

Research Article

Effects of air pollution on the tolerance of oriental plane (*Platanus orientalis* L.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.)

Seyyede Mahdokht Maddah¹ and Farhang Moraghebi^{2*}

1- Assistant Prof., Department of Biological Sciences and Technologies, YI.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2*- Corresponding author, Associate Prof., Department of Biological Sciences and Technologies, YI.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: moraghebi@yahoo.com

Received: 06.06.2024

Revised: 04.02.2025

Accepted: 05.02.2025

Abstract

Background and Objectives: Trees in urban environments improve air quality by filtering and absorbing gases and particles. However, these trees may themselves be vulnerable to air pollution. Oriental plane trees (*Platanus orientalis* L.) were widely used for Tehran's greenery, Iran, but are now gradually deteriorating. Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.), a resistant species adaptable to various climates, is often planted for beautifying green spaces. This study examined physiological leaf characteristics of both species in late spring across three Tehran areas with varying air pollution levels to assess oriental plane sensitivity and black locust resistance.

Methodology: Twenty leaves from five trees of each species were collected from three parks: Sadra (District 22), Al-Mahdi (District 9), and Avesta (District 11), spanning western to central Tehran. Based on Tehran Air Quality Control Organization data, Al-Mahdi and Avesta parks were classified as polluted, while Sadra Park was relatively clean. Stomatal conductance (transpiration), stomatal resistance, and relative leaf moisture were measured using a porometer. Chlorophyll and carotenoid contents were determined via the Porra (2002) method, and anthocyanin levels via Mancinelli et al. (1988). Dried leaves and soil samples were extracted using a Digesdahl apparatus per Pichtel and Bradway (2008). Iron, zinc, nickel, and copper concentrations in extracts were analyzed using an ICP atomic absorption spectrometer. The experiment followed a completely randomized design with five replicates; SAS software (version 9.1) was used for analysis, with two-way ANOVA and Duncan's multiple range test for variance and mean comparisons.

Results: Soil from the three areas showed minor textural differences, with heavy metal levels below permissible limits. Both species exhibited highest stomatal transpiration in polluted areas and lowest in Sadra Park. Stomatal resistance was highest in Sadra Park for both species, though oriental plane leaf moisture showed no significant differences across areas. Black locust leaf moisture was lowest in Sadra Park ($P < 0.01$). Chlorophyll and carotenoid levels were highest in Sadra Park for oriental plane ($P < 0.01$) and black locust (not significant). Anthocyanin was highest in oriental plane leaves from Sadra Park ($P < 0.01$) and lowest in black locust leaves from Sadra Park ($P < 0.05$). Air pollution did not significantly affect iron, zinc, nickel, or copper in oriental plane leaves, which contained higher zinc and nickel than black locust. Black locust leaves had higher iron and copper, with iron elevated in polluted areas ($P < 0.01$). Nickel was lowest in black locust leaves from Al-Mahdi Park ($P < 0.05$), while copper and zinc showed no significant

differences across areas.

Conclusion: Unlike oriental plane trees, black locust trees showed no air pollution effects on chlorophyll and carotenoid content through late spring. Black locust may defend against pollution by increasing leaf anthocyanin. Air pollution increased stomatal conductance in both species, but black locust prevented dehydration by reducing stomatal resistance and maintaining leaf moisture, while oriental plane did not, resulting in necrosis and leaf dryness, especially in high-pollution traffic zones.

Keywords: Air pollution, green space, heavy metals, physiological traits, plant resistance.

تأثیر آلودگی هوای تهران بر سازگاری درختان چنار (*Platanus orientalis* L.) و افاقیا (*Robinia pseudoacacia* L.)

