گل و گیاهان زینتی (۱۴۰۴)، ۱۰(۲): ۲۸۵-۳۰۰
مقاله پژوهشی

بررسی میزان جذب آلاینده‌های محیطی و تغییرهای برخاسته از آن بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک اقاقیا (*Robinia pseudoacacia* L. cv. Umbraculifera) و چنار (*Platanus orientalis* L. Minart)

سید محمد احمدی حسینی[۱]، محمود شور[۱*]، علی تهرانی‌فر[۱]، وحید اکبرپور[۲]

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲. گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

shoor@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳

چکیده

آلودگی هوا افزون بر تأثیر بر سلامت ساکنان شهرها، بر رشد و کیفیت درختان فضای سبز شهری نیز مؤثر است. کاشت گونه‌های گیاهی مقاوم به آلاینده‌های هوا تأثیر بسزایی در بالا بردن کیفیت هوای شهرها دارد. بنابراین، برای بررسی میزان جذب آلاینده‌های محیطی و تغییرات بیوشیمیایی برخاسته از آن بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک اقاقیا و چنار، آزمایشی در سال ۱۳۹۸ در سطح شهر مشهد انجام شد. نمونه‌برداری‌ها از درختان تقریباً هم‌سن در فصل تابستان انجام شد. نمونه‌های برگ از هر گیاه از یک متری اول تاج به بالا و در سه تراز ارتفاعی پایینی، میانی و بالایی تاج و از شاخه‌های بیرونی برداشت و صفات فیزیولوژیک شامل سبزینه a، b و کل، کاروتنوئیدها، صفات بیوشیمیایی، هیدرات‌های کربن، پرولین، پروتئین، برخی عناصر سنگین مانند ، کادمیوم، سرب و فعالیت آنزیمی کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز و پراکسیداز برای تعیین همبستگی با میزان جذب آلاینده‌های محیطی، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که میزان سبزینه a و b و سبزینه کل و کارتنوئید در منطقه‌ی آلوده (در منطقه خیام و شهرک شهید رجائی) نسبت به منطقه‌ی پاک (ایستگاه‌های سرافرازان و الهیه) کاهش یافته است. در مقابل میزان هیدرات‌های کربن، پرولین، پروتئین، کادمیوم، سرب، کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز و پراکسیداز در مناطق آلوده افزایش معنی‌داری در اقاقیا و چنار نشان دادند.

واژه های کلیدی: آلاینده‌های هوا، پاسخ‌های فیزیولوژیکی، تصفیه طبیعی، فضای سبز شهری.

مقدمه

مسئله آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست محیطی شهرهای توسعه یافته و در حال توسعه است. گیاهان با این‌که تا حدی در کاهش آلودگی هوا مؤثر هستند، اما ممکن است تحت تأثیر آلاینده‌ها نیز قرار گرفته و آسیب ببینند (Omidi et *al.*, 2017). گیاهان به دو طریق مستقیم (جذب مستقیم از هوا) و غیرمستقیم (جلوگیری از انتشار آلاینده‌های هوا) می‌توانند آلاینده‌های هوا را کاهش دهند. در کاهش مستقیم، درختان از جمله اقاقیا و چنار می‌توانند آلاینده‌های گازی از قبیل دی اکسید گوگرد (SO_2)، دی اکسید نیتروژن (NO_2) و ازن (O_3) را از طریق روزنه‌هایشان جذب کنند و همچنین می‌توانند آلاینده‌های محلول در آب را

در رطوبت سطح برگ‌هایشان حل نمایند. تحقیقات نشان می‌دهد که تراکم گاز دی اکسید گوگرد برای چندین ساعت می‌تواند به برخی از گونه‌های گیاهی آسیب برساند (Hoseinabadi, 2012). آلاینده‌هایی از قبیل ازن بعد از ورود به برگ از طریق روزنه، در لایه‌ی آبکی حل می‌شود و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل (OH^-) و سوپراکسید (O^-_2) و H_2O_2 می‌کند و می‌تواند از خلال غشاءها عبور کند و باعث پراکسیداسیون لیپید غشاء و آسیب به ماکرومولکول‌ها شود (Mohsenzadeh & Akbari, 2016).

سایه سار درختان نیز می‌تواند ذرات ریز موجود در هوا را جذب کنند. در روش غیرمستقیم، درختان از طریق سایه‌اندازی، تبخیر و تعرق موجب کاهش دمای هوا در تابستان شده و کاهش دمای هوا می‌تواند موجب کاهش فعالیت واکنش‌های شیمیایی و کاهش تولید آلاینده‌های ثانویه در هوای مناطق شهری گردد (Bamnia *et al*., 2012). در واقع گیاه با ترسیب، تثبیت و تجزیه ترکیبات آلاینده در ریزوسفر، جذب انتخابی فلزات و تجمع آن‌ها در شاخساره‌ها و یا تصعید آلاینده‌ها به اتمسفر، موجب کاهش مقدار و یا سمیت آلاینده‌ها می‌شود. بنابراین بعضی گیاهان مواد آلایندهٔ موجود در محیط را در خود جمع می‌کنند، این گیاهان از فرآیندهای زیستی متنوع گیاهی و ویژگی‌های فیزیکی خود به کاهش و رفع آلودگی کمک می‌نمایند (Shafiei & Mohdkhah, 2018). آلودگی هوا با بر هم زدن حالت پایدار سلول‌های در معرض آن به گیاهان آسیب وارد می‌کند. آلاینده‌های مختلف هوا از راه‌های متفاوت به آسیب‌دیدگی گیاه منجر می‌شوند. پاسخ گیاهان به آلاینده‌های هوا ممکن است بسیار گسترده و متفاوت باشد و اختلاف این پاسخ‌ها می‌تواند به دلیل فاکتورهایی از قبیل اختلاف در غلظت و نوع آلاینده‌ها، توزیع زمانی آن‌ها، عوامل هواشناسی، فعالیت فیزیولوژیکی، وضعیت تغذیه، سن گیاهان و اثرات دیگر فاکتورهای محیطی باشند (Latwal *et al*., 2023; Asadi *et al*., 2011). تنش آلودگی هوا نیز مانند سایر تنش‌های محیطی باعث ایجاد رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود. مقدار این رادیکال‌های آزاد در سلول‌های گیاهی به وسیله فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها کنترل می‌شود و این ظرفیت به میزان تحمل گیاه به تنش بستگی دارد. برای نشان دادن تنش آلودگی هوا در درختان، شاخص‌های مختلفی از جمله شاخص‌های فیزیولوژیکی بکار می‌رود. افزایش کربوهیدرات‌های محلول و پرولین و کاهش سبزینه و زرد شدن برگ‌ها بر اثر تنش آلاینده‌های هوا از مطالعات اولیه شناخته شده است (Omidi *et al*., 2017).

گسترش بیش از حد محیط زیست شهری و افزایش روزافزون وسایل نقلیه موتوری و رها شدن آلاینده‌های مختلف در هوای شهر مشهد و میزان باران ناچیز و وجود کارخانه‌ها و منابع آلوده کننده هوا باعث آلودگی هوای شهر مشهد شده است که می‌تواند روی سلامت انسان و گیاهان اثر منفی داشته باشد (Nazhat & Sadeghi, 2013). انتخاب گیاهان متناسب با محیط، در طراحی فضای سبز، بسیار کارآمد است. درختان با توجه به عمر طولانی خود به عنوان موجودات زنده، می‌توانند بهترین و دقیق‌ترین شاخص برای پژوهش روی تنش‌های محیطی باشند (Madah, 2015). بهترین و سازگارترین درختان گیاه پالایی در مشهد، چنار و اقاقیا بوده‌اند، اما امروزه آلودگی شدید هوای مشهد سبب شده است که چنار و اقاقیا به تدریج آسیب ببینند و محیط برای زیست این گونه‌های زیبا که روزگاری سمبل شهرمشهد بوده‌اند، نامساعد شود (Pourkhabbaz *et al*., 2010).

چنار[1] درختی است از تیره Platanaceae که بومی نیم کره شمالی است. درختی زیبا که پوست آن به صورت نامنظمی از ساقه جدا شده و در نتیجه تنه درخت سفید به نظر می‌رسد. برگ‌ها پنجه‌ایی شکل و دارای ۵-۷ لوب است. میوه‌های فندقه آن در

۱- *Platanus orientalis* L.

