۱/۸۳	.۰/۸۲	-	.۰/۸۰	.۱/۸۷	-	.۰/۶۶	.۱/۹۶	.۰/۲۰	-	.۰/۲۱	.۰/۰۴	.۰/۲۱	.۰/۳۱	.۱/۳۹	.۰/۳۲
منگنز	BCF	.۰/۳۸	.۰/۲۹	.۰/۸۷	.۰/۷۶	.۰/۲۸	.۰/۰۸۳	.۰/۴۹	.۰/۳۲	.۰/۳۹	.۰/۰۴	.۰/۰۲	.۰/۰۲	.۰/۰۲	.۰/۳۰	.۰/۰۲	.۰/۲۰	.۰/۰۳۰	.۰/۰۲۰	
کروم	TF	.۰/۳۳	.۰/۳۳	-	.۰/۹۲	.۰/۳۴	.۰/۰۹۲	-	.۰/۲۳	.۰/۳۵	-	.۰/۰۲	.۰/۰۲	.۰/۰۲	.۰/۰۲	.۰/۰۲	.۰/۰۲	.۰/۰۲	.۰/۰۲	

ضریب تجمع زیستی :BCF ، فاکتور انتقال :TF ، bioconcentration factor :BCF

کروم و هم توان برداشت منگنز را دارند گونه‌های مناسب برای گیاه‌پالایی این دو عنصر در خاک آبیاری شده با پساب هستند. به همین دلیل انتخاب گونه مناسب نقش کلیدی در پروسه گیاه‌پالایی فلزات سنگین موجود در پساب دارد. از طرف دیگر آبیاری نهال‌ها با پساب تصفیه‌خانه غرب تهران منجر به افزایش حاصل‌خیزی خاک و رشد و نمو یکسان نهال‌ها با آبیاری معمولی شد. بنابراین می‌توان گفت مدیریت صحیح آبیاری از طریق نظارت مداوم خاک، بررسی رشد و نمو و انتخاب گونه‌های مناسب برای افزایش کارایی گیاه‌پالایی برای اطمینان از استفاده طولانی مدت، بی‌خطر و موفق پساب ضرورتی غیر قابل انکار است.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج این تحقیق، هر چهار گونه توان سازگاری و رشد مناسب با مقادیر بالای منگنز و کروم در آب و خاک را دارند و گونه‌های نسبتاً مناسبی برای برداشت منگنز هستند. گونه‌های ارغوان و سرو خمره‌ای با ضریب تجمع زیستی بیشتر از یک توان انباشت کروم را در ریشه‌های خود دارند و برای گیاه‌پالایی این عنصر مناسب هستند؛ اما توت سفید و زیتون تلخ با داشتن ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال کمتر از یک توان انباشت و برداشت کروم را ندارند؛ بنابراین برای گیاه‌پالایی این عنصر عملکرد مناسبی نداشتند. در نتیجه می‌توان گفت ارغوان و سرو خمره‌ای که هم توان انباشت