سیده مهدخت مداح^۱ و فرهنگ مراقبی^{۲*}

۱- استادیار، گروه علوم و فناوری‌های زیستی، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و فناوری‌های زیستی، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پست الکترونیک: moraghebi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: درختان موجود در محیط شهری می‌توانند از طریق فیلتر کردن و جذب گازها و ذرات سبب بهبود کیفیت هوا شوند، اما این درختان ممکن است خود در معرض خطر آلودگی هوا قرار گیرند. در گذشته از درختان چنار (*Platanus orientalis* L.) به فراوانی در ایجاد پوشش گیاهی تهران استفاده شده بود، اما امروزه این درختان به تدریج در حال از بین رفتن هستند. افاقیا (*Robinia pseudoacacia* L.) از جمله درختان مقاومی است که با انواع آب و هوا سازگاری می‌یابد و برای زیباسازی فضای سبز کشت می‌شود، بنابراین به منظور مشخص شدن علت حساسیت چنار و مقاومت نسبی افاقیا، برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی برگ آن‌ها در اواخر بهار در سه منطقه از تهران با آلودگی هوای متفاوت بررسی شد.

مواد و روش‌ها: ۲۰ برگ از پنج پایه درخت چنار و افاقیا از سه پارک صدرا (منطقه ۲۲)، المهدی (منطقه ۹) و اوستا (منطقه ۱۱)، واقع در غرب تا مرکز تهران جمع‌آوری شدند. با استفاده از اطلاعات اداره کنترل کیفیت هوای تهران، پارک المهدی و اوستا به عنوان مناطق آلوده و پارک صدرا به عنوان منطقه به نسبت پاک شهر تهران تعیین شد. به کمک دستگاه هدایت‌سنج روزنه، هدایت روزنه (تغرق روزنه)، مقاومت روزنه و رطوبت نسبی برگ‌ها بر روی درخت اندازه‌گیری شد. سنجش میزان کلروفیل و کاروتنوئید به روش Porra (۲۰۰۲) و میزان آنتوسیانین به روش Mancinelli و همکاران (۱۹۸۸) انجام گرفت. از برگ‌های خشک‌شده و نیز نمونه خاک‌های سه منطقه با استفاده از دستگاه Digesdahl به روش Bradway و Pichtel (۲۰۰۸) عصاره‌گیری شد. در نهایت، با استفاده از دستگاه ICP جذب اتمی، غلظت عناصر آهن، روی، نیکل و مس در هریک از عصاره‌های حاصل از برگ‌ها و خاک تعیین شد. آزمایش در قالب طرح کامل تصادفی در پنج تکرار به اجرا درآمد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS version 9.1 انجام شد. تجزیه واریانس داده‌ها با روش Two Way Anova و مقایسه میانگین‌ها براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام گرفت.

نتایج: بررسی خاک نشان داد که نوع بافت خاک سه منطقه، تفاوت اندکی با یکدیگر دارند و آلودگی فلزات سنگین بیشتر از حد مجاز در آن‌ها مشاهده نشد. برای هر دو درخت افاقیا و چنار، بیشترین تغرق یا هدایت روزنه برگ در مناطق آلوده و کمترین آن در برگ‌های پارک صدرا بود. برعکس، بیشترین مقاومت روزنه در برگ‌های هر دو درخت در پارک صدرا مشاهده شد، اما مقدار این متغیر همانند رطوبت برگ در درخت چنار سه منطقه باهم اختلاف معنی‌داری نداشتند. کمترین درصد رطوبت برگ درختان افاقیا مربوط به پارک صدرا بود ($P < 0.01$). بیشترین مقدار کلروفیل و کاروتنوئید در برگ‌های چنار ($P < 0.01$) و افاقیا مربوط به پارک صدرا بود. برگ‌های چنار پارک صدرا، بیشترین مقدار آنتوسیانین را داشتند ($P < 0.01$)، در حالی که کمترین مقدار آنتوسیانین در برگ‌های افاقیا در پارک صدرا مشاهده شد ($P < 0.05$). تحت تأثیر آلودگی هوا، مقدار چهار عنصر آهن، روی، نیکل و مس در برگ درختان چنار، تغییر معنی‌داری نکرده بود. به طور کلی، مقدار عناصر روی و نیکل در برگ درختان چنار نسبت به برگ درختان افاقیا بیشتر بود. برعکس، برگ افاقیا حاوی مقادیر زیادی از آهن و مس بود. مقدار آهن در برگ افاقای مناطق آلوده، بیشتر از منطقه پاک بود ($P < 0.01$). کمترین مقدار نیکل در برگ‌های افاقای پارک المهدی مشاهده شد ($P < 0.05$). مقادیر مس و روی در برگ‌های درختان افاقای سه منطقه با یکدیگر اختلاف معنی‌دار نداشتند.

