مقاله پژوهشی

بررسی برخی از خصوصیات مورفولوژیکی، فلورسانس کلروفیل و شاخص‌های فتوسنتزی در گیاهان نخل‌مرداب (*Cyperus alternifolius*) وتیور (*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 وگیاه پالایی یک روش زیستی و مقرون به‌صرفه 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 موفولوژیک 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 نخل‌مرداب، وتیور 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، F0، Fm، Fv، کلروفیل a، b و کلروفیل a+b معنی‌دار و برای بقیه مؤلفه‌های ارزیابی‌شده معنی‌دار نبود. در مجموع براساس مؤلفه‌های مورد آزمایش در این تحقیق می‌توان گفت که در خاک آلوده به پساب شهری، گیاهان وتیور و نخل‌مرداب و در خاک آلوده به پساب صنعتی، گیاهان وتیور و آلوئه‌ورا بهتر عمل کردند.

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

مقدمه

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 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)،

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

جیوه (Hg)، نقره (Ag)، سلنیم (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 به‌دلیل 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 به‌صرفه 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). برای پاک‌سازی محیط از آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، انواع فن‌آوری‌های زیست پالایی به صورت تجزیه گیاهی (Phytodegredation)، تثبیت گیاهی (Phytostabilization)، استخراج گیاهی (Phytoextraction)، تبخیر گیاهی (Phytovolatilization)، فیلتراسیون ریزوسفری (Rhizofilteration) 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 عمده‌ایی 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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 فتوسنتزی گیاهان است که یکی از مهم‌ترین عوامل برای تعیین ظرفیت فتوسنتزی در طول زندگی گیاه است (Stoeva *et al*., 2005). به‌طورکلی، راندمان جذب انرژی تابشی توسط برگ گیاهان ۱۰۰ ٪ 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 فتوسنتز، 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 فتوسنتزکننده 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 فلئورسانس 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 فتوسنتزکننده در گونه‌های مختلف گیاهی و در پاسخ به تنش‌های محیطی استفاده کرد (Percival, 2005).

در برخی مطالعات، رابطه بین فلورسانس کلروفیل و کارایی فتوسنتزی گیاه در تنش فلزات سنگین بررسی شده است (Chaneva *et al*., 2010; Yaghoubian *et al*., 2016; Li *et al*., 2017; Giannakoula *et al*., 2021). گزارش شده یکی از اقدامات اولیه گیاهان در برابر اثر منفی فلزات سنگین، مهار فتوسنتزی است، زیرا فلزات سنگین بر عملکرد دستگاه فتوسنتزی، 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 ریشه‌ایی 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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 آلوئه‌ورا و در گیاه آلوئه‌ورا بیشتر از نخل‌مرداب بود (وتیور> آلوئه‌ورا> 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 نخل مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا 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 آلوئه‌ورا، 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 Emission Spectrometer (ICP-OES) مدل (ARCOS, 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 آلوئه‌ورا 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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

EC ds/m	pH	کربن آلی	ازت کل	شن	سیلت	رس	فسفرقابل جذب	قابل پتاسیم جذب	بافت خاک	Zn	Cr	Pb	Cu	Mn	Ni	Mg
				٪			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 رشدیافته 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 (F0) و فلورسانس حداکثر (Fm) در حالت‌های سازگارشده به تاریکی، برخی از مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل با استفاده از رابطه‌های زیر ارزیابی شدند (Rohacek, 2002; Kalaji *et al*., 2011; Zhang *et al*., 2011):

رابطه (۱) $Fv = (F_m - F_0)$ فلورسانس متغیر

رابطه (۲) $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$ حداکثر کارایی کوانتومی II

رابطه (۳) شاخص کارایی کمپلکس آزادکننده اکسیژن $F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0$

رابطه (۴) F_0/F_m = 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 به‌مدت 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 به‌مدت 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 اندازه‌گیری‌شده به‌غیر 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 ازCu) در خاک پساب شهری بیشتر از خاک پساب صنعتی کارخانه تولید کاغذ بود.

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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).

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

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)

$$\text{Chl a} = (12.7 \times A663 - 2.69 \times A645)\ V/1000\,W$$

رابطه (۶)

$$\text{Chl b} = (22.9 \times A645 - 4.68 \times A663)\ V/1000\,W$$

رابطه (۷)

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

رابطه (۸)

$$\text{Car} = \left[\left((1000 \times A470) - (1.82 \times \text{chl. a}) - (85.02 \times \text{chl. b})\right)/198\right] V/1000\,W$$

آنالیز واریانس برای هر یک از شاخص‌ها با استفاده از برنامه آماری SPSS (24)، آزمون چنددامنه‌ایی دانکن و در سطح احتمال P≤۰/۰۵ 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 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 وتیور تغییر معنی‌داری نسبت به شاهد دیده نشد.