منابع

- Abbaslou, H. and S. Bakhtiari. 2017. Phytoremediation potential of heavy metals by two native pasture plants (*Eucalyptus grandis* and *ailanthus altissima*) assisted with AMF and fibrous minerals in contaminated mining regions. Pollution, 3(3): 471-486.
- Aghabarati, A. 2006. Effect of irrigation with municipal effluent on soil chemical characteristics and growth of Olive (*Olea europaea*) in Rey Town green Space M.Sc. thesis. Department of forestry. College of natural resources and marine sciences. Tarbiat Modares University, 100 pp (In Persian).
- Al-Busaidi, A., R. Al-Yahyai and M. Ahmed. 2015. Heavy metal concentrations in soils and Date Palms irrigated by groundwater and treated wastewater. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 52(1): 129-134.
- Aliehyaei, M. and A.A. Behbahanzadeh. 1993. Descriptions of methods for soil chemical analysis (Vol. I). No. 893. Soil and Water Research Institute. Agricultural Research, Extension and Education Organization. Ministry of Agriculture, 116 pp (In Persian).
- Alloway, B.J. 2013. Heavy metals in soils. Trace metals and metalloids in soil and their bioavailability. 3rd Edition. Soil Research Center, Department of Geography and Environmental Science, School of Human and Environmental Science, University of Reading Whiteknights, Reading, UK. 613 pp.
- A'lvarez, E., M.L. Ferna'ndez Marcos, C. Vaamonde and M.J. Ferna'ndez-Sanjurjo. 2003. Heavy metals in the dump of an abandoned mine in Galicia (NW Spain) and in the spontaneously occurring vegetation. Science of the Total Environment, 313: 185-197.
- Ashfaq, M., S. Ahmad, M. Sagheer, M.A. Hanif, S.K. Abbas and M. Yasir. 2012. Bioaccumulation of chromium (III) in silkworm (*Bombyx mori* L.) in relation to mulberry, soil and wastewater metal concentrations The Journal of Animal & Plant Sciences, 22(3): 627-634.
- Batarseh, M.I., A. Rawajfeh, K.K. Ioannis and K.H. Prodromos. 2011. Treated municipal wastewater irrigation impact on Olive Trees (*Olea Europaea* L.) at Al-Tafileh, Jordan. Water Air &Soil Pollution, 217: 185-196.
- Bedbabis, S., G. Ferrara, B.B. Rouina and M. Boukhris. 2010. Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term. Scientia Horticulturae, 126: 345-350.
- Belaïda, N., C. Neel, J.F. Lenain, R. Buzier, M. Kallel, T. Ayoub, A. Ayadi and M. Bauduc. 2012. Assessment of metal accumulation in calcareous soil and forage crops subjected to long-term irrigation using treated wastewater: case of El Hajeb-Sfax, Tunisia. Agriculture, Ecosystems & Environment, 158: 83-93.
- Belhaj, D., N. Elloumi, B. Jerbi, M. Zouari, F.B. Abdallah, H. Ayadi and M. Kallel. 2016. Effects of sewage sludge fertilizer on heavy metal accumulation and consequent responses of sunflower (*Helianthus annuus*). Environmental Science and Pollution Research, 23: 20168-20177.