نتیجه‌گیری کلی: به نظر می‌رسد که اقلایا برخلاف چنار، تحت تأثیر آلودگی هوا تا اواخر بهار دچار کاهش مقدار کلروفیل و کاروتنوئید نمی‌شود. این احتمال وجود دارد که یکی از سازوکارهای دفاعی این گیاه، توان افزایش مقدار آنتوسیانین برگ‌ها باشد. همچنین، آلودگی هوا، هدایت روزنه‌های هر دو گیاه را افزایش داد. اقلایا با کاهش مقاومت روزنه و افزایش رطوبت برگ از خشک شدن برگ در اثر از دست دادن آب جلوگیری می‌کند، درحالی‌که روزنه‌های برگ چنار چنین واکنشی را نداشتند و علامت نکروزه شدن و خشکی برگ آن به‌طور مشخص در منطقه آلودگی طرح ترافیک قابل مشاهده بود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، صفات فیزیولوژیکی، فضای سبز، مقاومت گیاه، فلزات سنگین.

مقدمه

آلودگی هوا عبارت است از وجود هر نوع آلاینده اعم از جامد، مایع و گاز در هوا به مقدار و در مدت زمانی که کیفیت زندگی را برای انسان و جانداران دیگر به خطر اندازد و یا به آثار باستانی و اموال، خسارت وارد کند. جنگل‌های شهری و درختان موجود در محیط شهری می‌توانند از طریق فیلتر کردن و جذب گازها و ذرات، سبب بهبود کیفیت هوا شوند، اما درعین حال این درختان ممکن است خود در معرض خطر آلودگی هوا قرار گیرند (Pourkhabbaz et al., 2010). به این ترتیب، تعیین گونه‌های مقاوم گیاهان و یافتن علت مقاومت آن‌ها، کمک بزرگی به انتخاب گیاهان برای فضای سبز شهری می‌کند تا ضمن حفظ زیبایی شهر با کمترین آسیب سبب کاهش آلودگی شوند. درختان باتوجه به عمر طولانی خود به‌عنوان موجودات زنده می‌توانند بهترین و دقیق‌ترین شاخص برای بررسی تنش‌های محیطی باشند (Ali Ahmad Korori et al., 2011).

تهران، بزرگ‌ترین شهر و پایتخت ایران، در شمال ایران به فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب دریای خزر و در کوهپایه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز گسترده شده است. نواحی شمالی این شهر از آب و هوای سرد و خشک و نواحی جنوبی از آب و هوای گرم و خشک برخوردار هستند. افزایش جمعیت در این شهر، آن را به یکی از آلوده‌ترین شهرهای دنیا تبدیل کرده است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که آلودگی هوا بر میزان رنگیزه‌ها و عناصر گیاه برحسب میزان آلودگی و نوع گیاه، تأثیر متفاوتی می‌گذارد (Khosropour et al., 2018; Mousavi et al., 2023).

چنار (*Platanus orientalis* L.) درختی است از سرده *Platanus* که بومی نیم‌کره شمالی است. این گونه ازجمله درختانی است که اگر محیط برای آن مناسب باشد، عمر و رشد زیادی دارد. برگ‌های آن، پنجه‌ای شکل و دارای پنج تا هفت لوب است. میوه‌های فندقه آن در دسته‌های کروی شکل اجتماع یافته‌اند (Sabeti, 1994; Mozaffarian, 1994; 2005). بهترین و سازگارترین درخت در تهران قدیم، چنار بود، اما آلودگی شدید هوای تهران و کلان‌شهرهای دیگر سبب شده است که این درختان به تدریج در کلان‌شهرها از بین بروند (Ali Ahmad Korori et al., 2011).

