

مقاله پژوهشی

بررسی برخی از خصوصیات مورفولوژیکی، فلورسانس کلروفیل و شاخص‌های فتوسنتزی در گیاهان نخل مرداب (*Cyperus alternifolius*) و تیور (*Vetiveria zizanioides*) و آلوئه‌ورا (*Aloe vera*) تحت آبیاری با پساب‌های شهری و صنعتی

ساره ابراهیمی نوکنده^۱، سیدمهدی رضوی^{۱*} و منصور افشارمحمدیان^۲

^۱ گروه زیست‌شناسی دانشکده علوم، دانشگاه محقق‌اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲ گروه زیست‌شناسی دانشکده علوم، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۵/۱۱)

چکیده

آلوده شدن خاک با پساب شهری و صنعتی حاوی فلزات سنگین، یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست محیطی است و گیاه پالایی یک روش زیستی و مقرون به صرفه جهت حذف فلزات سنگین از خاک و محیط زیست آلوده است. در این راستا انتخاب گیاه مناسب برای گیاه پالایی با توجه به نوع آلودگی، بسیار مهم است. از آنجایی که علاوه بر مقدار جذب فلزات سنگین، خصوصیات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاهان نیز در بحث گیاه پالایی دارای اهمیت است، لذا آزمایشی با هدف بررسی برخی خصوصیات مورفولوژیک و مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل و محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی سه گیاه نخل مرداب، تیور و آلوئه‌ورا تحت تیمار دو نوع پساب شهری و صنعتی طراحی شد. نتایج نشان داد که تیمارهای پساب شهری و صنعتی باعث ایجاد تغییرات معنی‌داری در تمام پارامترهای مورد بررسی شدند و اثر متقابل پساب و گونه‌گیاهی بر وزن تر ریشه و اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی، F_v ، F_m ، F_0 ، کلروفیل a ، b و کلروفیل $a+b$ معنی‌دار و برای بقیه مؤلفه‌های ارزیابی شده معنی‌دار نبود. در مجموع براساس مؤلفه‌های مورد آزمایش در این تحقیق می‌توان گفت که در خاک آلوده به پساب شهری، گیاهان تیور و نخل مرداب و در خاک آلوده به پساب صنعتی، گیاهان تیور و آلوئه‌ورا بهتر عمل کردند.

کلمات کلیدی: پساب، فلزات سنگین، فلورسانس کلروفیل، گیاه پالایی

مقدمه

حضور پایدار در محیط‌زیست نیز استناد می‌شود، به‌طوری‌که همه فلزها و شبه‌فلزهای آسیب‌رسان و سمی (صرف‌نظر از عدد اتمی یا چگالی آن) با نام فلزات سنگین شناخته می‌شوند (Argos et al., 2011). سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، نیکل (Ni)، روی (Zn)، آهن (Fe)، آرسنیک (As)، مولیبدن (Mo)، منگنز (Mn)، منیزیم (Mg)، کبالت (Co)، کروم (Cr)، مس (Cu)،

امروزه یکی از مهم‌ترین مشکلات جهانی محیط زیست، افزایش آلودگی ناشی از فلزات سنگین است. واژه فلزات سنگین به فلزات و شبه فلزاتی که دارای عدد اتمی بالای ۲۰ و یا چگالی آن‌ها بیش از ۵ گرم بر سانتی متر مکعب است، اطلاق می‌شود. البته برای تعریف این واژه به مفاهیمی چون سمیت و

* نویسنده مسؤول، نشانی پست الکترونیکی: razavi694@gmail.com

جیوه (Hg)، نقره (Ag)، سelenیم (Se) از جمله این فلزات هستند (Adriano, 2001).

ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی به مرور زمان، علاوه بر اثرات سو بر خاک، گیاهان و حیوانات، سلامت انسان را به مخاطراتی چون ایجاد سرطان، مشکلات قلبی و عروقی، بیماری‌های پوستی، گوارشی، عصبی، کبدی، کلیوی، استخوانی و تولید مثلی مواجه می‌سازد. در واقع عناصر سنگین به دلیل ثبات شیمیایی، تجزیه‌پذیری ضعیف و داشتن قدرت تجمع زیستی بالا می‌توانند در سطوح مختلف زنجیره غذایی، باعث ایجاد صدمات و خطرات اکولوژیکی برای موجودات زنده شوند (Ling et al., 2008; European Commission, 2013). فعالیت‌های انسانی مانند دفع زباله‌های خانگی و صنعتی، دفع مواد زائد جامد خطرناک، فعالیت‌های صنعتی و کارخانه‌ها، بیمارستان‌ها، دفع کودهای شیمیایی، علف‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، آبیاری فاضلاب، نشت مواد پتروشیمی و رسوبات جوی، معادن، ریخته‌گری و تعمیرگاه‌ها و... عمدتاً فلزات سنگین را وارد اکوسیستم‌های مختلف آبی و خاکی می‌کنند (European Commission, 2013; USEPA, 2021).

روش‌های گوناگونی برای کاهش آلودگی آب و خاک وجود دارد. از جمله رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به روش‌های مهندسی (مانند تصفیه پساب‌های صنعتی، تبادل یونی و...) و روش‌های زیستی (مانند زیست پالایی) اشاره کرد. روش‌های مهندسی بسیار دشوار بوده و موجب آلودگی بخش دیگری از محیط زیست می‌شوند و همچنین از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیستند، به ویژه هنگامی که برای حذف فلزات سنگین در غلظت‌های پایین استفاده می‌شوند (Torresday et al., 2005). اما فن‌آوری زیست‌پالایی با استفاده از گیاهان سبز، به دلیل مقرون به صرفه بودن و مناسب بودن از نظر محیط زیست، بسیار قابل توجه است. گیاه پالایی به عنوان یک روش زیستی در نظر گرفته می‌شود که از انرژی خورشیدی استفاده می‌کند. از نظر زیبایی منظر نیز سبز است و نیازی به تجهیزات یا مواد با تکنولوژی بالا ندارد و می‌تواند در همه محیط‌های آبی و خاکی عمل کند (Pilon Smits, 2005; Gajic and Pavlovic, 2018).

2018). برای پاک‌سازی محیط از آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، انواع فن‌آوری‌های زیست پالایی به صورت تجزیه گیاهی (Phytodegradation)، تثبیت گیاهی (Phytostabilization)، استخراج گیاهی (Phytoextraction)، تبخیر گیاهی (Phytovolatilization)، فیلتراسیون ریزوسفری (Rhizofiltration) و... می‌تواند استفاده شود (Yang et al., 2005; Gajic and Pavlovic, 2018). گیاهان مقاوم جهت رشد در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، به سه نوع اصلی تقسیم می‌شوند که شامل: اجتناب‌کننده (Excluders) که از انتقال فلز به بخش هوایی ممانعت نموده و بخش عمده‌ای از فلز را در ریشه تغلیظ می‌کنند. گونه شاخص (Indicator) که میزان فلز در بخش هوایی آن‌ها با غلظت عناصر مذکور در خاک یکسان است و گونه‌های تجمع‌دهنده (Accumulator) که توانایی جذب و تجمع فلزات در آلودگی‌های کم تا زیاد را دارند و غلظت عناصر فلزی در بخش‌های هوایی آنها به مراتب بیشتر از خاک است (Baker, 1981).

هنگام انتخاب یک گونه گیاهی برای هدف گیاه پالایی، باید فاکتورهای مختلفی از قبیل سازگاری اکولوژیک با اقلیم مورد نظر، رشد سریع، مورفولوژی مناسب و توانایی تحمل فلزات سنگین در نظر گرفته شود (Sharma and Dubey, 2005). بنابراین مطالعات جهت شناسایی و انتخاب گیاهان مناسب جهت گیاه پالایی در هر منطقه جغرافیایی دارای اهمیت خاصی است (Sharma and Dubey, 2005). تحقیقات زیادی در رابطه با گیاه پالایی انجام شده ولی نکته پر اهمیت آن است که اطلاعات این تحقیقات برای همه کشورها کاملاً مشابه و قابل استفاده نیست، همان طور که محققان گیاه پالایی در اروپا و آمریکا نیز اعلام نموده‌اند که در مورد پساب و گیاهان در هر منطقه باید مطالعات دقیق محلی انجام گیرد (Weinberg et al., 2004).

محققان گزارش کرده‌اند که وجود فلزات سنگین در محیط زیست گیاهان، نوعی عامل تنش‌زا است که باعث ایجاد تغییرات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی شده و می‌تواند موجب کاهش توان رشد گیاه و در حالت شدیدتر باعث از بین رفتن

گیاه شود (Gajic and Pavlovic, 2018). از جمله مؤلفه‌هایی که در گیاهان در معرض تنش‌های محیطی از جمله تنش فلزات سنگین می‌توان مورد مطالعه و مقایسه قرار داد، مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل و رنگیزه‌های فتوستتزی گیاهان است که یکی از مهم‌ترین عوامل برای تعیین ظرفیت فتوستتزی در طول زندگی گیاه است (Stoeva et al., 2005). به‌طور کلی، راندمان جذب انرژی تابشی توسط برگ گیاهان ۱۰٪ نبوده و همواره مقداری انرژی به شکل‌های مختلف تلف می‌شود. مولکول‌های کلروفیل، آنتن‌های جاذب نور را تشکیل می‌دهند و انرژی تابشی جذب شده توسط مولکول کلروفیل در یکی از سه مسیر به جریان انداختن عمل فتوستتزی، پراکنده شدن به صورت گرما و بازگشت مجدد به صورت انرژی تابشی یعنی فلورسانس کلروفیل مصرف می‌شود که این بازتابش به رنگ تقریباً صورتی و قابل اندازه‌گیری است (Mohammad et al., 1996). اگر انرژی مولکول برانگیخته به صورت انرژی گرمایی یا فلورسانس ساطع شود، انرژی برای واکنش‌های فتوشیمیایی کمتر می‌شود و برعکس، اگر همه انرژی یک مولکول رنگدانه برانگیخته به واکنش‌های فتوشیمیایی راه یابد، هیچ فلورسانسی گسیل نخواهد شد. بنابراین برخلاف پیچیده بودن پاسخ دستگاه فتوستتزیکننده گیاهان مخصوصاً فتوسیستم II در برابر تنش‌های محیطی، می‌توان اثر این تنش‌ها را قبل از آن‌که در مورفولوژی گیاه ظاهر و برگشت‌ناپذیر شود، با اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل ردیابی کرد (Hakam et al., 2000; Zarco et al., 2009). در واقع سنجش مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل را می‌توان به منزله روش تشخیصی غیرتخریبی برای تعیین میزان آسیب به دستگاه فتوستتزیکننده در گونه‌های مختلف گیاهی و در پاسخ به تنش‌های محیطی استفاده کرد (Percival, 2005).