با توجه به شکل ۱ (B)، وزن خشک ریشه هر سه گیاه نخل‌مرداب، وتیور 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.

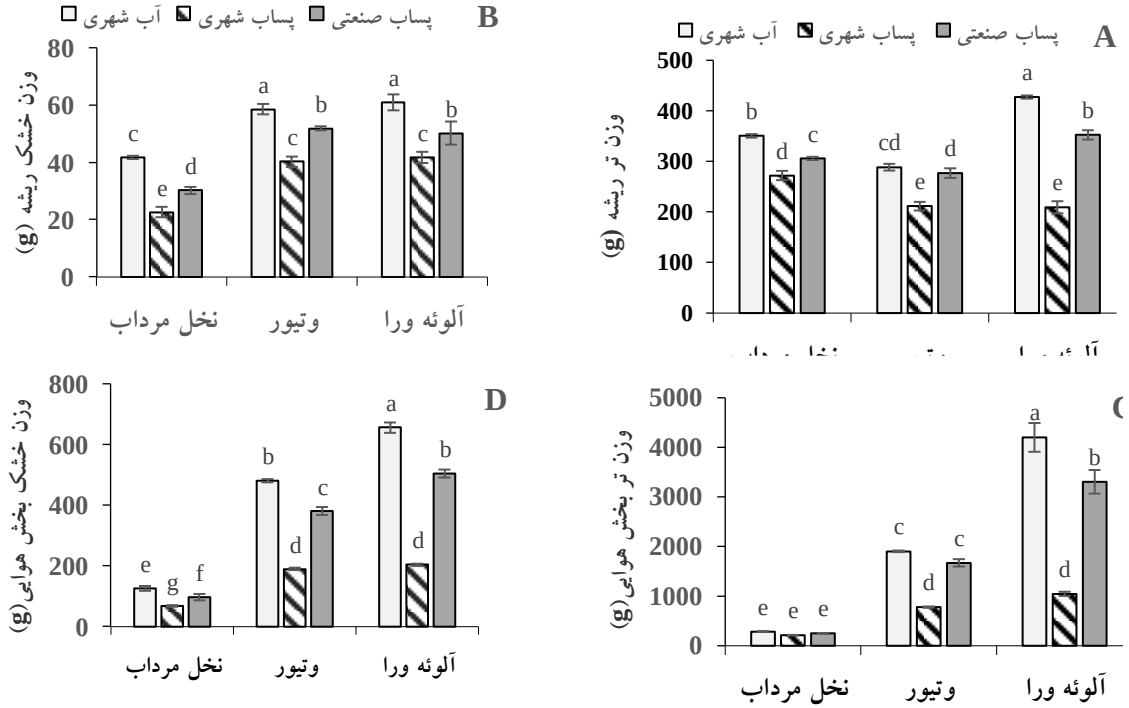
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک سه گیاه نخل‌مرداب، 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*
گونه‌گیاه	۲	۱۱۹۵۹/۶۶*	۱۰۹۶/۰۵*	۱۵۲۳۹۸۲۶/۲۶*	۳۰۴۳۶۳/۳۱*
اثر متقابل تیمار و گونه گیاه	۲	۵۳۶۸/۳۱*	۵/۷۴ns	۱۹۵۴۸۳۳/۹۳*	۳۰۸۶۰/۴۱*
خطا	۱۸	۱۸۰/۹۸	۱۲/۴۱	۴۹۶۷۳/۳۰	۲۴۶/۲۳

*** و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ درصد و غیر معنی‌دار است.**



شکل ۱- A) وزن تر ریشه، B) وزن خشک ریشه، C) وزن تر اندام هوایی D) وزن خشک اندام هوایی سه گیاه نخل‌مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا. مقادیر، میانگین سه تکرار SE± است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال P≤۰/۰۵ است.