دستجات کروی شکل اجتماع یافته‌اند (Madah, 2015). اقاقیا[۱] نیز در گروه نهاندانگان دولپه‌ای، از تیره باقلاسانان[۲] قرار دارد. اقاقیا بیشتر در مناطق معتدل و سرد جهان رشد می‌کند. این درخت بومی شمال آمریکا و مکزیک می‌باشد (Encyclopaedia Britannica Editors, 2025). لگوم‌ها از جمله اقاقیا به دلیل همزیستی با باکتری‌ها و توانایی در استفاده از N_2، از لحاظ زیست محیطی، کشاورزی و اقتصاد مهم هستند. لگوم‌ها با کاهش مصرف کودهای نیتروژنه، از نظر اقتصادی و نیز جلوگیری از آلودگی محیط زیست مؤثر هستند (Chaudhary *et al*., 2023; Varin *et al*., 2010).

کاهش غلظت سبزینه در برگ‌های دو گونه *Ficus religiosa* L. و *Thevetia nerifolia* Juss. با افزایش میزان آلودگی (دی اکسید گوگرد، دی اکسید نیتروژن، ازن، ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون و فلزات سنگین) گزارش شده است (Verma & Singh, 2006). همچنین با مطالعه روی درخت چنار بیان شد که آلودگی هوا موجب کاهش سطح برگ، وزن خشک و غلظت انواع سبزینه ها، کاروتنوئیدها و پروتئین برگ‌ها گردید (Madah, 2015).

افزایش میزان پرولین در گونه‌های سرو خمره‌ای[۳]، کاج سیاه[۴]، چنار شرقی[۵]، زبان گنجشک[۶]، نارون[۷] و پالونیا[۸] نیز تحت تأثیر افزایش فلزات سنگین مشاهده شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰). کاهش میزان رنگدانه‌های نورساختی (سبزینه a، b و کاروتنوئیدها) و پروتئین قابل حل کل در اثر آلاینده‌های شهری و صنعتی در برگ گونه‌های افرا[۹]، چنار شرقی و خرزهره[۱۰] نیز گزارش شده است (Cui *et al*., 2022).

دی اکسیدگوگرد، اکسیدهای نیتروژن و آلاینده‌هایی مانند O3 به عنوان تهدید بزرگی برای محصولات زراعی شناخته می‌شوند و این گازها در افزایش خطر برای سلامت در مناطق شهری و حومه شهری اثرات زیادی دارند و این آلاینده‌ها به عنوان یک عامل بالقوه برای کاهش محصول‌دهی و کیفیت غذایی گیاهان زراعی به شمار می‌روند (Mohsenzadeh & Akbari, 2016). افزایش آلودگی هوا از یک سو با اثر روی ساختار خود گیاه باعث اختلال در عملکرد بخش‌های مختلف از جمله سبزینه می‌شود و غذا سازی گیاه تضعیف می‌گردد. از سوی دیگر از طریق ایجاد باران‌های اسیدی، روی خاک اطراف ریشه گیاه اثر می‌گذارد و باعث کاهش اسیدیته خاک و در نتیجه سبب نشت و خروج موادمغذی قابل ملاحظه‌ای از داخل خاک می‌شود (Vallero, 2014; Tiwary & Williams, 2018). همچنین دو عنصر سنگین و سمی کادمیوم و سرب در آلاینده‌های محیط زیست وجود دارند که موجب کاهش نورساخت و رشد گیاهان می‌گردند (Jaishankar *et al*., 2014). غلظت سرب برگ در گیاهان اقاقیا و خرزهره واقع در منطقه صنعتی گازیانتو ترکیه ۲۰۰۰ برابر بیشتر از نواحی شاهد بود و غلظت کادمیوم در برگ گیاه اقاقیا مناطق آلوده ۴۰ برابر بیشتر از نواحی پاک بوده است (Kaya *et al*., 2010). توانایی جذب کادمیوم، مس، کروم و سرب توسط اندام‌های چنار و اقاقیا بررسی شد و بیان شد که زبان گنجشک، بلوط[۱۱] و افرا[۱۲] دارای مقادیر معمولی از این فلزات در بافت‌های خود بودند اما صنوبر[۱۳] ۵ تا ۸ برابر بیشتر از بقیه گونه‌ها کادمیوم و روی را در اندام هوای خود به خصوص برگ‌ها انباشته کرد (Kardar *et al*., 2015). با توجه به ضرورت بررسی و مطالعه میزان جذب آلاینده‌های محیطی و تأثیر آن بر آلودگی هوا و فضای سبز شهری، تحقیق حاضر با

۱- *Robinia pseudoacacia* L. ۲- Fabaceae ۳- *Platycladus* ۴- *Pinus nigra* Arn. ۵- *Platanus orientalis* L.
۶- *Fraxinus rotundifolia* Mill. ۷- *Ulmus carpinifolia*. ۸- Paulownia ۹- *Acer palmatum*
۱۰- *Nerium oleander* L. ۱۱- *Quercus* ۱۲- *Acer* ۱۳- *Populus*

هدف بررسی میزان جذب آلاینده‌های محیطی و تغییرات بیوشیمیایی آن بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی اقاقیا و چنار در شهر مشهد مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

شهر مشهد، با مختصات جغرافیایی ″۴۵ ′۳۶ °۵۹ طول شرقی و ″۰۰ ′۱۷ °۳۶ عرض شمالی با میانگین بارندگی ۲۵۶ میلی‌متر و ارتفاع ۹۷۰ متر، با آب و هوایی معتدل متغیّر و خشک، در فاصلهٔ ۸۸۰ کیلومتری از تهران و حدوداً ۷۰ کیلومتری (به خط مستقیم) از مرز کشور ترکمنستان، محصور بین قله مرتفع هزار مسجد و بینالود و ادامه آن‌ها به سوی جنوب شرقی و به فاصلهٔ حدود ۱۰ کیلومتری از حاشیهٔ جنوبی کَشَف رود که در میان دو رشته کوه مذکور به سوی جنوب شرقی و رود مرزی هریرود،جریان دارد واقع شده است. مشهد با ۳۵۱ کیلومتر مربع مساحت، دومین شهر پهناور ایران پس از تهران است. براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ مشهد با ۳٬۰۰۱٬۱۸۴ تن جمعیت، دومین شهر پرجمعیت ایران پس از تهران و نود و پنجمین شهر پرجمعیت دنیا به‌شمار می‌رود (Statistical Center of Iran, 2017). پس از بررسی و دریافت اطلاعات لازم از مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی شهر مشهد، مناطق آلوده و غیرآلوده شهر تعیین و گیاهان مورد نظر با توجه به پوشش گیاهی منطقه مورد بررسی و انتخاب قرار گرفتند و در تابستان ۱۳۹۸ داده‌برداری انجام شد. براساس ارزیابی داده‌های حاصل از مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی مشهد مقدس، ایستگاه‌های سنجش آلودگی خیام و ساختمان (شهرک شهید رجائی) به عنوان منطقه آلوده و سرافرازان و الهیه به عنوان مناطق پاک همراه با یک پراکنش متناسب در کلان شهر مشهد انتخاب شدند. آمار دریافتی از سوی مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی مشهد مقدّس در سال ۱۳۹۸ در سه گروه ایستگاه‌های شهری، حومه شهری، و ایستگاه‌های ترافیکی طبقه‌بندی شده است (شکل ۱). بررسی گزارش شاخص روزانه در سال ۱۳۹۸، ۴۰ روز هوای پاک، ۲۶۶ روز قابل قبول، ۵۷ روز ناسالم برای گروه‌های حساس و ۲ روز هم ناسالم برای تمام گروه‌ها را نشان می‌دهد. این در حالیست که در سال ۱۳۹۷، ۴۵ روز هوای پاک، ۲۷۵ روز قابل قبول، ۴۲ روز ناسالم برای گروه‌های حساس و ۳ روز ناسالم برای تمام گروه‌ها بوده است. آمار و ارقام بیان شده حاکی از کاهش ۵ روز هوای پاک و افزایش ۱۴ روز وضعیت هشدار نسبت به سال ۹۷ می‌باشد. آلاینده‌های اصلی (ذرات معلق در هوا) که اجزای اصلی تشکیل دهنده آن عبارتند از سولفات‌ها، نیترات‌ها، آمونیوم، سدیم کلرید، کربن سیاه، ذرات معدنی و آب.. ایستگاه‌های واقع در منطقه خیام و ساختمان (شهرک شهید رجائی) جزء آلوده‌ترین ایستگاه‌ها هستند و کیفیت مناسب هوا از ایستگاه‌های سرافرازان و الهیه گزارش شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که انتقال گرد و غبار از کانون‌های برون مرزی (قره قوم) باعث افزایش غلظت ذرات معلق و کاهش کیفیت هوا گردیده است (Garazhian, 2014). در این مطالعه، برای نمونه‌برداری و مقایسه مناطق بر اساس پوشش گیاهی موجود در فضای سبز شهری مشهد، دو گونه درختی شامل **اقاقیا** (*Robinia pseudoacacia* L. cv. Umbraculifera) **و چنار** (*Platanus orientalis* L. cv. Minart)، با توجه به بیشترین مشاهده در سطح پوشش گیاهی شهر مشهد انتخاب شد. نمونه‌برداری در فصل تابستان و اواخر مرداد ماه، در هر منطقه و با ۳ تکرار از هر گونه حتی‌الامکان هم سن، فاقد بیماری و آفت انجام شد. نمونه‌های برگی از شاخه‌های بیرونی انتخاب و پارامترهای بیوشیمیایی گیاهی مانند محتوای سبزینه a، b و کل، کاروتنوئیدها، هیدرات‌های کربن، پرولین، پروتئین، کادمیوم و