12. Binaye Motlagh, P. 2010. Instructions and methods for measuring the physicochemical and toxic mineral chemicals in drinking water. Ministry of Health and Medical Education, Deputy Minister of Health, Environmental and Occupational Health Center, 74 pp (In Persian).
13. Bourioug, M., L. Alaoui-Sehmer, X. Laffray, M. Benbrahim, L. Aleya and B. Alaoui-Sossé. 2015. Sewage sludge fertilization in larch seedlings: Effects on trace metal accumulation and growth performance. Ecological Engineering, 77: 216-224.
14. Chen, B., Y. Zhang, M.T. Rafiq, K.Y. Khan, F. Pan, X. Yang and Y. Feng. 2014. Improvement of cadmium uptake and accumulation in *Sedum alfredii* by endophytic bacteria *Sphingomonas* SaMR12: effects on plant growth and root exudates. Chemosphere, 117: 367-373.
15. Cheraghi, M., B. Lorestani, N. Khorasani, N. Yousefi and M. Karami. 2011. Findings on the phytoextraction and phytostabilization of soils contaminated with heavy metals. Biological Trace Element Research, 144(1-3): 1133-1141.
16. Chu, Sh., D. Wu, L.L. Liang, F. Zhong, Y. Hu, X. Hu, C. Lai and Sh. Zeng. 2017. Municipal sewage sludge compost promotes *Mangifera persiciforma* tree growth with no risk of heavy metal contamination of soil. Scientific Reports. 7(1): 13408. DOI: 10.1038/s41598-017-13895-y
17. Desai, M., M. Haigh and H. Walkington. 2019. Phytoremediation: Metal decontamination of soils after the sequential forestation of former opencast coal land. Science of the Total Environment, 656: 670-680.
18. Ehrampoush, M.H., M. Miria, M.H. Salmani and A.H. Mahvi. 2015. Cadmium removal from aqueous solution by green synthesis iron oxide nanoparticles with tangerine peel extract. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 13(1):84. DOI: 10.1186/s40201-015-0237-4
19. EU, 2006. Commission regulation (EC) No. 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Official Journal of European Union. L364/5- L364/5.
20. Farahat, E. and H.W. Linderholm. 2015. The effect of long-term wastewater irrigation on accumulation and transfer of heavy metals in *Cupressus sempervirens* leaves and adjacent soils. Science of the Total Environment. (512-513): 1-7. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.032.
21. Filipović, L., M. Romić, D. Romić, V. Filipović and G. Ondrašek. 2018. Organic matter and salinity modify cadmium soil (phyto) availability. Ecotoxicology and Environmental Safety, 147: 824-831.
22. Fuentes, D., A. Valdecantos, J. Llovet, J. Cortina and V.R. Vallejo. 2010. Fine-tuning of sewage sludge application to promote the establishment of *Pinus halepensis* seedlings. Ecological Engineering, 36: 1213-1221.
23. Hach, C. 2002. Water Analysis Handbook. Loveland, Colorado, USA. 1260 pp.
24. Hopmans, P., H.T.L. Stewart, D.W. Flinn and T.J. Hillman. 1990. Growth, biomass production and nutrient accumulation by seven tree species irrigated with municipal effluent at wodonga Australia. Journal of Forest Ecology and Management, 30: 203-221.
25. Huang, X., D. Xue and L. Xue. 2015. Changes in soil microbial functional diversity and biochemical characteristics of tree peony with amendment of sewage sludge compost. Environmental Science and Pollution Research, 22: 11617-11625.
26. Jackson, M.L. 1973. Soil Chemical Analyze. Prentice Hall of India Private Ltd., New Delhi. 498 pp.
27. Safari Haghighi, M. 2003. Soil analysis, sampling and important physical and chemical analysis method with emphasis on theory and application basics, Nedaye zoha press, Sari, Iran, 236 pp (In Persian).
28. Kabata-Pendias, A. and H. Pendias.1984. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, USA, 365 pp.
29. Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. 4thed. Edition. CRC Press/Taylor and Francis. Boca Raton, Florida, USA, 548 pp.
30. Khodakarami, Y., A. Shirvany, Zh. Vardanyan and H. Sohrabi. 2015. Evaluation of cadmium absorption in different soil textures by black locust (*Robinia pseudoacaci* L.), round-leaf ash (*Fraxinus rotundifolia* Miller) and Arizona cypress (*Cupressus arizonica* Green). Iranian Journal of Forest and poplar Research, 23(4): 617-625 (In Persian).
31. Madejon, P., T. Maranon and J.M. Murillo. 2006. Biomonitoring of trace elements in the leaves and fruits of wild olive and holm oak trees. Science of the Total Environment, 355: 187-203.
32. Matin, A. 1993. Irrigation with urban waste water a solution for water shortage. Iranian Journal of Pajouhesh- Va Sazandgi, 25: 18-22 (In Persian).
33. Meli, S., M. Porto, A. Belligno, S.A. Bufo, A. Mazzatura and A. Scopa. 2002. Influence of irrigation with lagooned urban wastewater on chemical and microbiological soil parameters in a *Citrus orchard* under Mediterranean condition. Science of the Total Environment, 285: 69-77.
34. Meteorological Organization of Iran. 2019. University of Tehran synoptic station.
35. Mleczek, M., M. Gasecka, B. Waliszewska, Z. Magdziak, M. Szostek, P. Rutkowski, J. Kaniuczak, M. Zborowska, S. Budzynska, P. Mleczek and P. Niedzielski. 2018. *Salix viminalis* L. - A highly effective plant in phytoextraction of elements. Chemosphere, 212: 67-78.