در برخی مطالعات، رابطه بین فلورسانس کلروفیل و کارایی فتوستتزی گیاه در تنش فلزات سنگین بررسی شده است (Chaneva et al., 2010; Yaghoubian et al., 2016; Li et al., 2021). گزارش شده یکی از اقدامات اولیه گیاهان در برابر اثر منفی فلزات سنگین، مهار فتوستتزی است، زیرا فلزات سنگین بر عملکرد دستگاه

فتوستتزی، سنتز کلروفیل، فعالیت چرخه کالوین به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم تأثیر می‌گذارند (Drazkiewicz et al., 1994). استان گیلان در شمال ایران دارای آب‌وهوای نیمه گرمسیری مرطوب و از نظر کشاورزی، استانی حاصلخیز است. جمعیت شهری و کارخانجات صنعتی در این استان روز به روز در حال افزایش است و پسماندهای شهری و صنعتی کارخانه‌ها جای مناسبی برای تخلیه ندارند. به‌طوریکه در برخی نقاط پساب مستقیماً به رودخانه‌ها و مزارع سرازیر می‌شود. با توجه به این‌که کاشت گیاهان با قابلیت گیاه پالایی خوب، در نزدیکی محل خروجی پساب، به عنوان کمربند سبز، عملی‌ترین و کم هزینه‌ترین روش به‌سازی است و این روش می‌تواند علاوه بر زیباسازی و تثبیت اراضی در برابر فرسایش‌های حاصل از باد و آب، منطقه آلوده را نیز پالایش کند، لذا ما در مطالعه قبلی (Ebrahimi Nokande et al., 2022)، اثرات دو نوع پساب شهری و صنعتی با تأکید بر برخی فلزات سنگین را بر سه گونه گیاهی شامل نخل‌مرداب (*Cyperus alternifolius*) از خانواده جگن، وتیور (*Vetiveira zizanioides*) از خانواده گندم و آلوئه‌ورا (*Aloe vera*) از خانواده سریش را به عنوان عامل گیاه پالایی مورد بررسی قرار دادیم. علت انتخاب این گیاهان این بود که این سه گونه مورد بررسی همیشه سبز هستند و به راحتی و به سرعت در آب و هوای گیلان رشد می‌کنند (با اینکه بومی گیلان نیستند)، زیست توده بالایی تولید می‌کنند، سیستم ریشه‌ای وسیعی دارند، مورد تهاجم حیوانات قرار نمی‌گیرند و خطر ایجاد مسمومیت و یا تهاجم به مناطق دیگر را ندارند، مقاوم به شرایط نامساعد محیطی هستند، در صورت برداشت پس از کشت نیز از نظر اقتصادی مهم هستند و از طرفی این سه گیاه تاکنون در دو منطقه آلوده مورد نظر در استان گیلان (پساب شهری سراوان و پساب کارخانه چوب و کاغذ) بررسی و مقایسه نشده بودند. مطالعه قبلی ما، در رابطه با جذب فلزات سنگین در اندام‌های هر سه گیاه، مقایسه فاکتور انتقال و فاکتورهای تجمع آن‌ها نشان داد که هر سه گیاه برای جذب هر یک از فلزات سنگین مورد مطالعه در خاک پساب شهری و صنعتی مورد مطالعه، از

ARCOS,) مدل (ICP-OES) Emission Spectrometer (Spectro, Germany) در نمونه خاک اولیه اندازه‌گیری شد (Salt *et al.*, 1998; AL-Oud Saud, 2003) که نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

تیمارهای آزمایشی شامل سه گروه بودند: آب شهری به‌عنوان تیمار اول (شاهد)، تیمار دوم پساب زباله‌های شهری که از محل دفن زباله سراوان برداشت شد و تیمار سوم پساب صنعتی که از محل خروجی پساب کارخانه چوب و کاغذ برداشت شد. پساب‌ها به صورت ماهانه جمع‌آوری و در دبه‌های مخصوص نگهداری می‌شد. میزان اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) و اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) در هر دو پساب در جدول ۲ ارائه شده است.

آماده‌سازی گلدان‌ها: گلدان‌های پلاستیکی به عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر با ۱۱ کیلوگرم خاک الک‌زده پر شدند. گیاهان سالم نخل‌مرداب، وتیور و آلوه‌ورا از محل‌های رشد و نمو آن‌ها در حوالی شهر رشت جمع‌آوری و هر بوته پس از تقسیم‌بندی تقریباً هم وزن شده و در گلدان‌ها کاشته شدند. برای جلوگیری از تأثیر تنش بر گیاهان و سازگاری با شرایط جدید، تمامی گیاهان آزمایشی به مدت چهار هفته با آب شهری (هفته‌ای دو بار و هر بار ۳۰۰ میلی‌لیتر) آبیاری شدند. پس از یک ماه از شروع کشت، گلدان‌های شاهد با ۳۰۰ میلی‌لیتر آب شهری و گلدان‌های تیمار با ۳۰۰ میلی‌لیتر پساب شهری و یا ۳۰۰ میلی‌لیتر پساب صنعتی دو بار در هفته به مدت ۱۴ ماه به‌طور جداگانه آبیاری شدند. در طول آزمایش، برگ‌هایی که در طی فصل رشد ریخته می‌شد نیز جمع‌آوری و خشک می‌شدند. به گیاهان اجازه داده شد در شرایط آب و هوای محیطی معمول زیر یک سقف شیشه‌ای رشد کنند. همچنین برای تعیین میزان کل عناصر اضافه شده از پساب به خاک، گلدان‌هایی با ۱۱ کیلوگرم خاک پر شده بدون گیاه در نظر گرفته و مانند گلدان‌های حاوی گیاهان آبیاری شدند.

اندازه‌گیری مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل: پس از گذشت ۱۴ ماه از شروع کشت، اندازه‌گیری مؤلفه‌های

راه‌کار تثبیت گیاهی (Phytostabilization) استفاده کردند و از گروه اجتناب‌کننده‌گان فلز (Excluders) محسوب شدند. طبق نتایج، شاخص انباشت کل فلزات (Metal Accumulation Index) MAI کروم، روی، سرب، مس، منگنز، نیکل و منیزیم در کل اندام (ریشه + شاخه) گیاهان و در هر دو تیمار پساب شهری و صنعتی، در گیاه وتیور بیشتر از گیاه آلوه‌ورا و در گیاه آلوه‌ورا بیشتر از نخل‌مرداب بود (وتیور < آلوه‌ورا < نخل) (Ebrahimi Nokande *et al.*, 2022).

در ادامه و تکمیل تحقیق قبل، از آن جایی که تحت تنش پساب، گیاهان از نظر ظاهری متحمل تغییراتی شدند، آزمایشی جهت بررسی برخی خصوصیات مورفولوژی و مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل و میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهان نخل‌مرداب، وتیور و آلوه‌ورا در پاسخ به پساب شهری و صنعتی طراحی کردیم تا بتوانیم اثر پساب بر این شاخص‌ها را نیز بررسی کنیم.

مواد و روش

زمان و مکان آزمایش: به منظور بررسی اثرات پساب شهری و صنعتی بر برخی ویژگی‌های فتوسنتزی سه گیاه نخل‌مرداب، وتیور و آلوه‌ورا، آزمایش گلدانی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار، در دانشکده علوم دانشگاه گیلان (با موقعیت عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه، طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۵ دقیقه و با ارتفاع ۱ متر از سطح دریا، در دوره زمانی خرداد ۱۳۹۸ الی تیر ۱۳۹۹ اجرا شد. در مدت انجام آزمایش، میانگین دمای هوا ۱۸/۲۵ و میانگین رطوبت هوا ۷۷/۲۵ بود (اداره کل هواشناسی استان گیلان).

تهیه خاک و پساب: خاک مورد استفاده از نقاط مختلف جنگل شفارود واقع در استان گیلان از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر به‌طور تصادفی برداشت و الک شد. سپس خصوصیات فیزیکوشیمیایی (Walkley and Black, 1934; Richards, 1954; Uba *et al.*, 2009) و مقدار فلزات سنگین روی، سرب، مس، کروم، منگنز، نیکل، منیزیم، جیوه و کادمیم با استفاده از دستگاه Inductively Coupled Plasma Optical

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و فلزات سنگین خاک اولیه (شاهد)

EC ds/m	pH	کربن آلی	ازت کل	شن	سیلت	رس	فسفر قابل جذب	قابل پتاسیم جذب	بافت خاک	Zn	Cr	Pb	Cu	Mn	Ni	Mg
				%			ppm	ppm					ppm			
۰/۸۸	۶/۶۳	۳/۱۹	۰/۲۸	۶۴	۲۲	۱۴	۱۳/۵	۱۳۱	SL	۱۶	۱۴	۸	۲۰	۲۴۰	۹	۲۴۰۰

جدول ۲- میزان BOD و COD پساب شهری و صنعتی مورد استفاده در تحقیق

نوع پساب	BOD (mg/L)	COD (mg/L)
پساب شهری	۱۴۸۳	۳۱۴۷
پساب صنعتی	۱۰۳	۲۵۲
حد مجاز مصرف در کشاورزی	۱۰۰	۲۰۰