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 معنی‌داری در همه مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل (F0، Fm، Fv، Fv/Fm، Fv/F0، F0/Fm) در سطح احتمال ۵٪ ایجاد شد. درحالی‌که اثر گونه، فقط بر مؤلفه‌های F0، Fm، Fv و اثر متقابل پساب و گونه گیاهی بر مؤلفه‌های Fm و Fv معنی‌دار 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		F0	Fm	Fv	Fv/Fm	FV/F0	F0/Fm
تیمار	۲	۴۱۹۵۵/۸۲*	۳۲۲۰۱۸/۷۸*	۵۹۱۷۳۹/۸۲*	۰/۰۳۴*	۸/۸۷۳*	۰/۰۳۴*
گونه‌گیاه	۲	۵۸۶۷۲/۴۸*	۱۱۹۳۹۰۶۸/۷*	۷۲۷۳۴۳/۳۷*	۰/۰۰ns	۰/۲۱۳ns	۰/۰۰ ns
اثر متقابل تیمار و گونه گیاه	۲	۱۸۵۵/۲۶ns	۵۵۱۵۰/۲۲*	۷۳۶۰۸/۹۳*	۰/۰۰۱ns	۰/۳۱۱ns	۰/۰۰۱ns
خطا	۱۸	۳۰۴۴/۶۳	۴۰۵۴/۲۶	۶۷۰۳/۶۷	۰/۰۰۱	۰/۲۶۹	۰/۰۰۱

*** و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ درصد و غیر معنی‌دار است.**

داشت. اما این افزایش در گیاهان نخل‌مرداب 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 تیمارشده 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 تیمارشده با پساب صنعتی کاهش معنی‌دار Fm در گیاهان نخل‌مرداب و وتیور مشهود بود.

براساس 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 نخل‌مرداب (۱۲/۳٪) مقدار Fv/Fm کاهش یافت. در تیمار پساب صنعتی نیز گیاه آلوئه‌ورا (۱۰/۴٪) و گیاه نخل‌مرداب (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 مقدارFV/F0 مربوط به گیاهان شاهد در هر سه گونه گیاهی بود.

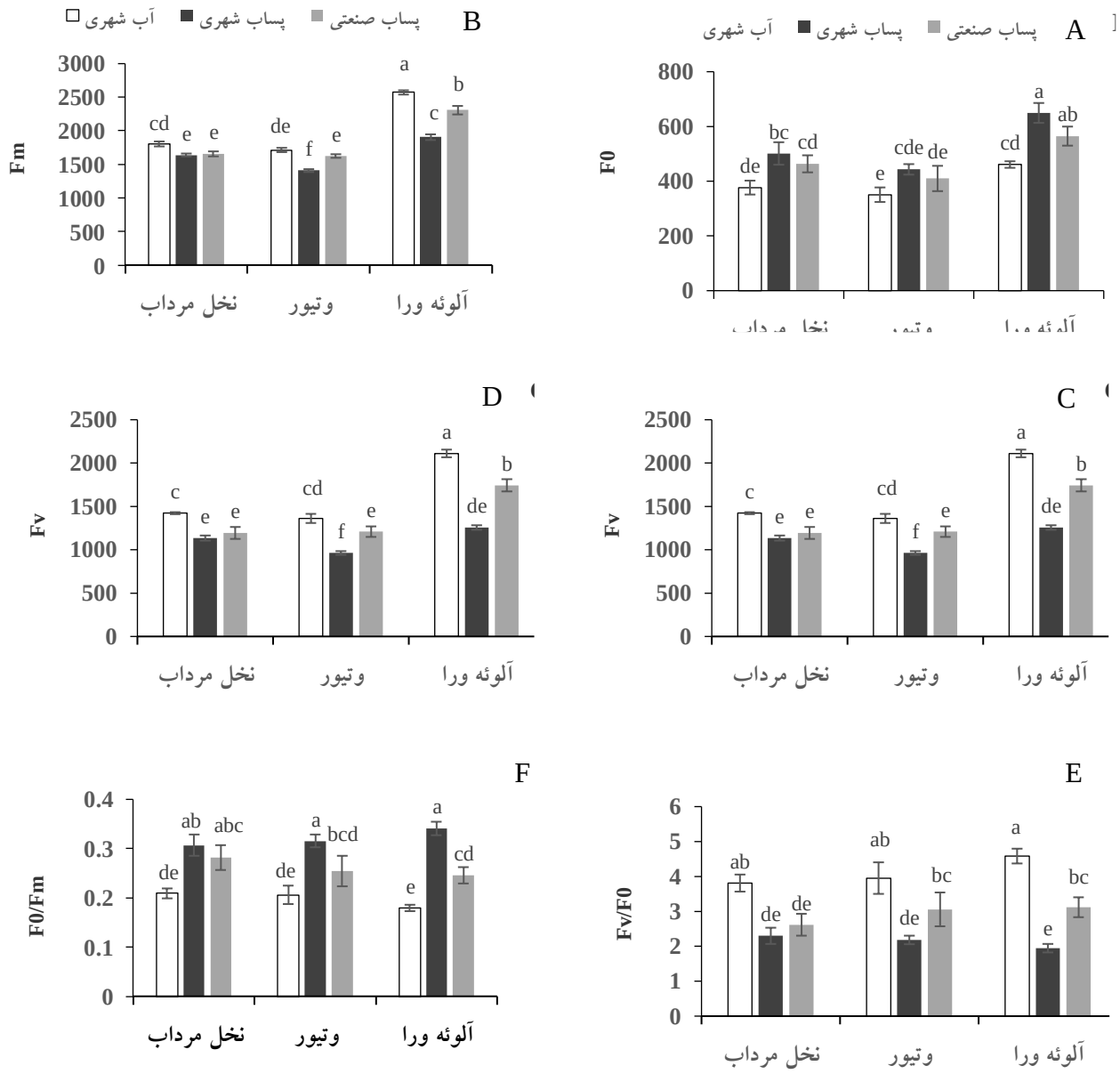
طبق نتایج در تیمار پساب شهری در تمام گونه‌های گیاهی مورد مطالعه، افزایش معنی‌داری در میزان (F0/Fm) مشاهده شد و در تیمار پساب صنعتی افزایش معنی‌دار در مقدار F0/Fm در گیاهان نخل‌مرداب و آلوئه‌ورا مشهود بود (شکل ۲F).