سرب، فعالیت کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز و پراکسیداز درختان مورد نظر اندازه‌گیری شد. بدین صورت که درختان به طور تصادفی انتخاب و نمونه‌برداری برگ از ارتفاع حدود یک متری شروع تاج درخت در چهار سمت درخت انجام گردید. سپس نمونه‌های برداشت شده از چهار سمت هر درخت با هم آمیخته شد.

مواد و روش‌های آزمایشگاهی

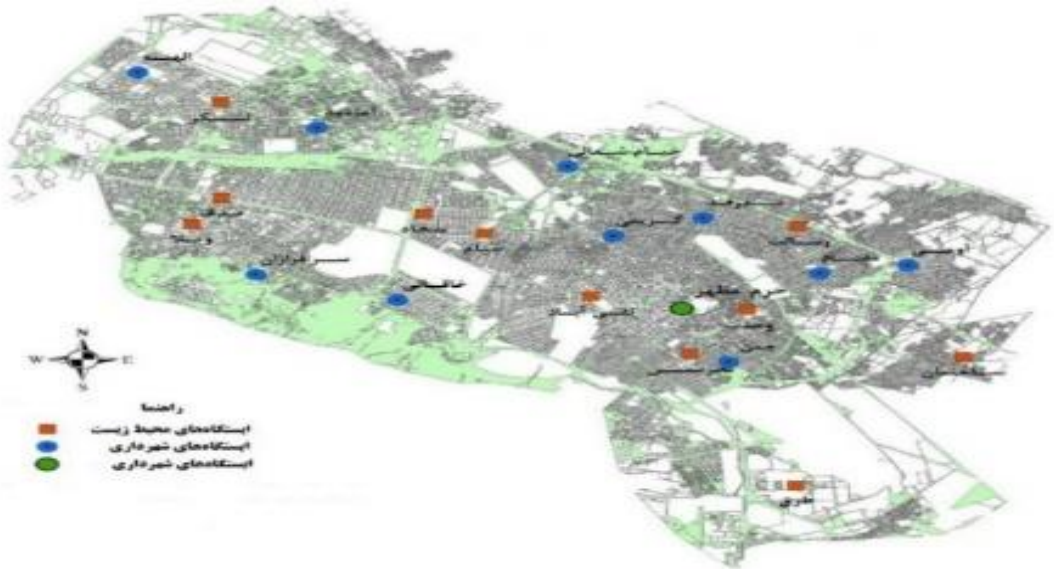
برای اندازه‌گیری میزان سبزینه ها و کاروتنوئید از روش Lichtenthaler استفاده شد. به طوری که مقدار ۰/۱ گرم از بافت تر برگ‌ها به همراه ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد در هاون چینی ساییده و سپس ۵ میلی‌لیتر استون به آن اضافه گردید تا حجم محلول به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شود. سپس عصاره‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در ۲۵۰۰ دور سانتریفوژ و میزان جذب هر یک از نمونه‌های سانتریفوژ شده با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل PD-303 UV در طول موج‌های، ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. افزون بر این، برای محاسبه‌ی میزان کاروتنوئیدها، جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۷۰ نانومتر نیز خوانده شد. به علاوه استن ۸۰ درصد برای صفر کردن دستگاه و محلول بلانک مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت میزان کاروتنوئید بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ محاسبه گردید. برای محاسبه‌ی مقادیر سبزینه a (chla)، (chlb) و کل (chlt) از معادلات (۱-۳) و همچنین کاروتنوئیدها (C) از معادله (۴) استفاده شد: (Lichtenthaler, 1987).

$$Chla\ (mg/gr\ fresh\ weight) = 11.75\ A663 - 2.350\ A645 \quad \text{معادله ۱}$$

$$Chlb\ (mg/gr\ fresh\ weight) = 18.61\ A645 - 3.960\ A663 \quad \text{معادله ۲}$$

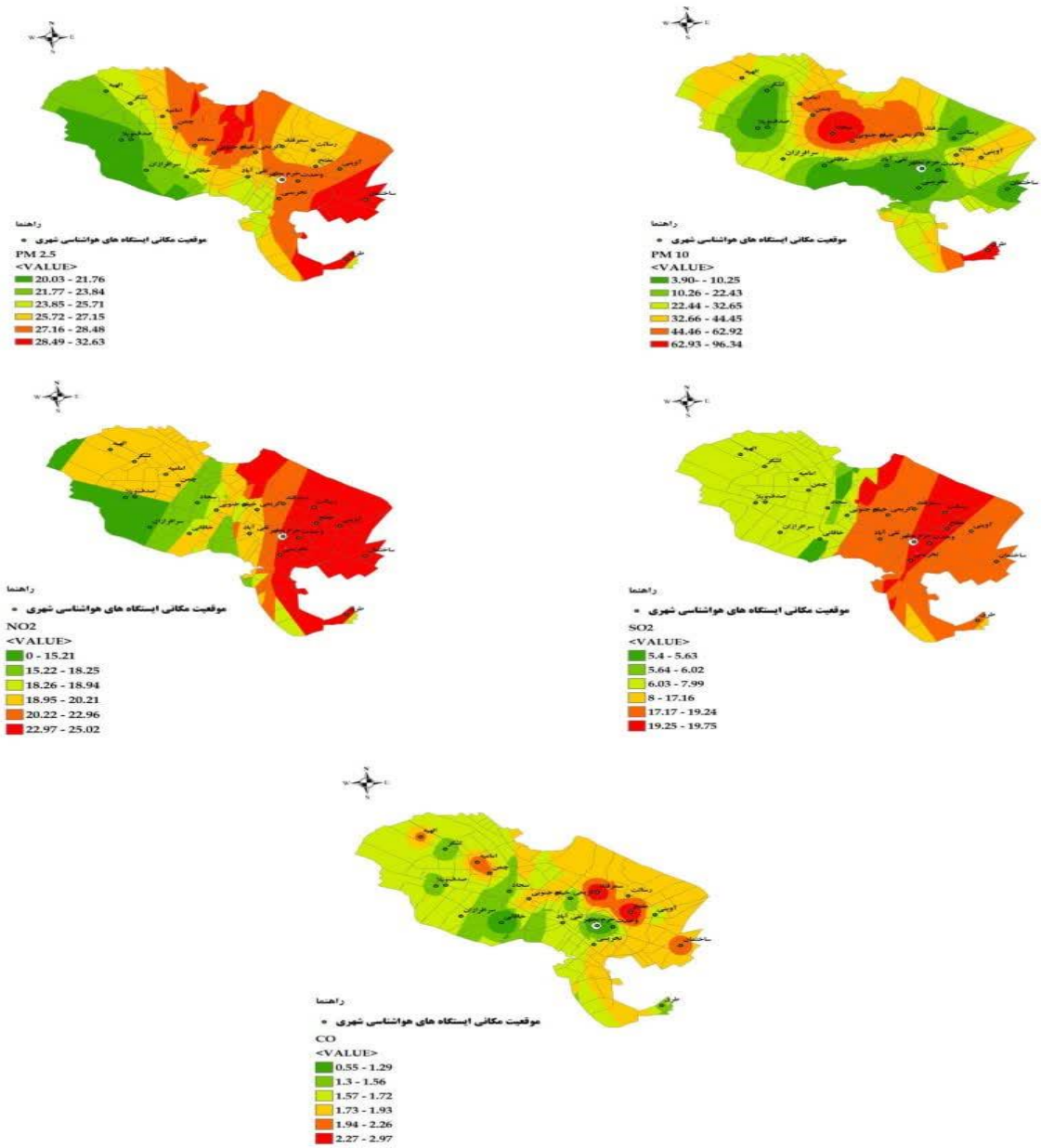
$$Chlt\ (mg/gr\ fresh\ weight) = Chla + Chlb \quad \text{معادله ۳}$$