فلورسانس کلروفیل روی برگ‌های کاملاً رشد یافته در شاخه اصلی (بلندترین شاخه)، از محل میانه برگ هر گیاه با استفاده از دستگاه فلئورومتر (Fluorometer) مدل PAM 2500-Walz, Germany صورت گرفت. قبل از شروع کار، برگ‌ها به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از گیره‌های مخصوص مانع نور، در تاریکی کامل قرار گرفتند تا در وضعیت سازگار به تاریکی باشند. در این صورت تمام مراکز واکنش و حامل‌های الکترون در فتوسیستم II اکسید می‌شوند که برای القاء سریع فلورسانس و اندازه‌گیری مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل ضروری است. سپس با استفاده از دستگاه فلئورومتر، نور قرمز به برگ تابانده شد و اطلاعات مربوط به فلورسانس پایه یا حداقل (F_0) و فلورسانس حداکثر (F_m) در حالت‌های سازگار شده به تاریکی، برخی از مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل با استفاده از رابطه‌های زیر ارزیابی شدند (Rohacek, 2002; Kalaji *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011):

$$\text{رابطه (۱)} \quad F_v = (F_m - F_0) \quad \text{فلورسانس متغیر}$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m \quad \text{حداکثر کارایی کوانتومی II}$$

$$\text{رابطه (۳)} \quad \text{شاخص کارایی کمپلکس آزادکننده اکسیژن}$$

$$\text{رابطه (۴)} \quad F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0 \quad \text{بازده کوانتوم مبنا}$$

برداشت خاک و گیاه: ۲۴ ساعت پس از ارزیابی مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل برگ گیاهان توسط فلئورومتر، هر گلدان به آرامی برگردانده و خالی شد. تمام برگ و ریشه گیاهان برداشت و با آب کاملاً شستشو و وزن شدند و سپس در آون ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک و وزن شدند. مقداری از خاک هر گلدان نیز (پس از مخلوط و همگن کردن کل خاک) در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد آون به مدت ۷۲ ساعت خشک شد. سپس با استفاده از دستگاه (ICP-OES)، غلظت نهایی فلزات سنگین در خاک و بخش‌های مختلف گیاهان سنجش شد. میزان کل عناصر فلزی که از طریق پساب شهری و صنعتی به صورت تیمار به گلدان‌ها داده شده بود، در جدول ۳ آمده است. البته میزان کادمیم و جیوه بسیار کم بوده و در حد تشخیص دستگاه ICP-OES نبود. با توجه به مطالعه قبلی (Ebrahimi nokande *et al.*, 2022) مقدار تمام فلزات اندازه‌گیری شده به غیر از عناصر کروم و نیکل، در گلدان‌های بدون گیاه (که جهت برآورد نهایی کل عناصر فلزی اضافه شده از پساب به خاک تعبیه شده بودند) از میزان استانداردهای جهانی بیشتر بود (USEPA, 2005; WHO, 2000). همچنین غلظت همه عناصر فلزی (به غیر از Cu) در خاک پساب شهری بیشتر از خاک پساب صنعتی کارخانه تولید کاغذ بود.

ارزیابی رنگیزه‌های فتوستتزی: به منظور عصاره‌گیری، به ۵ گرم از پودر برگ گیاهان، ۲۰ میلی‌لیتر استون اضافه کرده و

جدول ۳- مقادیر کل عناصر فلزی سنگین در خاک گلدان‌های شاهد (بدون گیاه) پس از پایان آزمایش و مقایسه با استاندارد خاک (USEPA, 2005; WHO, 2000).

فلز سنگین ppm							نوع خاک
Mg	Ni	Mn	Cu	Pb	Cr	Zn	
۷۵۶۶/۶۷	۲۴	۶۶۳/۳۳	۷۹/۶۷	۵۲/۳۳	۴۲/۶۷	۱۱۷/۶۷	خاک پساب شهری
۶۹۰۰	۲۰/۶۷	۶۳۰	۹۲	۴۵/۶۷	۳۸	۹۹/۶۷	خاک پساب صنعتی
-	۳۳/۷	۴۳۷	۳۰	۱۰	۶۵	۵۰	استاندارد خاک

اندام هوایی در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار و بر وزن خشک ریشه بی‌معنی بود (جدول ۴).

براساس نتایج بدست آمده از مقایسه میانگین آزمون دانکن، در شکل ۱ (A)، تیمار پساب شهری باعث کاهش معنی‌دار وزن تر ریشه نسبت به شاهد، در هر سه گیاه مورد بررسی شد. تیمار پساب صنعتی نیز در وزن تر ریشه گیاهان نخل‌مرداب و آلوئه‌ورا کاهش معنی‌داری ایجاد کرد، اما در وزن تر ریشه و تیور تغییر معنی‌داری نسبت به شاهد دیده نشد.

با توجه به شکل ۱ (B)، وزن خشک ریشه هر سه گیاه نخل‌مرداب، تیور و آلوئه‌ورا تحت آبیاری با هر دو نوع پساب شهری و صنعتی کاهش معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ در مقایسه با شاهد نشان داد و بیش‌ترین درصد کاهش در وزن خشک ریشه (۴۵٪/۹۴) مربوط به گیاه نخل‌مرداب و تحت تیمار پساب شهری بود.

براساس نتایج مقایسه میانگین در شکل ۱ (C)، پساب شهری و صنعتی باعث کاهش در وزن تر هر سه گیاه در مقایسه با گیاهان شاهد شدند. گیاه آلوئه‌ورا در هر دو تیمار پساب شهری و صنعتی، بیش‌ترین درصد کاهش در وزن تر اندام هوایی را داشت. همچنین گیاه نخل‌مرداب تحت هر دو پساب شهری و صنعتی، کم‌ترین درصد کاهش وزن تر اندام هوایی را نسبت به گیاه شاهد نشان داد.

با توجه به شکل ۱ (D)، کاهش معنی‌داری در وزن خشک اندام هوایی هر سه گیاه مورد مطالعه تحت تیمار هر دو پساب شهری و صنعتی دیده شد و این کاهش (۶۹٪) در آلوئه‌ورا تحت تیمار پساب شهری بیشتر بود.

پس از سانتریفیوژ با سرعت ۶۰۰۰ (دور در دقیقه) به مدت ۲۰ دقیقه، جذب هر نمونه در طول‌موج‌های ۶۶۳ نانومتر، ۶۴۵ نانومتر و ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. در نهایت با استفاده از رابطه‌های زیر، میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید کل برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک محاسبه شد. همچنین نسبت کلروفیل a به b و نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل بدست آمد (A = جذب، V = وزن نمونه، W = حجم عصاره) (Arnon, 1949; Lichtenthaler, 1987).

رابطه (۵)

$$\text{Chl a} = (12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{645}) V/1000 W$$

رابطه (۶)

$$\text{Chl b} = (22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663}) V/1000 W$$

رابطه (۷)

$$\text{Chl. Totl} = \text{Chl. a} + \text{Chl. b}$$

رابطه (۸)

$$\text{Car} = \left[\left((1000 \times A_{470}) - (1.82 \times \text{chl. a}) - (85.02 \times \text{chl. b}) \right) / 198 \right] V/1000 W$$

آنالیز واریانس برای هر یک از شاخص‌ها با استفاده از برنامه آماری (24) SPSS، آزمون چنددامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال $P \leq 0.05$ انجام شد. همچنین رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft excel 2019 انجام گرفت.

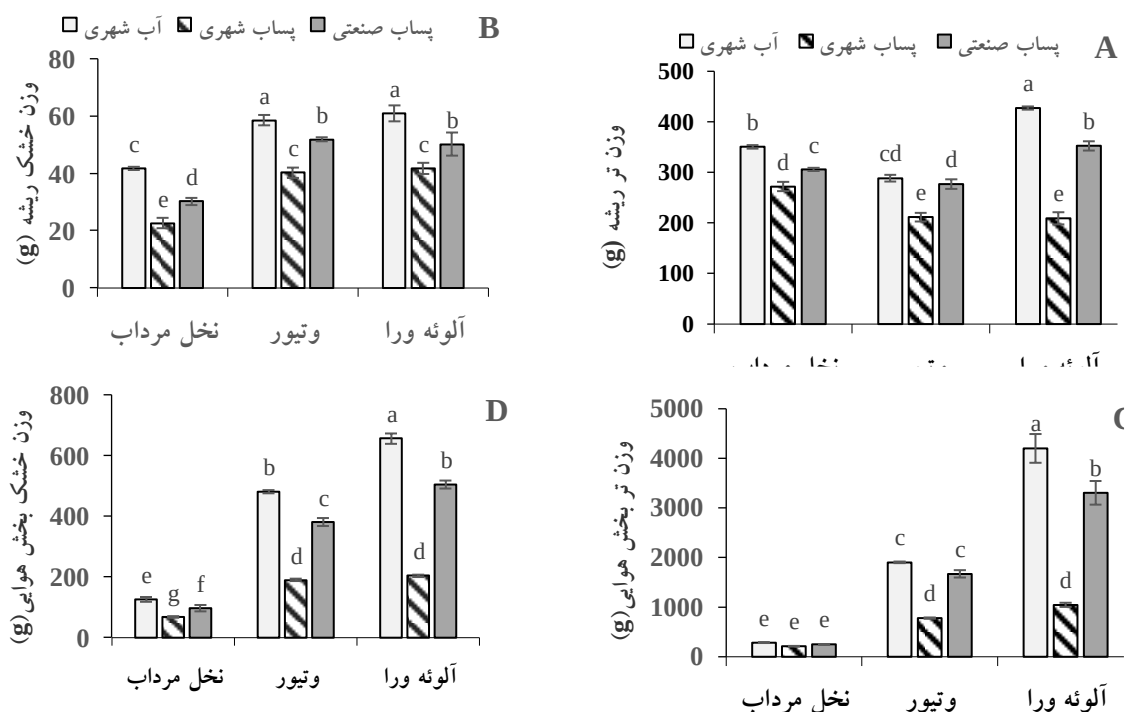
نتایج

صفات مورفولوژیک: در پژوهش حاضر براساس سنجش‌های انجام‌شده طبق جدول تجزیه واریانس، اثر متقابل تیمار و گونه گیاه بر صفات وزن تر ریشه، وزن تر اندام هوایی، وزن خشک

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک سه گیاه نخل مرداب، وتیور، آلوئه‌ورا تحت تنش پساب شهری و صنعتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	منابع تغییرات			
		وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی
تیمار	۲	۳۵۹۳۹/۹۱*	۸۰۱/۷۹*	۵۰۷۴۸۴۷/۷۰*	۱۶۴۶۷۵/۲۳*
گونه گیاه	۲	۱۱۹۵۹/۶۶*	۱۰۹۶/۰۵*	۱۵۲۳۹۸۲۶/۲۶*	۳۰۴۳۶۳/۳۱*
اثر متقابل تیمار و گونه گیاه	۲	۵۳۶۸/۳۱*	۵/۷۴ ^{ns}	۱۹۵۴۸۳۳/۹۳*	۳۰۸۶۰/۴۱*
خطا	۱۸	۱۸۰/۹۸	۱۲/۴۱	۴۹۶۷۳/۳۰	۲۴۶/۲۳

* و ns. به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال ۵ درصد و غیر معنی دار است.