رنگیزه‌های فتوسنتزی: طبق نتایج ذکرشده در جدول ۶، تجزیه واریانس مربوط به شاخص‌های فتوسنتزی در برگ سه گیاه نخل‌مرداب، 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 بی‌معنی 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 نخل‌مرداب و به‌ترتیب کاهش ۱۵/۲۸٪ و ۰/۱۸/۷۵٪ در برگ آلوئه‌ورا و وتیور داشت.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]



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 مبنا در برگ سه گیاه نخل‌مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا. مقادیر، میانگین سه تکرار SE± است. حروف یکسان بیان‌گر عدم اختلاف معنی‌دار با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال P≤۰/۰۵ است.

طبق شکل ۳ (B) علی رغم افزایش کلروفیل b در هر سه گیاه نخل‌مرداب، آلوئه‌ورا و وتیور در تیمار پساب صنعتی، این افزایش معنی‌دار نبود. در تیمار پساب شهری گیاه آلوئه‌ورا بیش‌ترین درصد کاهش را در مقدار کلروفیل b داشت.

با توجه به شکل ۳ (C) میزان کلروفیل کل گیاه نخل‌مرداب در تیمار شهری و صنعتی با اندکی افزایش تغییر معنی‌داری نسبت به شاهد نداشت. میزان کلروفیل در دو گیاه نخل‌مرداب و آلوئه‌ورا 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 گیاه‌آلوئه‌ورا در تیمار شهری معنی‌دار بود.