$$C\ (mg/gr\ fresh\ weight) = 1000\ A470 - 2.270\ Chla - 81.4\ Chlb/227 \quad \text{معادله ۴}$$



شکل ۱- ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد.

Figure 1- Air quality monitoring stations in Mashhad city.



شکل ۲- پراکنش متوسط سالانه غلظت ذرات معلق کمتر از دو و نیم میکرون، منواکسید کربن، دی اکسید گوگرد، دی اکسید نیتروژن در سال ۱۳۹۸ در شهر مشهد.

Figure 2- Annual average distribution of the concentration of suspended particles less than 2.5 and 10 Micron and Carbon monoxide, sulfur dioxide, nitrogen dioxide in 2018 in Mashhad city.

برای ارزیابی قندهای محلول از روش Dubois و همکاران استفاده شد. برای آزاد شدن قندهای محلول، مخلوط پودر برگ با اتانول بمدت یک هفته داخل یخچال نگهداری شد. شدت رنگ عصاره حاصل پس از افزودن اسید سولفوریک و فنل با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۸۵ نانومتر اندازه‌گیری گردید. میزان رنگ حاصل یا شدت رنگ محلول و غلظت قندهای محلول متناسب بود. در نهایت برای تعیین غلظت قندهای محلول، منحنی استانداردی با استفاده از غلظت‌های معلوم گلوکز رسم شد (Dubois *et al.*, 1956).

برای اندازه‌گیری پرولین مقدار ۰/۵ گرم از نمونه‌های برگی تازه به همراه ۵ میلی لیتر اسید سولفوسالیسیلیک سه درصد در یک هاون چینی کوچک به مدت ۳ دقیقه ساییده شد. محلول توسط کاغذ صافی واتمن صاف شد سپس دو میلی لیتر از محلول صاف شده با ۲میلی‌لیتر از معرف ناین هیدرین و ۲ میلی لیتر اسید استیک در یک لوله آزمایش ریخته شد و برای مدت یک ساعت در دمای ۱۰۰درجه سلسیوس در حمام آب گرم قرار داده شد. سپس به محلول واکنش در لوله آزمایش پس از سردشدن در حمام یخ، ۴میلی‌لیتر تولوئن اضافه گردید و لوله آزمایش مربوطه برای مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه به شدت به هم زده شد. نمودار جذب استاندارد پرولین تهیه و جذب‌ها در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. غلظت پرولین بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر محاسبه شد (Bates *et al*., 1973).

برای سنجش پروتئین مطابق با وزن نمونه به ازای هر گرم نمونه تازه گیاهی ۱۰ میلی‌لیتر بافر استخراج فسفات پتاسیم ۰/۱ مولار استفاده گردید. عصاره صاف شده به مدت ۲۵دقیقه با ۱۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از افزودن ۰/۴ میلی‌لیتر معرف برادفورد با گذشت زمان ۱۰ دقیقه، جذب نمونه با اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۹۵ نانومتر تعیین شد و میزان غلظت پروتئین در بافت‌های گیاهی بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر گیاه با استفاده از منحنی استاندارد آلبومن سرم گاوی محاسبه گردید (Bradford, 1976).

برای تعیین غلظت کادمیوم و سرب نیز نمونه برگ به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. برای تعیین غلظت کادمیوم و سرب ،۱ گرم از نمونه خشک توزین گردید و به بوته چینی انتقال داده شد. نمونه توزین شده داخل بوته چینی در کوره الکتریکی با دمای ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس خاکستر شد سپس با اسید کلریدریک ۲ نرمال هضم شده و توسط بالن ژوژه ۲۵ توسط آب مقطر به حجم رسانده شد و غلظت کادمیوم و سرب توسط دستگاه جذب اتمی تعیین شد.

برای تهیه عصارهٔ آنزیمی میزان ۱۰۰ میلی‌گرم برگ توزین و به‌همراه یک میلی‌لیتر بافر استخراج شامل فسفات پتاسیم ۱۰۰میلی‌مولار با Ph=7/8، EDTA ۰/۱ میلی‌مولار و پلی وینیل پیرولیدون ۱ درصد در هاون چینی سرد و بر روی یخ همگن گردید .سپس عصاره‌های حاصل در ۱۳۰۰۰دور در دقیقه و در دمای چهار درجه سانتیگراد به مدت ۳۰دقیقه سانتریفیوژ شد و محلول رویی حاصل در ظرف‌های استریل جمع‌آوری گردید. محلول رویی به‌دست‌آمده به‌عنوان عصارهٔ آنزیمی برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها مورد استفاده قرار گرفت (Barandeh & Kavousi, 2017).

برای اندازه‌گیری آنزیم کاتالاز از روش Aebi استفاده شد. بدین صورت که محلول واکنشی شامل H_2O_2 با غلظت ۵ میلی‌مولار و بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با pH برابر ۷ تهیه شد. ۱۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی با ۱۳۵۰ میکرولیتر از محلول واکنش ترکیب شدند. با شروع تجزیه H_2O_2 در محیط، میزان کاهش جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و فعالیت آنزیم کاتالاز محاسبه گردید (Aebi, 1984).

$$U = \frac{\Delta A * Vt * df}{\varepsilon * l * t * Vs}$$

که در رابطه بالا U واحد آنزیمی، ΔA تفاوت میزان جذب محلول واکنش در زمان شروع و پایان واکنش، V_t حجم محلول واکنش، d_f فاکتور رقیق کننده، t مدت زمان انجام واکنش، V_s حجم نمونه، ε ضریب خاموشی ($۳۹/۴ Mm^{-1}cm^{-1}$)، l طول مسیر

عبور نور از محلول واکنش است. فعالیت آنزیم کاتالاز بر حسب تعداد واحدهای آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه گزارش گردید (U/mg prot.min).

برای اندازه‌گیری آنزیم سوپراکسیددیسموتاز مخلوط واکنش آنزیمی حاوی ۹۳۵ میکرولیتر بافر فسفات سدیم با غلظت ۵۰ میلی‌مولار، EDTA ۰/۱ میلی‌مولار، متیونین با غلظت ۱۳ میلی‌مولار، نیتروبلوتترازولیوم (NBT) ۷۵ میکرومولار و ۱۵ میکرولیتر ریبوفلاوین با غلظت ۰/۱۲ میلی مولار، همراه با ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی استخراج شده، بود. جذب نمونه پس از تابش نور (5000 LUX) به مدت ۱۵ دقیقه در ۵۶۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری و سپس مقدار سوپراکسیددیسموتاز محاسبه شد. یک واحد SOD به مقدار آنزیمی گفته می‌شود که سبب مهار ۵۰ درصد NBT به فورمازان شود در نهایت فعالیت آنزیمی SOD با استفاده از رابطه زیر محاسبه و بر حسب میکرو مول برگرم بافت تازه بیان شد (Giannopolitis & Ries, 1977).

$$\text{فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز} = \frac{[\,(\text{control OD} - \text{treatment OD})/\,\text{control OD}]\ \text{x}\ 100}{50}$$

برای اندازه‌گیری آنزیم پراکسیداز پس از آماده سازی عصاره آنزیمی برای سنجش فعالیت سنتتیکی این آنزیم، مقدار ۲ میلی‌لیتر بافر تریس ۱۰۰میلی‌مولار با Ph= ۷، ۰/۳ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۵ میلی‌مولار و ۰/۲ میلی‌لیتر پیرو گالل ۱۰ میلی‌مولار را در حمام یخ با ۵۰ میکرو لیتر عصاره آنزیمی مخلوط و پس از ۲ دقیقه منحنی تغییرات جذب را با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۲۵ نانومتر خوانده و بر حسب $\mu mol\ (H_2O_2)\ mg^{-1}(protein)\ min^{-1}$ بیان نمودیم (Kar & Mishra, 1976).