شکل ۱- (A) وزن تر ریشه، (B) وزن خشک ریشه، (C) وزن تر اندام هوایی (D) وزن خشک اندام هوایی سه گیاه نخل مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا. مقادیر، میانگین سه تکرار $\pm$ SE است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال $P \leq 0.05$ است.

F₀, F_m, F_v و اثر متقابل پساب و گونه گیاهی بر مؤلفه‌های F_m و F_v معنی دار بودند.

براساس نتایج بدست آمده از مقایسه میانگین آزمون دانکن (شکل ۲A)، در هر دو تیمار پساب شهری و صنعتی میزان فلورسانس حداقل (F₀) در برگ هر سه گیاه مورد آزمایش نسبت به گیاه شاهد که با آب شهری آبیاری شده بود، افزایش

مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل: نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل (جدول ۵) نشان داد که با افزودن هر دو نوع پساب شهری و صنعتی، پس از ۱۴ ماه، تغییرات معنی داری در همه مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل (F₀, F_m, F_v, F₀/F_m, F_v/F₀, F_v/F_m) در سطح احتمال ۵٪ ایجاد شد. درحالی که اثر گونه، فقط بر مؤلفه‌های

جدول ۵- تجزیه واریانس مؤلفه‌های فلورسانس برگ سه گیاه نخل مرداب، وتیور، آلوئه‌ورا تحت تیمار پساب شهری و صنعتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		F0	Fm	Fv	Fv/Fm	FV/F0
تیمار	۲	۴۱۹۵۵/۸۲*	۳۲۲۰۱۸/۷۸*	۵۹۱۷۳۹/۸۲*	۰/۰۳۴*	۸/۸۷۳*
گونه گیاه	۲	۵۸۶۷۲/۴۸*	۱۱۹۳۹۰۶۸/۷*	۷۲۷۳۴۳/۳۷*	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۲۱۳ ^{ns}
اثر متقابل تیمار و گونه گیاه	۲	۱۸۵۵/۲۶ ^{ns}	۵۵۱۵۰/۲۲*	۷۳۶۰۸/۹۳*	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۳۱۱ ^{ns}
خطا	۱۸	۳۰۴۴/۶۳	۴۰۵۴/۲۶	۶۷۰۳/۶۷	۰/۰۰۱	۰/۲۶۹

* و ^{ns}: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ درصد و غیر معنی‌دار است.

داشت. اما این افزایش در گیاهان نخل مرداب و آلوئه‌ورا معنی‌دار بود. بیش‌ترین درصد افزایش (۴۱٪) در برگ گیاه آلوئه‌ورا تحت تیمار پساب شهری و کم‌ترین درصد افزایش (۱۷٪) در برگ گیاه وتیور تحت تیمار پساب صنعتی مشاهده شد.

طبق شکل ۲ (B) در گیاهان تیمار شده با پساب شهری میزان فلورسانس حداکثر (Fm) به‌طور معنی‌داری در مقایسه با گیاهان شاهد کاهش یافت و بیش‌ترین درصد کاهش ۲۵/۸۴ مربوط به گیاه آلوئه‌ورا بود. در گیاهان تیمار شده با پساب صنعتی کاهش معنی‌دار Fm در گیاهان نخل مرداب و وتیور مشهود بود.

بر اساس نمودار فلورسانس متغیر (Fv) (شکل ۲C)، کاهش معنی‌دار در مقدار فلورسانس متغیر هر سه گیاه در هر دو پساب شهری و صنعتی دیده شد و در هر دو تیمار پساب شهری و صنعتی، بیش‌ترین کاهش در مقدار Fv نسبت به شاهد، مربوط به گیاه آلوئه‌ورا بود.

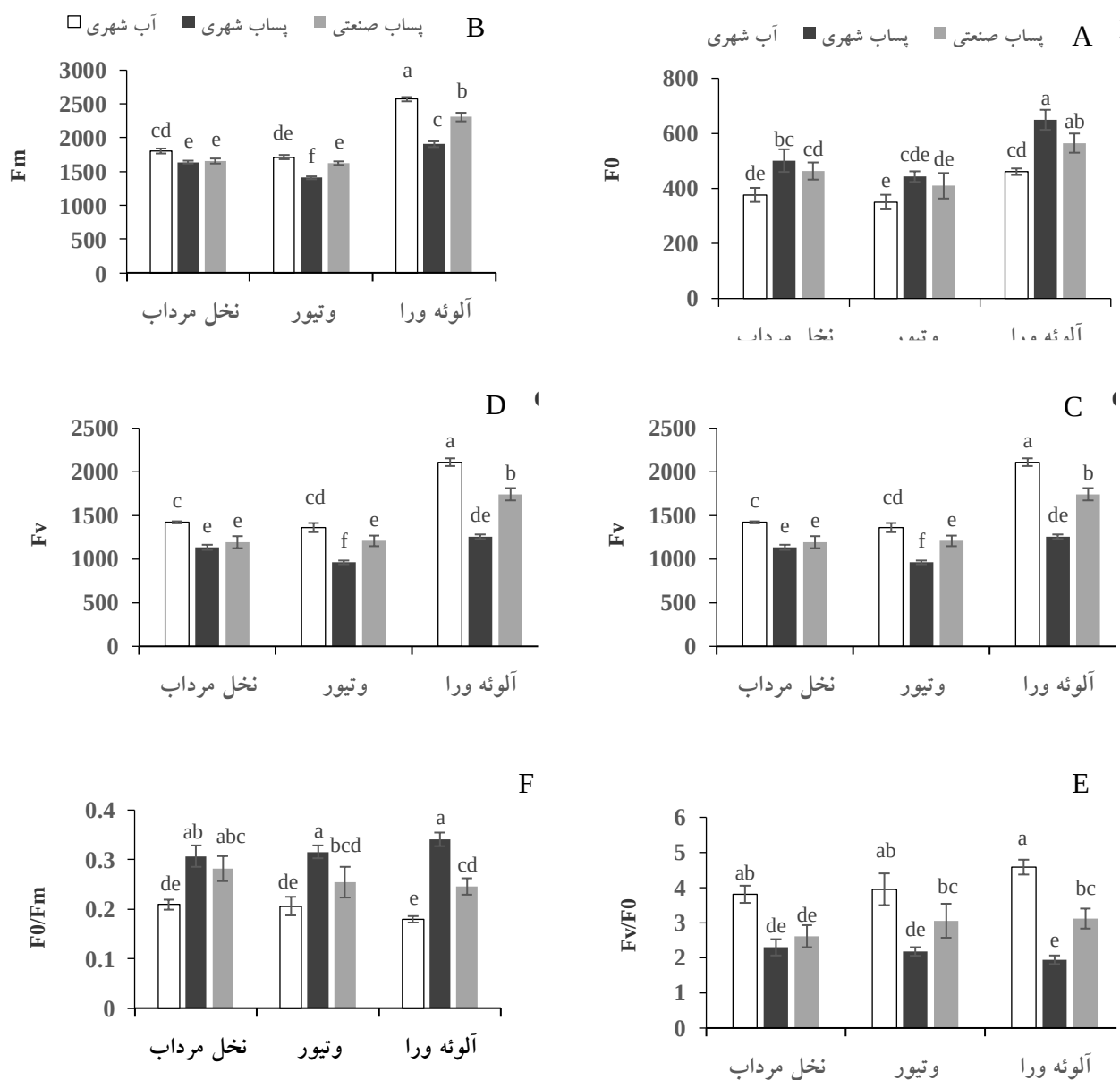
پس از گذشت ۱۴ ماه، با توجه به (شکل ۲D)، در هر سه گونه گیاهی با افزایش پساب‌ها به خاک، تحت تیمار پساب شهری، از میزان Fv/Fm به‌طور معنی‌داری کاسته شد. به‌طور دقیق‌تر در تیمار پساب شهری، در گیاه آلوئه‌ورا (۱۹/۷٪)، گیاه وتیور (۱۳/۹٪) و گیاه نخل مرداب (۱۲/۳٪) مقدار Fv/Fm کاهش یافت. در تیمار پساب صنعتی نیز گیاه آلوئه‌ورا (۱۰/۴٪) و گیاه نخل مرداب (۸٪) کاهش معنی‌داری در مقدار Fv/Fm نشان دادند.

با توجه به نتایج در شکل ۲ (E)، تحت تیمار پساب شهری و صنعتی، در هر سه گونه گیاه کاهش معنی‌دار در مقدار شاخص کارایی کمپلکس آزادکننده اکسیژن (FV/F0) نسبت به شاهد دیده شد. بالاترین مقدار FV/F0 مربوط به گیاهان شاهد در هر سه گونه گیاهی بود.

طبق نتایج در تیمار پساب شهری در تمام گونه‌های گیاهی مورد مطالعه، افزایش معنی‌داری در میزان (F0/Fm) مشاهده شد و در تیمار پساب صنعتی افزایش معنی‌دار در مقدار F0/Fm در گیاهان نخل مرداب و آلوئه‌ورا مشهود بود (شکل ۲F).

رنگیزه‌های فتوسنتزی: طبق نتایج ذکر شده در جدول ۶، تجزیه واریانس مربوط به شاخص‌های فتوسنتزی در برگ سه گیاه نخل مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا نشان داد که اثر پساب در سطح احتمال ۵٪ بر مقدار کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید معنی‌دار و برای نسبت کلروفیل a/b و نسبت کاروتنوئید بر کلروفیل بی معنی و اثر گونه بر تمام شاخص‌ها در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود. اثر متقابل پساب و گونه گیاهی بر شاخص‌های کلروفیل a و کلروفیل کل در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود.