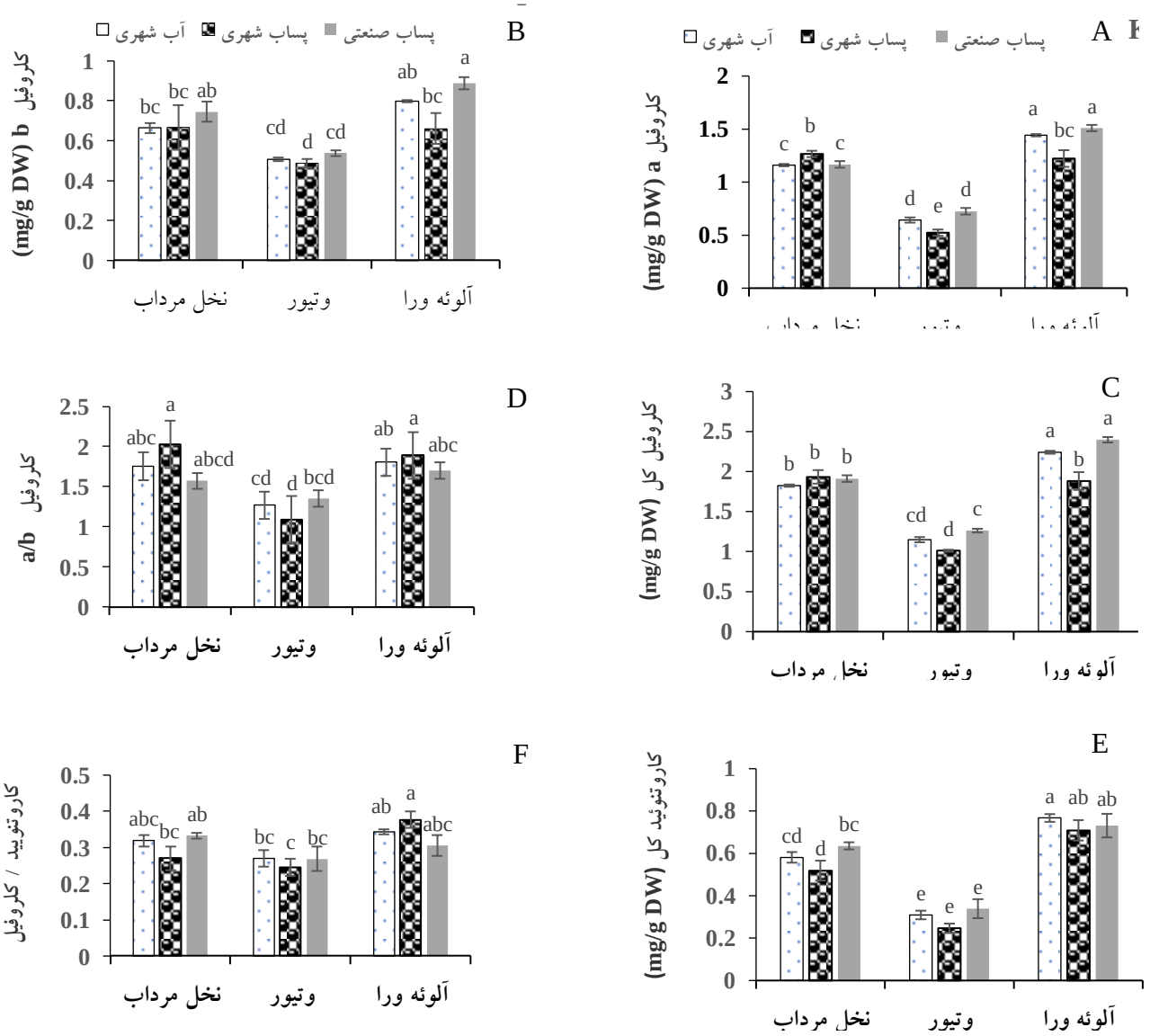
طبق نتایج این مطالعه، اثر گونه بر نسبت کلروفیل a/b،

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید	نسبت کلروفیل a/b	نسبت کاروتنوئید /کلروفیل کل
تیمار	۲	۰/۰۳۸*	۰/۰۱۴*	۰/۱۳۹*	۰/۰۱۵*	۰/۰۳۶ns	۰/۰۰ns
گونه‌گیاه	۲	۱/۴۰۷*	۰/۱۹۳*	۲/۵۶۳*	۰/۴۴۲*	۰/۹۲۷*	۰/۰۱۵*
اثر متقابل تیمار و گونه گیاه	۲	۰/۰۳۵*	۰/۰۲۲ns	۰/۰۶۴*	۰/۰۰۲ns	۰/۱۰۲ns	۰/۰۰۴ns
خطا	۱۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴	۰/۰۷	۰/۰۰۲

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



شکل ۳- A) محتوای کلروفیل a، B) محتوای کلروفیل b، C) کلروفیل کل، D) نسبت محتوی کلروفیل a/b، E) محتوی کاروتنوئید کل، F) نسبت مقدار کاروتنوئید به کلروفیل در برگ سه گیاه نخل‌مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا. مقادیر، میانگین سه تکرار SE± است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال P≤۰/۰۵ است.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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 نخل‌مرداب و وتیور در مقایسه با شاهد، این افزایش معنی‌دار نبود.