- 157
36. Mleczek, M., P. Rutkowski, J. Kaniuczak, M. Szostek, A. Budka, Z. Magdziak, S. Budzyńska, N. Kuczyńska- Kippen and P. Niedzielski. 2019. The significance of selected tree species age in their efficiency in elements phytoextraction from waste mixture. International Journal of Environmental Science and Technology, 16: 3579-3594.
 37. Nie, N., Y. Liu, G. Zeng, B. Zheng, X. Tan, H. Liu, J. Xie, Ch. Gan and W. Liu. 2016. Cadmium accumulation and tolerance of *Macleaya cordata*: a newly potential plant for sustainable phytoremediation in Cd-contaminated soil. Environmental Science and Pollution Research, 23: 10189-10199.
 38. Pedrero, F., A. Allende, M.I. Gil and J.J. Alarcón. 2012. Soil chemical properties, leaf mineral status and crop production in a lemon tree orchard irrigated with two types of wastewater Francisco. Agricultural Water Management, 109: 54-60.
 39. Quevauviller, P.H., G. Rauret, R. Rubio, J.F. Lopez-Sanchez, A. Ure, J. Bacon and H. Muntau. 1997. Certified reference materials for the quality control of EDTA- and acetic acid extractable contents of trace elements in sewage sludge amended soils (CRMs 483 and 484). Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 357: 611-618.
 40. Rafati, M., N. Khorasani, F. Moraghebi and A. Shirvany. 2012. Phytoextraction and Phytostabilization Potential of Cadmium, Chromium and Nickel By *Populus alba* and *Morus alba* Species. Journal of Natural Environment, Iranian Journal of Natural Resources, 65(2): 181-191 (In Persian).
 41. Robarge, W.P., A. Edwards and B. Johnson. 1983. Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 14 (12): 1207-1215.
 42. Saba, G., A.H. Parizanganeh, A. Zamani and J. Saba. 2015. Phytoremediation of heavy metals contaminated environments: screening for native accumulator plants in Zanjan-Iran. International Journal of Environmental Research, 9(1): 309-316.
 43. Salardini, A. 1992. Soil Fertility. Tehran University Press, Tehran, Iran, 440 pp (In Persian).
 44. Salehi, A. 2007. Growth and mineral concentration of *Pinus eldarica* Medw and *Robinia pseudoacacia* L., irrigated with municipal effluent in green space of Southern Tehran. M.Sc. thesis. Department of forestry. College of natural resources and marine sciences. Tarbiat Modares University, 120 pp (In Persian).
 45. Selahvarzi, B., 2009. Effect of water treatment effluent on survival growth and mineral accumulation of plane tree (*Platanus orientalis* L.) seedlings. M.Sc. thesis. Department of forestry. College of natural resources and marine sciences. Tarbiat Modares University, 110 pp (In Persian).
 46. Shah, F.R., N. Ahmad, K.R. Masood, D.M. Zahid and M. Zubair. 2011. Response of *Eucalyptus Camaldulensis* to exogenous application of cadmium and chromium. Pakistan Journal of Botany, 43(1): 181-189.
 47. Shanker, A.K., C. Cervantes, H. Loza-Tavera and S. Avudainayagam. 2005. Chromium toxicity in plants. Environment International, 31: 739-753.
 48. Si, L., X. Peng and J. Zhou. 2019. The suitability of growing mulberry (*Morus alba* L.) on soils consisting of urban sludge composted with garden waste: a new method for urban sludge disposal. Environmental Science and Pollution Research, 26: 1379-1393.
 49. Tabari, M. and A. Salehi. 2009. Long-term impact of municipal sewage irrigation on treated soil and black locust trees in a semi-arid suburban area of Iran. Journal of Environmental Sciences, 21: 1438-144.
 50. Theriault, G. and K. Nkongogo. 2016. Nickel and copper toxicity and plant response mechanisms in white birch (*Betula papyrifera*). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 97: 171-176.
 51. TWSWWTC (Tehran Water Supply and Water and Wastewater Treatment Company), 2019. <https://tww.tppw.ir/> (In Persian).
 52. USEPA, 1997. Exposure Factors Handbook. Volume II-Food Ingestion Factors. EPA/600/P-95/002Fa. Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
 53. Van Nevel, L., J. Mertens, J. Staelens, A. De Schrijver, F. Tack, S. De Neve, E. Meers and K. Verheyen. 2011. Elevated Cd and Zn uptake by aspen limits the phytostabilization potential compared to five other tree species. Ecological Engineering, 37: 1072-1080.
 54. WHO, 1996. Trace Elements in Human Nutrition and Health. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
 55. Xue, D. and X. Huang. 2013. The impact of sewage sludge compost on tree peony growth and soil microbiological, and biochemical properties. Chemosphere, 93: 583-589.
 56. Yue, Y., L. Cui, Q. Lin, G. Li and X. Zhao. 2017. Efficiency of sewage sludge biochar in improving urban soil properties and promoting grass growth. Chemosphere, 173: 551-556.