بر اساس (شکل ۳A)، در تیمار پساب صنعتی، میزان محتوای کلروفیل a در هر سه گیاه تقریباً تغییر معنی‌داری در مقایسه با شاهد نداشت، ولی در تیمار پساب شهری، مقدار کلروفیل a به‌طور معنی‌داری، در سطح احتمال ۵٪، افزایش ۹/۵۷٪ در برگ نخل مرداب و به‌ترتیب کاهش ۱۵/۲۸٪ و ۰/۱۸/۷۵٪ در برگ آلوئه‌ورا و وتیور داشت.



شکل ۲- (A) فلورسانس حداقل، (B) فلورسانس حداکثر، (C) فلورسانس متغیر، (D) حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II، (E) شاخص کارایی کمپلکس آزاد کننده اکسیژن، (F) کوانتم مینا در برگ سه گیاه نخل مرداب، وتیور و آلوه ورا. مقادیر، میانگین سه تکرار $\pm$ SE است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال $P \leq 0.05$ است.

نسبت به شاهد نداشت. میزان کلروفیل در دو گیاه نخل مرداب و آلوه ورا در تیمار پساب صنعتی، نسبت به شاهد افزایش و در تیمار شهری نسبت به شاهد کاهش نشان داد و تنها کاهش در میزان کلروفیل کل گیاه آلوه ورا در تیمار شهری معنی دار بود.

طبق نتایج این مطالعه، اثر گونه بر نسبت کلروفیل a/b

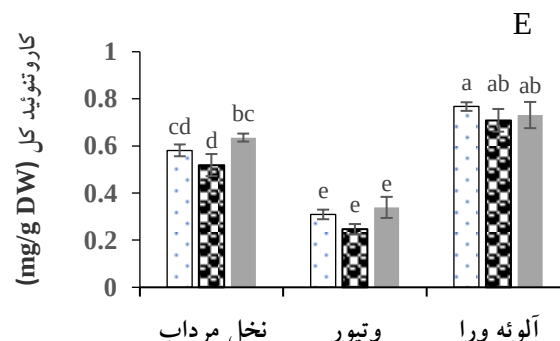
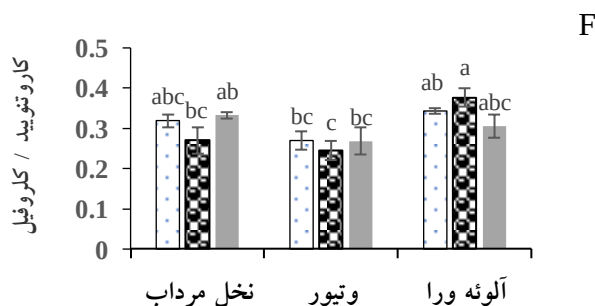
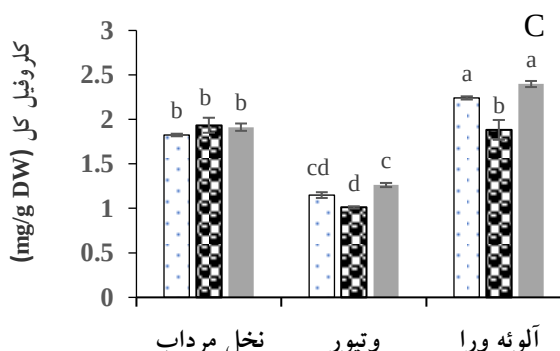
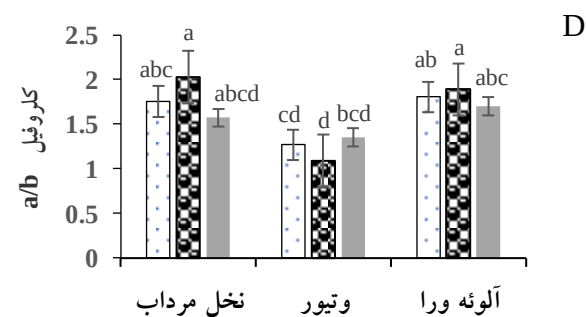
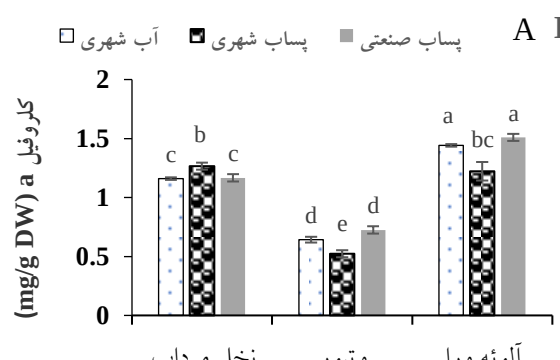
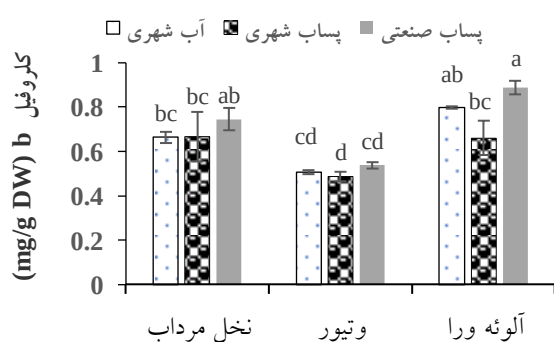
طبق شکل ۳ (B) علی رغم افزایش کلروفیل b در هر سه گیاه نخل مرداب، آلوه ورا و وتیور در تیمار پساب صنعتی، این افزایش معنی دار نبود. در تیمار پساب شهری گیاه آلوه ورا بیشترین درصد کاهش را در مقدار کلروفیل b داشت.

با توجه به شکل ۳ (C) میزان کلروفیل کل گیاه نخل مرداب در تیمار شهری و صنعتی با اندکی افزایش تغییر معنی داری

جدول ۶- تجزیه واریانس شاخص‌های فتوسنتزی در برگ سه گیاه نخل مرداب، وتیور، آلوئه‌ورا تحت تنش پساب شهری و صنعتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	نسبت کاروتنوئید / کلروفیل کل	نسبت کاروتنوئید
تیمار	۲	۰/۰۳۸*	۰/۰۱۴*	۰/۱۳۹*	۰/۰۳۶ ^{ns}	۰/۰۱۵*
گونه گیاه	۲	۱/۴۰۷*	۰/۱۹۳*	۲/۵۶۳*	۰/۹۲۷*	۰/۴۴۲*
اثر متقابل تیمار و گونه گیاه	۲	۰/۰۳۵*	۰/۰۲۲ ^{ns}	۰/۰۶۴*	۰/۱۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}
خطا	۱۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴

* و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ درصد و غیرمعنی‌دار است.



شکل ۳- (A) محتوای کلروفیل a، (B) محتوای کلروفیل b، (C) کلروفیل کل، (D) نسبت محتوای کلروفیل a/b، (E) محتوای کاروتنوئید کل، (F) نسبت مقدار کاروتنوئید به کلروفیل در برگ سه گیاه نخل مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا. مقادیر، میانگین سه تکرار $\pm$ SE است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال $P \leq 0.05$ است.

کاروتنوئید کل و نسبت کاروتنوئید به کلروفیل معنی‌دار بود. بالاترین نسبت کلروفیل a/b در گیاه آلوئه‌ورا و در تیمار پساب صنعتی و کم‌ترین نسبت مربوط به گیاه وتیور در تیمار پساب شهری بود (شکل ۳D).

با توجه به شکل ۳E، تیمار پساب شهری باعث کاهش مقدار کاروتنوئید در مقایسه با گیاهان شاهد در هر سه گیاه مورد آزمایش شد. اما این کاهش در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار نبود. همچنین در تیمار پساب صنعتی علی‌رغم افزایش ۹/۵٪ و ۱۰/۱٪ کاروتنوئید در برگ گیاه نخل مرداب و وتیور در مقایسه با شاهد، این افزایش معنی‌دار نبود.

براساس شکل ۳F، در تیمار پساب شهری، دو گونه نخل مرداب و وتیور در نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کاهش داشتند و گیاه آلوئه‌ورا افزایش این نسبت را نشان داد که البته از نظر آماری تغییر معنی‌داری محسوب نشد.

بحث

بررسی شاخص‌های مورفولوژیک، رشد و توان گیاه در خاک بخصوصی که گیاه پالایی در آن صورت می‌گیرد، یکی از ضروریاتی است که در تحقیقات گیاه پالایی مورد تأکید است (Ruilian et al., 2012). همچنین بررسی مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل، می‌تواند اثرات کوتاه مدت و بلند مدت تنش و آسیب به دستگاه فتوسنتزی را نیز نشان دهد (Lichtenthaler and Rinderle, 1988). ریشه‌ها به عنوان سطوح جذب‌کننده آب و مواد غذایی، تأثیر بسیار زیادی در جذب آب و املاح گوناگون دارند و عوامل مختلف محیطی از طریق تأثیر روی ریشه، بر رشد گیاه اثر می‌گذارند. تنش فلزات سنگین از جمله عوامل محدود کننده رشد ریشه است و کاهش رشد ریشه باعث تغییراتی در فعالیت‌های رشدی گیاه می‌شود. ممکن است آلودگی زیاد سبب عدم توسعه و گسترش مناسب سیستم ریشه‌ای و متعاقباً باعث کاهش سطوح جذب‌کننده مواد غذایی یا تغییر در ساختار غشا سلولی و کاهش جذب آب شود که این امر بر فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز اثر گذاشته و در نهایت موجب کاهش رشد در سایر قسمت‌های گیاه و از جمله

وزن تر گیاه می‌شود (Sharma and Dubey, 2005). در تحقیق حاضر نیز کاهش رشد و در نهایت کاهش وزن تر ریشه و اندام هوایی تحت تأثیر تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه مشاهده شد. درصد کاهش وزن تر ریشه و اندام‌هوایی، در هر دو تنش پساب شهری و صنعتی در گیاه آلوئه‌ورا نسبت به گیاهان وتیور و نخل مرداب بیشتر بود و می‌توان گفت که از این نظر این گیاه آسیب بیشتری دید. با توجه به نتایج افزودن پساب سبب کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه و اندام‌هوایی در هر سه گیاه مورد بررسی شد. بیش‌ترین درصد کاهش وزن خشک ریشه در تیمار پساب شهری (۴۵/۹۴٪) و صنعتی (۲۷/۶۷٪) مربوط به گیاه نخل مرداب بود. وزن خشک اندام هوایی نیز در گیاه آلوئه‌ورا در تیمار پساب شهری با درصد بیشتری (۰/۶۹٪) کاهش یافت که احتمالاً به دلیل عوارض سوئی ناشی از بالابودن میزان COD، BOD و غلظت بیشتر فلزات و آلودگی‌ها در پساب شهری نسبت به پساب صنعتی بود. گزارش‌ها نشان داده است که در پساب شهری، علاوه بر فلزات سنگین، ترکیبات آلی سمی دیگری نیز وجود دارد که مانع رشد گیاه شده و در نهایت باعث کاهش وزن خشک گیاهان می‌شود (Hosseini and Pourakbar, 2013; Ramirez- Hosseini and Pourakbar, 2013; Mohsenzadeh et al., 2016).