طرح آزمایش کاملا تصادفی می‌باشد. در نهایت محاسبات آماری شامل تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS ver 9و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

سبزینه a، b و کل و کاروتنوئیدها

نتایج جدول‌های مقایسه میانگین برای سبزینه a، b، کل و کاروتنوئیدهای اقاقیا و چنار کاهش معنی‌دار میزان این صفات را در منطقه آلوده نسبت به منطقه پاک نشان داد (جداول ۱ و ۲). نتایج این مطالعه با (Babapour Aliyar *et al*., 2015) بر روی زبان گنجشک، چنار و افرا همسو بود. آن‌ها بیان کردند که آلودگی هوا می‌تواند با کاهش رنگیزه‌های نورساختی باعث کاهش نورساخت در گیاه گردد. یکی از دلایل کاهش میزان رنگیزه‌های نورساختی نظیر سبزینه و کاروتنوئید، وجود فلزات سنگین در تنش آلودگی می‌باشد. از آنجا که از جمله آلاینده‌های موجود در هوای مشهد، فلزات سنگین نظیر سرب می‌باشد یون منیزیم مرکزی سبزینه می‌تواند به وسیله فلزات سنگین جایگزین گردد. این امر باعث جلوگیری از به دام انداختن نور نورساختی و در نتیجه از بین رفتن سبزینه و کاهش فعالیت نورساختی گیاه می‌گردد. همچنین رادیکال‌های آزاد تولید شده در طی تنش آلودگی می‌تواند باعث تجزیه رنگیزه‌های نورساختی و در نتیجه کاهش رنگیزه‌ها گردد (Madah, 2015). سایر مطالعات نیز نشان داد که در مناطق صنعتی میزان سبزینه درختان کاهش یافته است (Giri & Shrivastava,2013). در واقع ذرات معلق روی سطح برگ نیز مقدار سبزینه و کاروتنوئیدها گیاهان مناطق آلوده را کاهش می‌دهند. این ذرات ممکن است روزنه‌ها را ببندند و در تبادل گازها اختلال ایجاد کنند که منجر به افزایش دمای برگ می‌شود و ساخت سبزینه و کاروتنوئیدها را کاهش می‌دهد به طوری که با نتایج پژوهشگران دیگر روی چنار مطابقت دارد (Lordifard *et al*., 2012). آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در مناطق آلوده

میزان سبزینه و کاروتنوئیدهای برگ کاهش می‌یابد. یعنی وقتی آلاینده‌ها به طور طبیعی از طریق روزنه به وسیله برگ‌ها جذب می‌شوند باعث کاهش رنگیزه‌های نورساختی مانند سبزینه و کاروتنوئیدها خواهند شد.

همچنین میزان کاهش رنگیزه‌های نورساختی و کاروتنوئیدها در این گیاهان می‌تواند به دلیل خصوصیات موروفولوژیکی و ژنتیکی گیاهان باشد و نشان از مقاومت این گیاهان نسبت به آلودگی هوا دارد که به نظر برخی پژوهشگران بر اساس شاخص‌های بیوشیمیائی، گیاهان را در تنش آلودگی هوا می‌توان براساس پاسخ‌های فیزیولوژیکی، رشد مناسب و گلدهی به چهار گروه شامل متحمل، نیمه متحمل، حساس و خیلی حساس تقسیم بندی نمود (Yadav & Pandey, 2020 ;Seyyednejad *et al*., 2011). شاید اقاقیا و چنار با توجه به این نتایج جزو گیاهان نیمه متحمل به آلودگی هوا باشند. البته این ادعا نیاز به پژوهش‌های بیشتری دارد. پاسخ‌های گیاهان به آلاینده‌های هوا ممکن است بسیار گسترده و متفاوت باشد و اختلاف این پاسخ‌ها می‌تواند به وسیله عواملی از قبیل اختلاف در غلظت‌های آلاینده‌ها و توزیع زمانی آن‌ها، منشأ ژنتیکی، فعالیت فیزیولوژیکی، عوامل هواشناسی و وضعیت تغذیه گیاهان و سایر عوامل محیطی ایجاد شود (Ghafari *et al*., 2021; Asadi, 2011). بنابراین توزیع انواع گیاهان در مناطق شهری به وجود آلاینده‌های هوا و حساسیت گیاهان نسبت به این تنش وابسته است. خطرات ناشی از اثر آلاینده‌های هوا روی رشد و محصول‌دهی گیاهان، به الگوی انتشار آلاینده‌ها، انتقال اسمزی و جذب برگی آن‌ها و ظرفیت دفاع بیوشیمیایی گیاه وابسته است (Alamdarlo *et al*., 2020; Zafari *et al*., 2016).

هیدرات کربن محلول

نتایج جدول‌های مقایسه میانگین برای هیدرات کربن محلول اقاقیا و چنار افزایش معنی‌دار میزان این صفت را در منطقه آلوده نسبت به منطقه پاک نشان داد (جدول های ۱ و ۲). نتایج این مطالعه با نتایج (Omidi *et al*., 2017) بر روی افرای زینتی همسو بود. آن‌ها بیان کردند که در شرایط تنش به دلیل کاهش قدرت انتقال قندها در آوند آبکش و کم شدن مصرف آن‌ها در اندام‌های مصرف کننده، میزان قندها در سلول‌های برگ افزایش می‌یابد. هیدرات‌های کربن محلول به عنوان محافظت کننده‌های اسمزی در تنظیم اسمزی سلول هستند و در پاسخ به تنش‌های محیطی انباشته می‌شوند. در انتخاب گونه‌های مقاوم به تنش، تعیین میزان قندهای محلول ممکن است روشی مفید باشد. در این تحقیق میزان هیدرات‌های کربن محلول در گیاهان اقاقیا و چنار در منطقه آلوده نسبت به پاک افزایش داشته است. نتایج مطابق یافته‌های بامنیا و همکاران (۲۰۱۲) می‌باشد، که به بررسی پارامترهایی مانند میزان کربوهیدرات کل و پروتئین کل و ارتباط آن با آلاینده‌هایی مانند SO_2، NO_2 و SPM[1] پرداختند. همچنین پژوهشگران گزارش کردند در نتیجه افزایش آلودگی هوا (SO_2، NO_2، O_3، CO و PM_{10}) میزان کربوهیدرات‌های محلول در دو گونه خرزهره و اقاقیا به ترتیب افزایش و کاهش یافت که این مسئله آسیب‌پذیر بودن اقاقیا را نسبت به خرزهره نشان می‌دهد، زیرا مقدار کربوهیدرات‌های محلول برگ با مقاومت در برابر ازن رابطه مثبت دارد (Bakand *et al*., 2007). در این پژوهش کربوهیدارت‌های محلول افرای زینتی با آلاینده‌های ازن، آمونیاک و ذرات معلق همبستگی مثبت و معناداری نشان دادند، که از میان، ذرات معلق بیشترین همبستگی را به خود اختصاص داده است. نتایج ما همچنین در راستای مطالعه دیگر پژوهشگران است، که همبستگی مثبتی بین انباشتگی کربوهیدرات‌های محلول و تحمل به انواع تنش‌های غیرزیستی را گزارش کردند (Taji *et al*., 2002).

۱- Suspended particulate matter

جدول ۱- مقایسه میانگین خصوصیات بیوشیمیایی و فلزات سنگین درخت اقاقیا پیوندی تحت آلودگی هوا شهر مشهد.