اقلایا (*Robinia pseudoacacia* L.) درخت یا درختچه‌ای گل‌دار و زینتی از تیره پروانه‌آسا است که در بیشتر مناطق ایران می‌روید. این درخت، خزان دیررس دارد. برگ‌های آن، مرکب و به‌رنگ سبز نزدیک به آبی است. اقلایا ازجمله درختان مقاومی است که با انواع آب و هوا سازگاری می‌یابد و به‌منظور زیباسازی فضای سبز، کنترل فرسایش خاک و احیای اراضی کشت می‌شود (Sabeti, 1994; Mozaffarian, 1994; 2005).

در بین آلاینده‌های خاک، فلزات سنگین به‌دلیل غیرقابل تجزیه بودن در طبیعت و طول عمر زیستی زیاد، به‌عنوان یک آلاینده بسیار مهم محیط‌زیست محسوب می‌شوند که می‌توانند سلامتی موجودات زنده اعم از گیاه و جانور را به‌خطر اندازند. آهن (Fe)، روی (Zn)، نیکل (Ni) و مس (Cu) ازجمله فلزات سنگینی هستند که از نظر خطرات محیط‌زیستی دارای اهمیت هستند (Nouri et al., 2016; Atabaki & Lotfi, 2018; Budovich, 2021; Solgi et al.,

آلاینده‌ها است، اما به‌شدت از نظر ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Khosropour et al., 2018).

در بررسی توانایی چندین گونه درختی در جذب فلزات سنگین شامل مس، روی و کادمیوم از خاک‌های آلوده و انتقال آن‌ها به بافت‌های زیرزمینی در سوئیس مشخص شد که *Betula pendula* Roth و *Salix viminalis* L. کادمیوم را به شاخه و برگ‌ها انتقال می‌دهند، اما *Fraxinus excelsior* L. Moench و *Alnus incana* (L.) Hedlundia mougeotii (Soy.-Will. & Godr.) این عناصر را از بافت‌های هوایی حذف کردند (Rosselli et al., 2003). همچنین، هیچ‌کدام از این گونه‌ها، مس جذب‌شده از خاک را به بافت‌های هوایی انتقال ندادند. بررسی پهنک برگ‌های اقاچیا به‌عنوان پاشیگرهای زیستی آلودگی فلزات سنگین در شهر دنیزلی در کشور ترکیه نشان داد که همبستگی قوی بین درجه آلودگی و غلظت فلزات سنگین در برگ‌های اقاچیا وجود دارد (Çelik et al., 2005). ارزیابی تغییرات زیست‌شیمیایی پنج گونه درختی، تحت تأثیر آلودگی هوا نشان داد که آلودگی هوا به‌خصوص آلودگی حرارتی هوا موجب کاهش رنگی‌های فنوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها) در زمان رشد در مناطق آلوده نسبت به مناطق شاهد می‌شود (Govindaraju et al., 2010). بررسی اثرات آلودگی صنعتی و شهری بر تجمع سرب، آلومینیوم، کادمیوم، مس و روی، فعالیت پراکسیداز و محتوای رنگدانه و پروتئین در برگ‌های درختچه‌ها و درختان در شهر آنتاکیا در کشور ترکیه نشان داد که در مقایسه با منطقه شاهد، کاهش رنگدانه و محتوای پروتئین محلول کل و افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در مکان‌های صنعتی و خیابانی شهری مشهودتر بود (Doğanlar & Atmaca, 2011). بررسی اثر آلودگی هوا بر گیاه *Holoptelea integrifolia* (Roxb.) Planch. در سه منطقه شهری، صنعتی و جنگلی در جنوب هند نشان داد که میانگین کلروفیل کل، کلروفیل a و b، کاروتنوئید، کربوهیدرات کل و پروتئین کل در مناطق جنگلی، بیشترین و در مناطق صنعتی، کمترین مقادیر را داشتند (et al., 2012).

2024). بررسی خاک‌های مناطق مختلف سیستان و مقایسه میزان مواد جذب‌شده در خاک با استانداردهای سازمان جهانی بهداشت (WHO) نشان داد که با وجود آلودگی هوا، خاک این مناطق فاقد آلودگی است (Javan Siamardi et al., 2014). مشخص شده است که آلودگی خاک با عناصری مانند نیکل، مس، سرب و روی به‌دلیل فعالیت‌های صنعتی سبب نابودی گیاهان حساس می‌شود. اصلی‌ترین عامل مؤثر بر جذب فلزات سنگین، میزان در دسترس بودن فلز برای جذب توسط گیاه است (Mahdovian, 2019).