لازم به ذکر است که علاوه بر سمیت ناشی از فلزات سنگین و سایر ترکیبات موجود در پساب، مقادیر اضافی برخی عناصر غذایی نیز می‌تواند موجب کاهش تولید و تجمع زیست توده و در نتیجه کاهش وزن شود (Taiz and Zeiger, 2014; Mohsenzadeh et al., 2016).

طبق گزارش‌ها، استفاده از روش فلورومتري نسبت به سایر روش‌های مطالعه فیزیولوژیکی گیاهان، یک روش غیرمخرب و در عین حال دقیق است. شاخص‌های F0 و Fm از عوامل مهم به‌شمار می‌روند که برای ارزیابی سایر مؤلفه‌های فلورسانس اندازه‌گیری می‌شوند. وقتی مولکول‌های کوئینون (اولین گیرنده الکترون در فتوسیستم II) در وضعیت اکسیدشده هستند (وضعیتی که مرکز واکنش فتوسیستم II فعال بوده و پذیرنده‌های الکترون که به ترتیب شامل کوئینون، کوئینون‌بی

(QB) و کوئینون آ (QA) بوده، انرژی را به پلاستوکوئینون PQ و از PQ به فتوسیستم I انتقال داده و صرف تولید NADPH و ATP می‌کند، در این حالت سیستم دارای کم‌ترین فلورسانس (F0) است و فعالیت‌های فتوستتزی به نحو مطلوب‌تری در جریان هستند و تثبیت کربن یا به عبارتی انتقال الکترون سریع‌تر انجام شده است (Andrews et al., 1995).

در مطالعه حاضر، میزان F0 با افزایش پساب شهری و صنعتی در هر سه گیاه افزایش داشت. این امر بیان‌گر آسیب به زنجیره انتقال الکترون فتوسیستم II در اثر کاهش ظرفیت QA و عدم اکسیداسیون کامل آن به دلیل جریان کند الکترون در طول مسیر فتوسیستم II است (Zlatev and Yordanov, 2004). گزارش شده است که افزایش F0 مشاهده شده می‌تواند مربوط به آسیب دستگاه فتوستتزی مانند غیرفعال شدن بخشی از مراکز واکنش فتوسیستم II باشد که ممکن است برگشت‌پذیر یا برگشت‌ناپذیر باشد. فلورسانس حداکثر (Fm) در اثر تابش فوتون‌های نوری و احیای همه ناقل‌های الکترون و بسته بودن همه مراکز واکنش ایجاد می‌شود. هر چه سیستم دیرتر بسته شود، یعنی قادر باشد تعداد الکترون‌های بیشتری را بپذیرد، Fm آن بالاتر یا سیستم کارتر خواهد بود. در حقیقت، افزایش فلورسانس از F0 به Fm به علت کاهش QB و مخزن بزرگی از پلاستوکوئینون است و در تنش‌های محیطی مثل تنش فلزات سنگین Fm کاهش می‌یابد (Mehta et al., 2010; Jiang et al., 2006; Giannakoula et al., 2021). کاهش مقدار Fm را می‌توان به افزایش پراکنش انرژی نورانی جذب شده به صورت گرما نسبت داد. افزایش F0 و کاهش Fm گویای آسیب رسیدن به انتقال فوتون‌های جذب شده از آنتن‌ها به مراکز واکنش است. در برخی گیاهان افزایش F0 و کاهش Fm تحت تنش فلزات سنگین گزارش شده است (Ekmekci et al., 2008; Dezhban et al., 2015). در پژوهش حاضر بیشترین درصد افزایش F0 و بیشترین درصد کاهش Fm در گیاه آلوئه‌ورا و در پساب شهری دیده شد که نشان می‌دهد گیاه آلوئه‌ورا در پساب شهری تنش بیشتری دریافت کرده بود.

فلورسانس متغیر (Fv) نشانگر احیای کامل پذیرنده‌های الکترون (QA) است. وقتی که پذیرنده‌های الکترون در حالت احیای کامل باشند، فلورسانس کلروفیل زیاد بوده، بنابراین Fv نیز زیاد است، اما وقتی پذیرنده‌های الکترون در حالت اکسید باشند، مقدار فلورسانس حداقل است و مقدار Fv نیز کاهش می‌یابد. در این تحقیق، میزان Fv با افزایش هر دو پساب کاهش یافت که این کاهش می‌تواند به دلیل مهار و جلوگیری از انتقال الکترون از سمت دهنده فتوسیستم II به محل پذیرش الکترون توسط مولکول‌های کوئینون (QA و QC) و ممانعت از فتواکسیداسیون فتوسیستم II باشد (mehta et al., 2010). البته درصد کاهش Fv در تیمار پساب شهری در گیاه آلوئه‌ورا و وتیور نسبت به نخل مرداب بیشتر بود. در نتایج Yaghoubian و همکاران در سال ۲۰۱۶ در بررسی تنش فلزات سنگین بر روی گیاه خرفه پهن برگ، با افزایش مقدار فلز سنگین در خاک، افزایش میزان F0، ثابت ماندن Fm و کاهش Fv گزارش شد.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که با افزایش پساب شهری و صنعتی، به ویژه پساب شهری، حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II برای تبدیل انرژی نورانی جذب شده به انرژی شیمیایی کاهش یافت. به‌طوری‌که بیش‌ترین نسبت F_v/F_m که شاخص مناسبی برای نشان دادن کارایی فتوسیستم II است، متعلق به تیمار شاهد در هر سه گونه گیاهی بود. پارامتر F_v/F_m به عنوان یک ابزار مؤثر در تبیین آسیب‌های وارده به دستگاه فتوستتزنکننده قبل از آشکارشدن آن در مورفولوژی گیاه ارزیابی می‌شود و شاخص مناسبی برای بازدارندگی نوری است (Li et al., 2008). افزایش در میزان F0 و کاهش در میزان Fm و F_v/F_m در تنش فلزات سنگین گزارش شده است (Dezhban et al., 2015). Li و همکاران (۲۰۱۷) کاهش در مقادیر F_v/F_m در تنش فلزات سنگین را به همراه کاهش مقدار کلروفیل کل، در گیاهان نخل مرداب و شال‌تسیخ (Coix lacryma-jobi) گزارش کردند. در پژوهش حاضر، کاهش مقدار F_v/F_m را می‌توان به صدمات وارده بر کلروپلاست و یا کاهش میزان محتوای کلروفیل ارتباط داد. نسبت F_v/F_m

نشان‌دهنده بیشینه عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (PSII) است و در شرایطی که عوامل محیطی برای گیاه بازدارنده (تنش‌زا) نباشند، در گزارش‌های مختلف بین ۰/۷۵-۰/۸۵ (Zhao, Bolhar-ordenkamp, 1993) و یا بین ۰/۶۵-۰/۸۵ (et al., 2007) پیشنهاد شده است و هر گونه تغییر در خارج این دامنه‌ها، بسته به نوع گیاه می‌تواند حاکی از اکسیداسیون نوری و آسیب رسیدن به مراکز واکنش فتوسیستم II و یا شاخص تنش باشد (Kaouther et al., 2012). با توجه به شکل ۱ و درصدهای کاهش ذکر شده در بخش نتایج Fv/Fm، می‌توان گفت حداکثر کارایی گیاهان مورد آزمایش تحت تیمار پساب شهری به این ترتیب: نخل مرداب < وتیور < آلوئه‌ورا و در تیمار پساب صنعتی: وتیور < آلوئه‌ورا < نخل مرداب بود. کاهش کمتر Fv/Fm در گیاه نخل مرداب در پساب شهری نسبت به گیاه شاهد، احتمالاً به دلیل کم بودن شاخص انباشت فلزات (MAI) در این گیاه براساس مطالعه قبلی (Ebrahimi, Nokande et al., 2022) بود.

افزایش تنش فلزات سنگین سبب کاهش شاخص کارایی کمپلکس آزادکننده اکسیژن یعنی Fv/F0 شد. فعالیت مجموعه شکافت مولکول آب، در فتوسیستم که حساس‌ترین عضو در زنجیره انتقال الکترون است، با Fv/F0 نشان داده می‌شود و هر کاهش در این نسبت گویای آسیب در زنجیره انتقال الکترون است (Lichtenthaler et al., 2005). با توجه به نتایج تحقیق حاضر، در هر سه گیاه کاهش Fv/F0 در تیمار پساب شهری نسبت به تیمار پساب صنعتی بیشتر مشهود بود که نشان‌دهنده آسیب بیشتر زنجیره انتقال الکترون در برگ گیاهان کشت شده در خاک آلوده به پساب شهری است. در تیمار پساب شهری، کم‌ترین درصد کاهش نسبت به شاهد، در شاخص کارایی کمپلکس آزادکننده اکسیژن، در گیاه نخل مرداب (۳۹/۶٪) دیده شد و در تیمار پساب صنعتی، کم‌ترین درصد کاهش (۲۲/۷٪) مربوط به گیاه وتیور بود که نشان‌دهنده وضعیت بهتر مجموعه شکافت مولکول آب بود. گزارش شده است که نسبت Fv/F0 دامنه بالاتری را در شرایط تنش نشان می‌دهد، زیرا تمام

تغییرات Fv یا F0 (یا هر دو) مستقیماً در آن منعکس می‌شوند (Lichtenthaler, 1992).