Phytoremediation Potential of Judas Tree, White Mulberry, Bitter Olive and Cedar Rolls for Manganese and Chromium in Water Treatment Plant Effluent

Bahareh Salahvarzi¹, Hamid Jalilvand², Seyed Mohammad Hojjati³ and Mohammad Reza Pourmajidian⁴

1- PhD student of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
2- Professor of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University,

(Corresponding Author: hj_458_hj@yahoo.com)

3- Associate Professor of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

4- Professor of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

Received: 4 April, 2020 Accepted: 4 Jun, 2020

Extended Abstract

Introduction and Objective: Today, Metropolises require more green space because of air pollution, but water scarcity in arid areas should lead to irrigation of unconventional sources such as wastewater, which due to the contamination of these sources, tree species with high phytoremediation capability should be used.

Materials and Methods: In this study, two-year-old seedlings of four species of Judas Tree (*Cercis siliquastrum* L.), Arborvitae (*Thuja orientalis* L.), Persian Lilac (*Melia azedarach* L.) and White Mulberry (*Morus alba* L.) were planted in pots and were irrigated with Tehran West Water Treatment Plant effluent which contained manganese and chromium from March to October 2017.

Results: The amount of chromium and manganese in the organs of species irrigated with effluent showed a significant increase compared to ordinary water. All four species irrigated with water treatment plant effluent showed a same growth compared to ordinary water. The highest amount of manganese was in leaf and chromium in root of all four species. The lower than one BCF and more than one TF for manganese in all four species indicated that they were not suitable for phytostabilization of this metal, but all four species (*Cercis siliquastrum* L.) (1.87), (*Morus alba* L.) (2.07), (*Thuja orientalis* L.) (1.96) and (*Melia azedarach* L.) (1.83) with a more than one TF are suitable for manganese phytoextraction. However, because BCF in them is lower than one, further investigation is needed. White mulberry and Persian lilac with a lower than one BCF and TF for chromium indicated that none of them were suitable for chromium phytostabilization and phytoextraction; But both Judas tree (1.39) and arborvitae (1.04) with higher than one BCF and lower than one TF for chromium were appropriate to phytostabilization of this metal.

Conclusions: As a result, Judas tree and arborvitae, which have both the ability to phytostabilization chromium and the ability to phytoextraction manganese, are the best species for the phytoremediation of these two elements in soil irrigated with effluent. Equal growth parameters of all four species after irrigation with this effluent indicated that reuse of Tehran West Water Treatment effluent can be an approach to compensate water scarcity but further studies and monitoring of conditions in order to select the most suitable species for phytoremediation of heavy metals as well as long-term effects of irrigation with effluent, are required.

Keywords: Bioconcentration factor, Heavy metals, Phytoextraction, Phytostabilization, Translocation factor, Water scarcity