Table 1- Comparison of average biochemical properties and heavy metals of Mop Top Robinia under air pollution in Mashhad.

peroxidases پراکسیداز µmol(H_2O_2) mg^{-1}(protein) min^{-1}	Superoxide Dismutase سوپراکسید دیسموتاز µmol/g fresh weight)	Catalase کاتالاز U/mg prot.min)	سرب Lead (mg/kg)	Cadmium کادمیوم (mg/kg)	Protein پروتئین mg/g fresh weight)	Proline پرولین µmol/g fresh weight)	Dissolved Carbohydrate هیدرات کربن mg/g freshweight)	Carotenoid کاروتنوئید mg/g fresh weight)	Total chlorophyll سبزینه کل mg/g fresh weight)	Chlorophyll b سبزینه b mg/g fresh weight)	Chlorophyll a سبزینه a mg/g fresh weight)	مکان location
0.008 ab	0.279 b	0.418 b	3.165 a	0.983 b	2.828 b	2.828 b	2.828 b	0.305 d	1.900 d	0.538 c	1.277 c	ساختمان Sakhteman
0.009 a	0.417 a	0.454 a	3.232 a	1.020 a	1.784 a	5.159 a	4.141 a	0.415 b	2.230 b	0.505 d	1.896 d	خیام Khayam
0.005 c	0.118 d	0.287 d	0.916 b	0.225 d	1.378 c	2.534 c	1.894 c	0.488 a	2.623 a	0.633 a	1.502 a	سرافرازان Sarafrazan
0.005 c	0.169 c	0.317 c	1.313 c	0.323 c	1.404 c	2.784 c	2.890 b	0.444 c	2.387 c	0.576 b	1.367 b	الهیه Elahieh

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد.

In each column, similar letters showing non-significant difference according to LSD (%5).

جدول ۲- مقایسه میانگین خصوصیات بیوشیمیایی و فلزات سنگین درخت چنار تحت آلودگی هوا شهر مشهد.

Table 2- Comparison of average biochemical characteristics and heavy metals of plane under air pollution in Mashhad city.

peroxidases پراکسیداز µmol(H_2O_2) mg^{-1}(protein) min^{-1}	Superoxide Dismutase سوپراکسید دیسموتاز µmol/g (fresh weight	Catalase کاتالاز U/mg prot.min	سرب Lead (mg/kg)	Cadmium کادمیوم (mg/kg)	Protein پروتئین mg/g fresh (weight	Proline پرولین µmol/g fresh (weight	Dissolved Carbohydrate هیدرات کربن محلول mg/g (freshweight	Carotenoid کاروتنوئید mg/g fresh (weight	Total chlorophyll سبزینه کل mg/g fresh (weight	Chlorophyll b سبزینه b mg/g fresh (weight	Chlorophyll a سبزینه a mg/g fresh (weight	مکان location
0.023 b	0.298 b	0.354 b	9.898 a	1.414 b	0.542 b	5.763 d	8.484 a	0.323 d	1.874 d	0.420 d	1.130 c	ساختمان Sakhteman
0.035 a	0.445 a	0.472 a	9.201 a	2.030 a	2.829 a	15.239 a	1.313 c	0.342 c	2.005 c	0.449 c	1.210 b	خیام Khayam
0.020 c	0.125 c	0.237 d	6.631 c	0.947 c	0.505 b	6.687 c	5.684 b	0.380 a	2.379 a	0.700 a	1.330 a	سرافرازان Sarafrazan
0.014 d	0.087 c	0.330 c	7.120 b	1.017 c	0.516 b	6.619 c	5.916 b	0.357 b	2.204 b	0.494 b	1.320 a	الهیه Elahieh

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد.

In each column, similar letters showing non-significant difference according to LSD (%5).

پرولین و پروتئین

نتایج جدول‌های مقایسه میانگین پرولین و پروتئین اقاقیا و چنار افزایش معنی‌دار میزان این صفات را در منطقه آلوده نسبت به منطقه پاک نشان داد (جدول های ۱ و ۲). نتایج این مطالعه با نتایج پژوهشگران روی نارون، اقاقیا و چنار همسو بود (Mohsenzadeh & Akbari, 2016). آن‌ها بیان کردند که به نظر می‌رسد که بیوسنتز این اسید آمینه یک پاسخ معمول به شرایط تنش باشد که در سایر تنش‌ها نیز روی می‌دهد. اگر گیاهان به مدت طولانی در معرض آلودگی هوا باشند کلروپلاست‌ها به یک سطح انرژی برانگیختگی بالا می‌رسند که در جریان گردش انرژی باعث تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن و تنش اکسیداتیو می‌شوند. پرولین به عنوان جمع کننده رادیکال‌های آزاد برای حفاظت گیاهان از آسیب‌های تنش اکسیداتیو عمل می‌کند. در واقع پرولین نوعی آمینواسید و آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی است که در موجودات زنده به خصوص گیاهان تحت تنش‌های محیطی تجمع می‌یابد (Suganthi *et al*., 2013). مقدار تغییر معنی‌دار این صفت در منطقه آلوده نشان دهنده درک تنش توسط چنار و اقاقیا و استفاده ازآنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی (پرولین) برای دفع سمیت آلاینده‌ها است. در گیاهان مختلف افزایش پرولین تحت تنش فلزات سنگین گزارش شده است (Huihui *et al*., 2020; El Rasafi *et al*., 2022; Sheetal *et al*., 2016). از سوی دیگر القاء تحریک تجمع پرولین در پاسخ به تنش‌های غیرزنده ممکن است به دلیل افزایش ساخت مجدد یا کاهش تجزیه آن باشد (Alvarez *et al*., 2022; Verslues *et al*., 2014). در پژوهش حاضر، افزایش تجمع پرولین به عنوان نوعی آنتی‌اکسیدان در سطوح بالای تنش، این فرضیه را که پرولین با سمیت‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن ROS سبب تحمل گیاه به آلاینده‌ها می‌شود تقویت می‌کند. بنابراین تجمع پرولین می‌تواند به عنوان شاخصی از تحمل به تش فلزات سنگین مطرح شود (Alvarez *et al*., 2022). همچنین گیاهان می‌توانند اکسیدهای نیتروژن را در برگ‌ها با ساخت پروتئین و اسیدهای آمینه سم‌زدایی کنند، بنابراین افزایش پروتئین در گیاهان تحت تنش را به وجود دی اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن در آلاینده‌های هوا نسبت می‌دهند (Amini *et al*., 2015). در واقع تنش‌ها باعث القاء پروتئین‌های متعددی در گیاهان مختلف می‌شود. پروتئین‌های تجمع یافته در گیاه در چنین شرایطی در صورت شدید بودن تنش ممکن است در تنظیم اسمزی ایفای نقش کرده و یا این‌که شکلی از نیتروژن را فراهم کنند که دوباره قابل استفاده باشد.

کادمیوم و سرب

نتایج جدول‌های مقایسه میانگین برای کادمیوم و سرب اقاقیا و چنار افزایش معنی‌دار میزان این صفات را در منطقه آلوده نسبت به منطقه پاک نشان داد (جدول‌های ۱ و ۲). نتایج این مطالعه با مطالعه دیگر پژوهشگران روی چنار همسو بود (Abbasi *et al*. 2019). آن‌ها بیان کردند که ورود سرب به بافت برگ سبب کاهش تقسیم سلولی در برگ می‌شود. تجمع فلزات کادمیوم و سرب باعث کاهش اندازه بافت مزوفیل و اندازه سلول‌های اپیدرمی می‌شود. از بارزترین واکنش‌های گیاهان در برابر آلاینده‌های هوا کاهش وزن تر و خشک برگ گیاهان است. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که وقتی گیاهان در معرض غلظت‌های بالای فلزات سنگین قرار می‌گیرند وزن تر و وزن خشک و طول برگ آن‌ها کاهش می‌یابد. کاهش کلی سطح برگ و وزن برگ ناشی از آلودگی‌های اگزوز است. کادمیوم سبب کاهش رشد نسبی اندام هوایی می‌شود (Muhammad *et al*. 2019). پژوهشگران نشان دادند که سطح ویژه برگ در محیط‌های آلوده شهری و فضای سبز شهری در مقایسه با مراتع خارج شهر افزایش یافته است اما در

بین کاربری‌های درون سطح ویژه برگ در مواجهه با آلاینده‌های فلزی و در گونه‌های متفاوت، متغیر است. در برخی از مطالعات با افزایش سرب و کادمیوم، سطح ویژه برگ کاهش نشان می‌دهد. برخی از مطالعات روی گیاهان علفی نشان داده است که از ابتدای فصل رویش با فعال شدن آنزیم‌های رشد، سطح ویژه کاهش می‌یابد و سپس در اواخر فصل رویش مجدداً رو به افزایش می‌گذارد. با کاهش سطح ویژه، ضخامت برگ افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت برگ مقدار کلروپلاست در واحد سطح افزایش می‌یابد. برگ ضخیم‌تر آب کمتری را از طریق تعرق از دست می‌دهد. در پژوهش حاضر نمونه‌ها در پایان فصل رویش جمع‌آوری شد و در محیط عواملی نظیر کادمیوم و مس که باعث کلروز و نکروز در برگ می‌شوند به وفور وجود داشت و نیز نیکل و سرب و کادمیوم که باعث کاهش مزوفیل برگ می‌شوند در محیط وجود داشت (Balasooriya *et al*. 2009).

آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز و پراکسیداز

نتایج جدول‌های مقایسه میانگین برای آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز و کاتالاز در اقاقیا و چنار افزایش معنی‌دار مقدار این صفات را در منطقه آلوده نسبت به منطقه پاک نشان داد (جدول‌های ۱ و ۲). نتایج این مطالعه با نتایج دیگر پژوهشگران روی چنار همسو بود (Zafari *et al*. 2016). آن‌ها بیان کردند که گیاهان برای مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از رادیکال‌های فعال اکسیژن که باعث تخریب اسیدهای آمینه، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی می‌شوند، دارای مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی متعددی می‌باشند. سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی سلول در محافظت از سلول‌های گیاهی در برابر رادیکال‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش‌های محیطی نظیر شوری، خشکی و آلودگی نقش مهمی بر عهده دارد. آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شامل کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز می‌باشد (Amini & Haddad, 2013). آنزیم کاتالاز مهم‌ترین آنزیم برای مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از آلاینده‌ها می‌باشد و برای پاکسازی رادیکال‌های آزاد در گیاه کاربرد دارد (Barandeh & Kavousi, 2017). نتایج این تحقیق نیز نشان داد میزان آنزیم کاتالاز در شرایط آلودگی نسبت به محیط پاک افزایش یافته است. همچنین بررسی فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز نیز به عنوان یک آنزیم آنتی‌اکسیدانی دیگر نشان داد در منطقه آلوده فعالیت این آنزیم نسبت به منطقه پاک افزایش معنی‌داری داشته است. احتمالاً افزایش آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسیددیسموتاز در شرایط آلودگی هوا به دلیل ایجاد مقاومت گیاه در برابر استرس اکسیداتیو ناشی از آلودگی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد تنش‌های محیطی از جمله تنش آلودگی هوا سبب تغییرات فیزیولوژیکی از جمله تغییر در میزان رنگیزه‌های نورساختی، پروتئین، پرولین، آنزیم‌ها، کادمیوم و سرب در برگ گیاهان اقاقیا و چنار به عنوان یک گیاه زینتی در پارک‌ها و معابر می‌گردد. بنابراین آن‌ها با وجود آن‌که در کاهش آلودگی هوا تا اندازه‌ای مؤثرند ولی آلودگی هوا اغلب با کاهش میزان رنگیزه‌های نورساختی، می‌تواند بازده نورساخت و ظرفیت تصفیه هوای آن‌ها را که علاوه بر زیبایی فضای شهری یکی از اهداف توسعه فضاهای سبز در کلان شهرها می‌باشد را کاهش دهد. از سوی دیگر میزان رنگیزه‌ها در برگ گیاه ممکن است متأثر از زمان برداشت نمونه باشد که بر این اساس پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آینده تأثیر آلاینده‌های هوای مشهد بر میزان رنگیزه‌ها

و سایر فاکتورهای فیزیولوژیکی گیاه در فصول مختلف در صورت امکان بررسی گردد. بنابراین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که گیاهان اقاقیا و چنار گیاهانی بسیار مناسب و سازگار با توجه به آلاینده‌ها و آلودگی هوای شهر مشهد می‌باشد.

منابع

Abbasi, S., Hosseini, S.M., Khorasani, N., Karbasi, A. (2019). The effect of air pollutants on the morphological characteristics of the leaves of plantain trees. *Environmental Science and Technology*, *22* (11), 232-247.

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, *105*, 121–126.

Alamdarlo Nazari, B., Arani, A.M., Shojaei Borjoi, S., AzimZadeh, H., Kiani, B. (2020). Bioaccumulation of lead and cadmium and evaluation of tolerance index of several tree, shrub and shrub species to air pollution in high traffic areas of Yazd city. *Iranian Journal of Health & Environment*, *13*(2), 319-338. (In Persian).

Alvarez, M.E., Savouré, A., Szabados, L. (2022). Proline metabolism as regulatory hub. *Trends in Plant Science*, *27*(1), 39-55.

Amini, F. Fattah Ravandi, N., Askari, M. (2015). Effects of air pollutants on the physiology and anatomy of *Fraxinus excelsior* leaves within Iran's Aluminum plant in Arak city. *Journal of Plant Physiology*, *5*(17), 83-95 (In Persian).

Amini, Z., Haddad, R. (2013). Role of photosynthetic Pigments and antioxidant enzymes against oxidative stress. *Journal of Cellular and Molecular Research*, *26*(3), 251-265.

Asadi, A., Ghasemi Pirpalouti, A., Malekpoor, F., Teimori, N., Asadi, L. (2011). Impact of air pollution on physiological and morphological characteristics of *Eucalyptus camaldulensis* Den. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, *9*(2), 676-679.

Babapour Aliyar, B., Banj Shafee, A., Seyedi, N. (2015). The effect of air pollution on leaf morphology of species of sparrow's tongue, plantain and ornamental maple (case study of Urmia city). *Journal of Iranian Forest and Spruce Research*, *24*(1), 21-31 (In Persian).

Bakand Z., Ghorbanli, M., Khaniki, G. H. (2007). The effect of air pollutants in Tehran on fresh and dry weight, proline, soluble carbohydrates, the number of stomata, hairs and epidermal cells in two oleander plant *Nerium oleander* L. and Acacia, *Robinia pseudoacacia* L. *Pajohesh and Sazandegi*, *20*(4), 77.

Balasooriy, B.L., Samson, R., Mbikwa, F., Vitharana, W.A.U., Boeckx, P., Van Meirvenne, M. (2009). Biomonitoring of urban habitat quality by anatomical and chemical leaf characteristics. *Environmental and Experimental Botany*, *65*(2), 386–394.

Bamnia, B.R., Kapoor, C.S., Kapoor, K. (2012). Harmful effects of air pollution on physiological activities of *Pongamia pinnata* L. Pierre. *Clean Technologies and Environmental Policy, 14*(3). 115-124.

Barandeh, F., Kavousi, H.R. (2017). Effect of Cadmium on changes of some enzymatic and none-enzymatic antioxidant defense systems in lentil seedlings (*Lens culinaris Medik*.). *Iranian Journal of Pulses Research*, *7*(2), 125-137 (In Persian).

Bates, L.S., Waldern, R.P., Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, *39*(4), 205-207.

Bradford, M.M. (1976). A rapid sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of proteindye binding. *Analytical Biochemistry*, *72*(1), 248-254.

Chaudhary, S., Sindhu, S.S., Dhanker, R., Kumari, A. (2023). Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. *Microbiological Research*, *12*(1),73-40.

Cui, N., Qu, L. and Wu, G. (2022). Heavy metal accumulation characteristics and physiological response of Sabina chinensis and Platycladus orientalis to atmospheric pollution. *Journal of Environmental Sciences*, *112*, 192-201.

Dubois, M., Gills, K.A., Hamilton, J,K., Roberts, P.A., Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Annual Review of Physical Chemistry*, *28*, 350-356.

Encyclopaedia Britannica Editors. (2025, December 18). Acacia. In Encyclopaedia Britannica.

El Rasafi, T., Oukarroum, A., Haddioui, A., Song, H., Kwon, E.E., Bolan, N., Rinklebe, J. (2022). Cadmium stress in plants: A critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *52*(5), 675-726.