بالاترین مقدار بازده کوانتوم مبنا (F0/Fm) تحت تیمار پساب شهری، در گیاه آلوئه‌ورا به مقدار ۰/۳۴ و تحت تیمار پساب صنعتی در گیاه نخل مرداب به مقدار ۰/۳۱ بود. بالاتر رفتن مقدار F0/Fm نشان می‌دهد که میزان تنش افزایش یافته و سبب شده که مقدار کاهش اولیه پلاستوکینون Qa بیشتر از مقدار اکسیداسیون مجدد آن توسط Qb و فعالیت فتوسیستم II باشد. در مطالعه‌ای، مقادیر نرمال نسبت F0/Fm در شرایط فاقد تنش بین ۰/۱۴ تا ۰/۲ پیشنهاد شده است (Rohacek, 2002).

مقدار کلروفیل و رنگدانه‌های فتوستتزی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ظرفیت فتوستتزی گیاهان هستند، زیرا به‌طور مستقیم بر سرعت و میزان فتوستتز و در نهایت تولید زیست‌توده مؤثر هستند. کلروفیل یکی از حیاتی‌ترین ترکیبات شیمیایی گیاهان عالی را تشکیل می‌دهد. گزارش شده که تنش فلز سنگین و افزایش غلظت فلز در بافت برگ، تأثیرات غیرمستقیمی بر محتوای کلروفیل از طریق اختلال متابولیک و پیری زودرس دارد. همچنین غلظت بالای فلز باعث ایجاد تغییرات ساختاری در کلروپلاست برگ‌ها می‌شود (Percival, 2005).

با توجه به نتایج این تحقیق، تیمار پساب صنعتی، در هر سه گیاه نخل مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا منتهی به زیاد شدن یا ثابت ماندن مقدار کلروفیل a، b و کلروفیل کل نسبت به شاهد شد. همچنین در تیمار پساب شهری، میزان کلروفیل a و کلروفیل کل در نخل مرداب افزایش یافت. افزایش محتوای کلروفیل تحت شرایط تنش، می‌تواند ناشی از کوچک شدن سلول‌های برگ در مقابله با تنش باشد (Ghanbari et al., 2013). گزارش شده است که با قرار گرفتن گیاه در معرض غلظت‌های کم تا متوسط فلز سنگین، سنتز کلروفیل افزایش یافته و بنابراین فلئورسانس کلروفیل، جذب نور، انتقال الکترون و جذب CO₂ افزایش می‌یابد (Li et al., 2017). زیاد شدن مقدار کلروفیل a، b، نسبت a/b و کلروفیل کل و همچنین کاهش در مقدار Fv/Fm در تنش فلزات سنگین در مقادیر

سمی سرب و کادمیم در برگ درخت اقاچیا نیز گزارش شده است (Dezhban *et al.*, 2015). در تحقیقی دیگر نیز، گزارشی از افزایش ۱۲ درصدی میزان کلروفیل کل در برگ گیاه انبه در تنش فلز سنگین ارائه دادند. افزایش میزان رنگیزه‌ها در گیاهان متحمل به تنش گزارش شده که به این طریق گیاه در مقابل آسیب فتوسنتزی مقاومت می‌کند (Dezhban *et al.*, 2015).

طبق نتایج این پژوهش، در تیمار پساب شهری، در گیاه آلوئه‌ورا و وتیور، کاهش مقدار کلروفیل *a*، *b* و کلروفیل کل مشاهده شد که می‌تواند به دلیل شکسته شدن کلروپلاست، کاهش تشکیل پلاستیدهای جدید کلروفیل *a* و تغییر در سیستم‌های فتوسنتزی در شرایط تنش‌های محیطی باشد (kulshreshtha *et al.*, 1987). کاهش محتوای کلروفیل در اثر تنش ناشی از فلزات سنگین ممکن است پیامد ممانعت از فعالیت آنزیم‌های مسئول در بیوسنتز کلروفیل یا تجزیه زیستی کلروفیل باشد (Percival, 2005; Thaloonth *et al.*, 2006). کاهش مقدار کلروفیل *a*، کلروفیل کل و کاروتنوئید کل در کنار کاهش *Fv/Fm* و *Fv/F0* توسط Giannakoula و همکاران در سال ۲۰۲۱ با افزایش تنش فلزات سنگین مس و سرب در برگ گیاه نارنج گزارش شده است. بر این اساس به دنبال کاهش و تخریب رنگیزه کلروفیل، گیاه رنگی به نظر می‌رسد که دلیل آن افزایش و قابل رؤیت شدن رنگیزه‌های محافظ مانند کاروتنوئیدها (کاروتن، گزانتوفیل و لیکوپن) و آنتوسیانین‌ها است (Dezhban *et al.*, 2015).

رنگیزه‌های فتوسنتزی نه تنها در تعیین رنگ و فرایند فتوسنتز مؤثرند، بلکه به‌عنوان عوامل ضد اکسیداسیونی در بافت گیاه عمل می‌کنند (Khaleghi *et al.*, 2015)، به‌طوری‌که با جذب انرژی نورانی و انتقال آن به مولکول کلروفیل، سبب افزایش بهره‌وری سیستم فتوسنتزی گیاه می‌شوند. از طرفی زمانی که برگ در معرض انرژی نورانی مازاد بر ظرفیت فتوسنتزی قرار دارد، با آزاد کردن بخشی از انرژی نورانی

منابع

جذب شده توسط چرخه زانتوفیل، سبب ممانعت از آسیب نوری به دستگاه فتوسنتزی برگ و کاهش فلئورسانس کلروفیل می‌شوند (Young and Frank, 1996). با توجه به افزایش مقدار کاروتنوئید در گیاه وتیور و نخل‌مرداب در تیمار پساب صنعتی، به نظر می‌رسد که احتمالاً در تنش پساب صنعتی، گیاهان وتیور و نخل‌مرداب با افزایش کاروتنوئیدها به روند فتوسنتز کمک کرده‌اند. کاهش محتوای کاروتنوئید در هر سه گیاه نخل‌مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا در تیمار پساب شهری (که حاوی غلظت بالاتر فلزات بود) احتمالاً به دلیل اکسید شدن توسط اکسیژن فعال و تخریب ساختار آن‌ها است (Wang *et al.*, 2010).

نتیجه‌گیری

بر اساس داده‌های به‌دست آمده از عوامل بررسی‌شده در این تحقیق، هر سه گیاه نخل‌مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا در تیمار پساب صنعتی نسبت به تیمار پساب شهری، وضعیت بهتری داشتند و این موضوع را می‌توان به غلظت کمتر آلاینده‌ها و کمتر بودن BOD و COD، در پساب صنعتی نسبت به پساب شهری در این مطالعه مرتبط دانست. طبق نتایج تحقیق حاضر، در تیمار پساب صنعتی، بیشتر شاهد افزایش میزان رنگیزه‌ها (برای مقابله با آسیب فتوسنتزی) و در تیمار پساب شهری، شاهد کاهش میزان رنگیزه‌ها (به‌علت آسیب فتوسنتزی) بودیم. با توجه به بررسی حداکثر کارایی کوانتومی فتوسنتز II و خصوصیات مورفولوژیک اندازه‌گیری شده در این تحقیق به نظر می‌رسد، در تیمار پساب شهری، گیاه آلوئه‌ورا آسیب بیشتری دیده و گیاهان وتیور و نخل‌مرداب از نظر مقاومت و قدرت پالایش موفق‌تر بودند. در تیمار پساب صنعتی نیز گیاه وتیور و آلوئه‌ورا بهتر از نخل‌مرداب بودند.

Adriano, D. C. (2001) Trace Elements in Terrestrial Environments; Biochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. Springer-Verlag, New York.

- Andrews, J. R., Fryer, M. J. and Baker, N. R. (1995) Characterization of chilling effects on photosynthetic performance of maize crops during early season growth using chlorophyll fluorescence. *Journal of Experimental Botany* 46: 1195-1203.
- AL-Oud Saud, S. (2003) Heavy metal contents in Tea and Herb leaves. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 6: 208-221.
- Argos, M., Kalra, T., Pierce, B. L., Chen, Y., Parvez, F., Islam, T., Ahmed, A., Hasan, R., Hasan, K. and Sarwar, G. (2011) A prospective study of arsenic exposure from drinking water and incidence of skin lesions in Bangladesh. *American Journal of Epidemiology* 174: 185-194.
- Arnon, D. I. (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology* 24: 1-15.
- Baker, A. J. M. (1981) Accumulators and excluders -strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* 3: 643-654.
- Bolhar-nordenkampf, H. R., Leegood, R. G. and Long, S. P. (1993) Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual. Chapman and Hall, London 193-206.
- Chaneva, G., Parvanova, P., Tzvetkova, N. and Uzunova, A. (2010) Photosynthetic response of maize plants against cad-mium and paraquat impact. *Water Air Soil Pollut* 208: 287-293.
- Dezhban, A., Shirvany, A., Attarod, P., Delshad, M., Matinizadaeh, M. and Khoshnevis, M. (2015) Cadmium and lead effects on chlorophyll fluorescence, chlorophyll pigments and proline of *Robinia pseudoacacia*. *Journal of Forestry Research* 26: 323-329.
- Drazkiewicz, M. (1994) Chlorophyll-occurrence, functions, mechanism of action, effects of internal and external factors. *Photosynthetica* 30: 321-331.
- Ebrahimi nokande, S., Razavi, S. M. and Afshar mohammadian, M. (2022) Chiang mei university of natural science (in press).
- Ekmekci, Y., Deniz, T. and Beycan, A. (2008) Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. *Plant Physiology* 165: 600-611.
- European Commission. (2013) Soil Contamination: Impacts on Human Health. Science for Environmental Policy. Report produced for the European Commission DG Environment. September. Science Communication Unit. University of the West of England. Bristol.
- Gajic, G. and Pavlovic, P. (2018) The role of vascular plants in the phytoremediation of fly ash deposits. *Phytoremediation: Methods, Management and Assessment* 151-236.
- Ghanbari, A. A., Shakiba, M. R., Toorchi, M. and Choukan, R. (2013) Morpho-physiological responses of common bean leaf to water deficit stress. *European Journal of Experimental Biology* 3: 487-492.
- Giannakoula, A., Therios, I. and Chatzissavvidis, C. (2021) Effect of lead and copper on photosynthetic apparatus in citrus (*Citrus aurantium* L.) plants. The role of antioxidants in oxidative damage as a response to heavy metal stress. *Plants* 10: 155.
- Hakam, N., DeEll, J. R., Khanizadeh, S. and Richer, C. (2000) Assessing chilling tolerance in roses using chlorophyll fluorescence. *Hort Science* 35: 184-186.
- Hosseini, Z. and Pourakbar, L. (2013) Investigation of interaction between zinc and organic acid (malic acid, citric acid) on antioxidant responses in *Zea mays* L. *Journal of Plant Biology* 16: 1-12.
- Jiang, C., Jiang, G. M., Wang, X., Li, L. H., Biwas, D. K. and Li, Y. G. (2006) Increased photosynthetic activities and thermostability of photosystem II with leaf development of elm seedlings (*Ulmus pumila*) probed by the fast fluorescence rise OJIP. *Environmental an Experimental Botan* 58: 261-68.
- Kalaji, H. M., Govindjee Karolina, B., Januszcz, K. and Krystina, Z. G. (2011) Effects of salt stress on photosystem II efficiency and CO₂ assimilation of two Syrian barley landraces. *Environmental and Experimental Botany* 73: 64-72.
- Kaouther, Z., Mariem, B. F., Fardaous, M. and Cherif, H. (2012) Impact of salt stress (NaCl) on growth, chlorophyll content and fluorescence of Tunisian cultivars of chili pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Journal of Stress Physiology and Biochemistry* 8.
- Khaleghi, E., Arzani, K., Moallemi, N. and Barzegar, M. (2015) The efficacy of kaolin particle film on oil quality indices of olive trees (*Olea europaea* L.) cv 'Zard'grown under warm and semi-arid region of Iran. *Food Chemistry* 166: 35-41.
- Kulshreshtha, S., Mishra, D. and Gupta, R. (1987) Changes in contents of chlorophyll, proteins and lipids in whole chloroplasts and chloroplast membrane fractions at different leaf water potentials in drought resistant and sensitive genotypes of wheat. *Photosynthetica (Czechoslovakia)*.
- Li, Q. M., Liu, B. B., Wu, Y. and Zou, Z. R. (2008) Interactive effects of drought stresses and elevated CO₂ concentration on photochemistry efficiency of cucumber seedlings. *Journal of Integrative Plant Biology* 50: 1307-1317.