براساس شکل ۳F، در تیمار پساب شهری، دو گونه نخل‌مرداب 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 تاثیر 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 نخل‌مرداب 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 نخل‌مرداب 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 سوئ 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-Sosa *et al*., 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 فلورومتری 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

(QB) و کوئینونآ (QA) بوده، انرژی را به پلاستوکوئینون PQ و از PQ به فتوسیستم I انتقال داده و صرف تولید NADPH و ATP می‌کنند، در این حالت سیستم دارای کم‌ترین فلورسانس (F0) است و فعالیت‌های فتوسنتزی 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 مشاهده‌شده می‌تواند مربوط به آسیب دستگاه فتوسنتزی 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 کاراتر خواهد بود. در حقیقت، افزایش فلئورسانس 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 نخل‌مرداب 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، تابت ماندن Fm و کاهش Fv گزارش شد.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که با افزایش پساب شهری و صنعتی، به ویژه پساب شهری، حداکثر کارآیی 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 Fv/Fm به عنوان یک ابزار مؤثر در تبیین آسیب‌های وارده به دستگاه فتوسنتزکننده 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 Fv/Fm در تنش فلزات سنگین گزارش شده است (Dezhban *et al*., 2015). Li و همکاران (۲۰۱۷) کاهش در مقادیر FV/Fm در تنش فلزات سنگین را به همراه کاهش مقدار کلروفیل کل، در گیاهان نخل‌مرداب و شال‌تسبیح (*Coix lacryma-jobi*) گزارش کردند. در پژوهش حاضر، کاهش مقدار Fv/Fm را می‌توان به صدمات وارده بر کلروپلاست و یا کاهش میزان محتوای کلروفیل ارتباط داد. نسبت Fv/Fm

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

نشان‌دهنده بیشینه عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (PSII) است و در شرایطی که عوامل محیطی برای گیاه بازدارنده (تنش‌زا) نباشند، در گزارش‌های مختلف بین ۰/۸۵–۰/۷۵ (Bolhar-ordenkampf, 1993) و یا بین ۰/۸۵–۰/۶۵ (Zhao *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 ذکرشده در بخش نتایج Fv/Fm، می‌توان گفت حداکثر کارایی گیاهان مورد آزمایش تحت تیمار پساب شهری به این ترتیب: نخل‌مرداب > وتیور > آلوئه‌ورا و در تیمار پساب صنعتی: وتیور > آلوئه‌ورا > نخل‌مرداب بود. کاهش کمتر Fv/Fm در گیاه نخل‌مرداب 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 نخل‌مرداب (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 نخل‌مرداب 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 مطالعه‌ایی، مقادیر نرمال نسبت F0/Fm در شرایط فاقد تنش بین ۰/۱۴ تا ۰/۲ پیشنهاد شده است (Rohacek, 2002).

مقدار کلروفیل و رنگدانه‌های فتوسنتزی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ظرفیت فتوسنتزی گیاهان هستند، زیرا به‌طور مستقیم بر سرعت و میزان فتوسنتز 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 نخل‌مرداب، وتیور و آلوئه‌ورا منتهی به زیاد شدن یا ثابت ماندن مقدارکلروفیل a، b و کلروفیل کل نسبت به شاهد شد. همچنین در تیمار پساب شهری، میزان کلروفیل a و کلروفیل کل در نخل‌مرداب افزایش یافت. افزایش محتوای کلروفیل تحت شرایط تنش، می‌تواند ناشی از کوچک‌شدن 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 CO_2 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

سمی سرب و کادمیم در برگ درخت اقاقیا 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 فتوسنتری 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 به‌دلیل 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; Thalooth *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 ضداکسیداسیونی 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 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 به‌دلیل 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 رنگریزه‌ها (برای مقابله با آسیب فتوسنتری) و در تیمار پساب شهری، شاهد کاهش میزان رنگریزه‌ها (به‌علت آسیب فتوسنتری) بودیم. با توجه به بررسی حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیتم 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.

منابع

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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., Matinizadeh, 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., Janussz, K. and Krystina, Z. G. (2011) Effects of salt stress on photosystem II efficiency and CO_2 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 CO_2 concentration on photochemistry efficiency of cucumber seedlings. Journal of Integrative Plant Biology 50: 1307-1317.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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. andYang, 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 flurescence 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-Quintalb, 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) Phytoremediatoin 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., Gamburg, 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.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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 anairbonment stressdetection. 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.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]

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

Sareh Ebrahimi Nokande[*1], Seyed Mehdi Razavi[1], and Mansour Afshar Mohammadian[2]

[1] Department of Biology, Faculty of Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[2] Department 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. zizanioide* 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. zizanioide* and *C. alternifolius* and in soils polluted with industrial wastewater, *V. zizanioide* and *A. vera* were more effective.

Keywords: Chlorophyll fluorescence, Heavy metals, Phytoremediation, Wastewater

Corresponding author, Email: razavi694@gmail.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.21.9]