Ghafari, S., Kaviani, B., Sedaghathoor, S., Allahyari, M.S. (2021). Assessment of air pollution tolerance index (APTI) for some ornamental woody species in green space of humid temperate region (Rasht, Iran). *Environment, Development and Sustainability*, *23*(2), 1579-1600.

Giannopolitis, C.N., Ries, S.K. (1977). Superoxide dismutase I. occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, *59*, 309-314.

Giri, S., Shrivastava, D. (2013). Effect of air pollution on chlorophyll content of leaves. *Current Agriculture Research*, *1*(2), 93-98.

Hoseinabadi, S. (2012). Effect of air pollution on crops alfalfa and bean in industrial zone of Arak refinery. MSc thesis, Arak University, Arak, Iran. (In Persian).

Huihui, Z., Xin, L., Zisong, X., Yue, W., Zhiyuan, T., Meijun, A., Guangyu, S. (2020). Toxic effects of heavy metals Pb and Cd on mulberry (Morus *alba* L.) seedling leaves: Photosynthetic function and reactive oxygen species (ROS) metabolism responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *195*, 110469.

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *107*, 226–238.

Kar, M., Mishra, D. (1976) .Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology, 57*(2), 315-319.

Kardar, S. Fatemi-talab, S.R. Saeeb, K., Khademi, A. (2015). Phytoremediation of Cadmium by using the Cupressus arizonica and Fraxinus excelsior species (case study: Isfahan). *Journal of Natural Ecosystems of Iran*, *6*(2), 89-96 (In Persian).

Kaya, G., Okumus N., Yaman, M. (2010). Lead, Cadmium and Copper concentration in leaves of Nerium oleander L. and *Robinia pseudoacacia* L. as biomonitors of atmospheric pollution. *Fresenius Environmental Bulletin*, *19*, 98-103.

Latwal, M., Sharma, S., Kaur, I., Nagpal, A.K. (2023). Global Assessment of Air Pollution Indices of Trees and Shrubs for Biomonitoring and Green Belt Development–A Tabulated Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, *234*(3), 205.

Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology. *Elsevier*, 350-382.

Lordifard, P., Seyyednejhad, S.M., Motamedi, H. (2012). The effect of air pollution on some physiological parameters in conocarpus growthed in bidboland gas refinery. *National Plant Stress Congress*, Isfahan, Iran.(In Persian).

Madah, S.M. (2015). The effect of Tehran city air pollution on some morphological and physiological characteristics of plantain leaves. *Journal of Plant Environmental Physiology*, *11* (43), 66-75 (In Persian).

Mohsen Zadeh, S., Akbari, A. (2016). The effect of air pollution on some physiological indicators of elm, maple and plantain plants in Shiraz city. *Environmental Science Studies, 2*(2), 396-378 (In Persian).

Muhammad, S., Wuyts, K., Samson, R. (2019). Atmospheric net particle accumulation on 96 plant species with contrasting morphological and anatomical leaf characteristics in a common garden experiment. *Atmospheric Environment*, *202*, 328-344.

Nazhat, S., Sadeghi, H. (2013). Study of air pollutants variations and effect of climatology parameter in Shiraz city. First Logal Gas, *Technology and Development Congress*. Firozabad, Iran.

Omidi, N. Seyedi, N. Banj Shafi'i, A., Abbaspour, N. (2017). The effect of air pollution stress on the amount of proline, carbohydrates, and photosynthetic pigments in an ornamental maple tree (case study: Urmia city). *Plant Research Journal*, *31*(3), 526-538 (In Persian).

Pourkhabbaz, A., Rastin, N., Olbrich, A., Langenfeld-Heyser, R., Polle, A. (2010). Influence of Environmental Pollution on Leaf Properties of Urban Plane Trees, *Platanus orientalis* L. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *85*(3), 251–255.

Seyyednejad, S. M., Koochak, H. (2011) A Study on air pollution-induced biochemical alteration in *Eucalyptus camaldulensis*. *Australian Journal of Basic Sciences*, *5*, 601-606.

Shafiei, M., Mohdkhah, P. (2018). The effect of green waste plants on the health of the urban environment. Specialized Quarterly. *Journal of Urban Design Studies and Urban Researches*, *1*(4), 11-21.

Sheetal, K.R., Singh, S.D., A., Prasad, S. (2016). Heavy metal accumulation and effects on growth, biomass and physiological processes in mustard. *Indian Journal of Plant Physiology*, *21*, 219-223.

Statistical Center of Iran (2017). *National Population and Housing Census 2016: Mashhad city demographic and geographic characteristics.* Tehran: Statistical Center of Iran.

Suganthi, P., Ganeshkumar, R. S., Govindaraju, M., Selvaraj, M. (2013). Estimation of biochemical characters of plants in response to vehicular air pollution stress in Tiruchirap Pallicity Corporation, Tamil Nadu, India. International *Journal of Recent Science and Research*, *4*,1282- 1289.

Taji, T., Ohsumi, C., Iuchi, S., Seki, M., Kasuga, M., Kobayashi, M., Shinozaki, K. (2002). Important roles of drought and cold inducible genes for galactinol synthase in stress tolerance in Arabidopsis thaliana. *The Plant Journal*, *29*(4), 417-426.

Tiwary, A., Williams, I. (2018). Air pollution: measurement, modeling and mitigation. CRC Press.

Vallero, D.A. (2014). Fundamentals of air pollution. Academic Press.

Varin, S., Cliquet, J.B., Personeni, E., Avice, J.C., Lemauviel-Lavenant, S. (2010). How does sulphur availability modify N acquisition of white clover (*Trifolium repens* L.)?. *Journal of Experimental Botany*, *61*(1), 225-234.

Verma, A., Singh, S.N., 2006. Biochemical and ultrastructural changes in plant foliage exposed to auto-pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, *120*, 585–602.

Verslues, P.E., Lasky, J.R., Juenger, T.E., Liu, T.W., Kumar, M.N. (2014). Genome-wide association mapping combined with reverse genetics identifies new effectors of low water potentialinduced proline accumulation in Arabidopsis. *Plant Physiology*, *164*(1),144-159.

Yadav, R., Pandey, P. (2020). Assessment of Air Pollution Tolerance Index (APTI) and Anticipated Performance Index (API) of roadside plants for the development of greenbelt in urban area of Bathinda City, Punjab, India. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *105*, 906-914.

Zafari, T., Bi-khof Torbati, M., Medarii, F., Razavizadeh, R. (2016). Investigating the effects of air pollution on some physiological indicators of *Pyracantha crenulata*, kansuensis variety in two clean and polluted areas of Tehran. *Journal of Plant Environmental Physiology*, *11*(42), 75-84 (In Persian).

Flower and Ornamental Plants (2025), 10 (2): 285-300
Research article

Study of the extent of absorption of environmental pollutants and the changes caused by them in some physiological indicators in black locust (*Robinia pseudoacacia* L. cv. Umbraculifera) and plantain (*Platanus orientalis* L. Minart)

Seyed Mohammad Ahmadi Hosseini[1], Mahmoud Shoor[1*], Ali Tehrani Far[1], Vahid Akbarpour[2]

1. * Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad
2. Department of Horticultural Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari

✉ shoor@um.ac.ir

Received: 2025/05/04, Revised: 2026/01/13, Accepted: 2026/01/13

Abstract

In addition to affecting the health of city dwellers, air pollution also affects the growth and quality of trees in urban green spaces. Cultivating plant species resistant to air pollutants significantly improves city air quality. Therefore, to investigate the extent of environmental pollutant absorption and the resulting biochemical changes in selected physiological indicators of black locust and plantain, an experiment was conducted in Mashhad city in 2018-2019. Sampling was conducted on trees of similar age during the summer. Leaf samples were taken from each tree at the lower, middle, and upper levels of the canopy and from the outer branches. Physiological traits included chlorophyll a, b, and total carotenoids; biochemical traits; and heavy elements. Enzyme activities, such as those for carbohydrates, proline, protein, cadmium, lead, catalase, superoxide dismutase, and peroxidase, were investigated to determine correlations with the absorption of environmental pollutants. The results showed that the amounts of chlorophyll a, b, and total carotenoids decreased, while the amounts of carbohydrates, proline, protein, cadmium, lead, catalase, superoxide dismutase, and peroxidase increased significantly in acacia and plantain trees.

Keywords: Air pollutants, Natural purification, Physiological responses, Urban green space.