- Li, S., Huang, H., Li, Z., Li, Z., He, Z. and Liang, H. (2017) Chromium removal capability and photosynthetic characteristics of *Cyperus alternifolius* and *Coix lacryma-jobi* L. in vertical flow constructed wetland treated with hexavalent chromium bearing domestic sewage. *Water Science and Technology* 76: 2203-2212.
- Lichtenthaler, H. K. (1987) Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology* 148: 350-382.
- Lichtenthaler, H. K. (1992) The kautsky effect: 60 years of chlorophyll fluorescence induction kinetics. *Photosynthetica* 27: 45-55.
- Lichtenthaler, H. and Rinderle, U. (1988) The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress condition in plants. *C R C Critical Reviews in Analytical Chemistry* 19: 529-585.
- Lichtenthaler, H. K., Buschmann, C. and Knapp, M. (2005) How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. *Photosynthetica* 43: 379-393.
- Ling, W., Shen, Q., Gao, Y., Gu, X. and Yang, Z. (2008) Use of bentonite to control the release of copper from contaminated soils. *Soil Research* 45: 618-623.
- Mehta, P., Jajoo, A., Mathur, S. and Bharti, S. (2010) Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on photosystem II in wheat leaves. *Plant Physiology and Biochemistry* 48: 16-20.
- Mohammad, J., Naziri, M., Naziri, A., Shah, D. and Jamal, H. (1996) Wheat yield component as affected by low waterstress at different growth stage. *Sarhad Journal of Agriculture* 12: 19-26.
- Mohsenzadeh, S., Naderi, N. and Nazari, M. (2016) Physiological responses of *Vetiver zizanioides* to municipal waste leachate. *Plant Biology* 8: 79-96.
- Percival, G. C. (2005) Use of chlorophyll fluorescence to identify chemical and environmental stresses in leaf tissue of three oak species. *Journal of Arboriculture* 31: 215-227.
- Pilon Smits, E. (2005) Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology* 56: 15-39.
- Ramirez-Sosa, D. R., Castillo-Borges, E. R., Mendez-Novelo, R. I., Sauri-Riancho, M. R., Barcelo-Quintanilla, M. and Marrufo-Gomez, J. M. (2013) Determination of organic compounds in landfill leachates treated by Fenton-Adsorption. *Waste Management* 33: 390-395.
- Richards, L. A. (1954) *Agriculture, Handbook, phytoremediation with the hyperaccumulator Thlaspi caerulescens*. Plant and Soil. US Department of Agriculture, Washington.
- Rohacek, K. (2002) Chlorophyll fluorescence parameters: The definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships. *Photosynthetica* 40: 13-29.
- Ruilian, Y., Junfeng, J., Xuyin, Y., Yinxian, S. and Cheng, W. (2012) Accumulation and translocation of heavy metals in the canola (*Brassica napus* L.) soil system in Yangtze River Delta China. *Plant and Soil* 353: 33-45.
- Salt, D. E., Smith, R. D. and Raskin, I. (1998) Phytoremediation: *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 49: 643-668.
- Sharma, P. and Dubey, R. S. (2005) Lead toxicity in plants. *Journal of Plant Physiology* 17: 35-52.
- Stoeva, N., Berova, M. and Zlatev, Z. (2005) Effect of arsenic on some physiological parameters in bean plants. *Biologia Plantarum* 49: 293-296.
- Taiz, L. and Zeiger, E. (2014) *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Massachusetts.
- Thalooth, A., Tawfik, M. and Mohamed, H. M. (2006) A comparative study on the effect of foliar application of zinc, potassium and magnesium on growth, yield and some chemical constituents of mungbean plants grown under water stress conditions. *World Journal of Agricultural Sciences* 2: 37-46.
- Torresday, J. L., Videa, J. R., Rosa, G. D. and Parsons, J. (2005) Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coordination Chemistry Reviews* 249: 1797-1810.
- Uba, S., Uzairu, A. and Okunola, O. J. (2009) Content of heavy metals in *Lumbricus terrestris* and associated soils in dump sites. *International Journal of Environmental Research* 3: 353-358.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2005) United States of Environmental Protection Agency. Office of Water Regulations and Standards. EPA 440/5-86-001 273.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2021) <http://www.epa.gov/hw/household-hazardous-waste-hhw>.
- Walkley, A. and Black, I. A. (1934) An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
- Wang, L. J., Fan, L., Loescher, W. Duan, W., Liu, G. J., Cheng, J. S., Luo, H. B. and Li, S. H. (2010) Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. *BMC Plant Biology* 10: 34.
- Weinberg, Z. G., Ashbell, G., Chen, Y., Gamborg, M. and Sela, S. (2004) The effect of sewage irrigation on safety and hygiene of forage crops and silage. *Animal Feed Science and Technology* 116: 271-280.
- WHO. (2000) Safety evaluation of certain food additives and contaminants. *International Programme on Chemical Safety*. WHO Food Additive Series 52.

- Yaghoubian, Y., Siadat, S. A., Moradi Telavat, M. R. and Pirdashti, H. (2016) Quantify the response of purslane plant growth, photosynthesis pigments and photosystem II photochemistry to cadmium concentration gradients in the soil. *Russian Journal of Plant Physiology* 63: 77-84.
- Yang, X., Feng, Y., He, Z. and Stoffella, P. J. (2005) Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 18: 339-353.
- Young, A. J. and Frank, H. A. (1996) Energy transfer reactions involving carotenoids: Quenching of chlorophyll fluorescence. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 36: 3-15.
- Zarco-Tejada, Berni, P. J., Suarez, J. A. J., Sepulcre-Canto, L., Morales, F. and Miller, J. R. (2009) Imaging chlorophyll fluorescence with an airbonment stress detection. *Remote Sensing of Environment* 113: 1262-1275.
- Zhang, Y., Xie, Z., Wang, Y., Su, P., An, L. and Gao, H. (2011) Effect of water stress on leaf photosynthesis, chlorophyll content and growth of oriental lily. *Russian Journal of Plant Physiology* 58: 844-850.
- Zhao, G., Ma, B. and Ren, C. (2007) Growth, gas exchange, chlorophyll fluorescence, and ion content of naked oat in response to salinity. *Crop Science* 47: 123-131.
- Zlatev, Z. S. and Yordanov, I. T. (2004) Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. *Bulgarian Journal of Plant Physiology* 30: 3-18.

Investigation of some morphological characteristics, chlorophyll fluorescence and photosynthetic indices of *C. alternifolius*, *V. zizanioides* and *A. vera* irrigated with urban and industrial wastewater

Sareh Ebrahimi Nokande^{*1}, Seyed Mehdi Razavi¹, and Mansour Afshar Mohammadian²

¹Department of Biology, Faculty of Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

²Department of Biology, Faculty of Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

(Received: 08/04/2022, Accepted: 02/08/2022)

Abstract

Soil pollution due to urban and industrial effluents containing heavy metals is one of the most serious environmental problems, and phytoremediation is a bio-cost-effective method for removing heavy metals from contaminated soil and water. In this regard, choosing the suitable plant for phytoremediation according to the type of pollution is very important. Since in addition to the amount of heavy metal absorption, the morphological and physiological characteristics of plants are also important in phytoremediation, an experiment was designed to investigate some morphological characteristics and fluorescence parameters of chlorophyll and the content of photosynthetic pigments of three plants including *C. alternifolius*, *V. zizanioides* and *A. vera* under two types of urban and industrial wastewater treatments. The results showed that urban and industrial wastewater treatments caused significant changes in all of the examined parameters. The interaction of wastewater and plant species on fresh weight of roots and shoots, dry weight of shoots, F0, Fm, Fv, chlorophyll a, b as well as Chlorophyll a+b were significant and for the other evaluated parameters were not significant. In general, based on this study, regarding the phytoremediation potential of the examined plants, it can be said that in soils polluted with urban wastewater, *V. zizanioides* and *C. alternifolius* and in soils polluted with industrial wastewater, *V. zizanioides* and *A. vera* were more effective.

Keywords: Chlorophyll fluorescence, Heavy metals, Phytoremediation, Wastewater