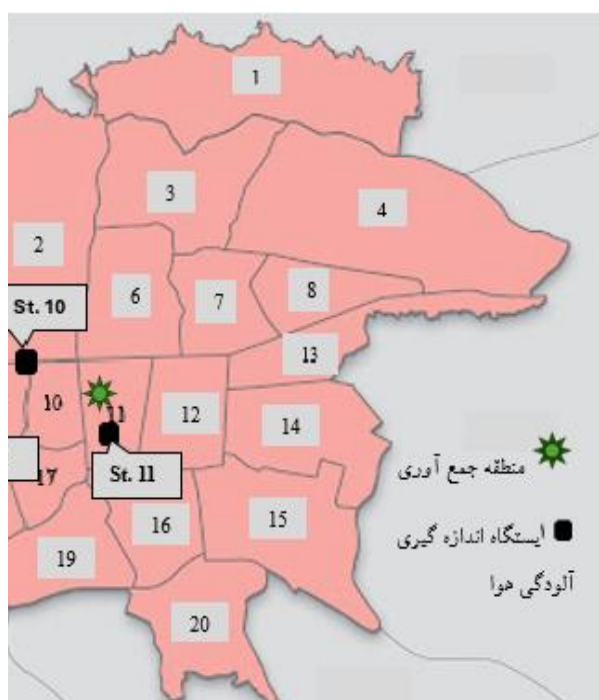
مقایسه خصوصیات برگ چنار در مناطق آلوده شهر مشهد با طبقه به‌عنوان منطقه پاک نشان داد که خاک و هوا در مناطق شهری دارای غلظت زیادی از عناصر سرب، روی، نیکل، کبالت، کروم و مس هستند (et al., 2010). Pourkhabbaz). مقایسه تغییرات کلروفیل، کاروتنوئید و آنتوسیانین در اقاچیا بین سه منطقه از شهر تهران با مقادیر متفاوت از آلودگی هوا نشان داد که میانگین رنگی‌های فتوسنتزی، اختلاف معنی‌داری بین سه منطقه ندارند (Maddah et al., 2014). بررسی درختان چنار در شهر ارومیه بیانگر مقدار بیشتر هیدرات‌های کربن و پرولین در مناطق آلوده نسبت به منطقه شاهد بود (Omidi et al., 2015). همچنین، همبستگی مثبت هیدرات‌های کربن و پرولین با آلاینده‌های PM_{10} ، NH_3 ، O_3 با احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار گزارش شد. در بررسی دیگری که روی گونه چنار در تهران در مقایسه با درخت کاج انجام گرفت، مشخص شد که غلظت سرب، کادمیم و کروم در برگ‌های چنار در منطقه آلوده به‌طور معنی‌داری بیشتر از منطقه با آلودگی کم بود (Khosropour et al., 2018). همچنین، سطح و سطح ویژه برگ و نیز درصد رطوبت برگ درختان چنار در منطقه آلوده، کمتر از منطقه با آلودگی کم به‌دست آمد. محتوای پرولین و مالون‌دی‌آلدهید برگ‌های چنار و فعالیت آنزیم کاتالاز آن‌ها در منطقه آلوده بیشتر از منطقه با آلودگی کم مشاهده شد. علت احتمالی تأثیرپذیری بیشتر چنار در آن پژوهش، جذب زیاد آلاینده‌ها توسط این گونه در مقایسه با کاج تهران عنوان شد. در نتیجه، می‌توان گفت که چنار، گونه‌ای با بیش‌انباشت زیاد

که امروزه از آلودگی هوای این شهر آسیب دیده است و دچار خزان زودهنگام می‌شود. افاقیا نیز به دلیل زیبایی و مقاومت نسبی آن در فضای سبز و پارک‌های شهر تهران کشت شده است (Mozafarian, 2004; Khosropour et al., 2018). در پژوهش پیش‌رو برای درک سازوکارهای دفاعی این درختان، بررسی مقایسه‌ای بین چنار به عنوان گیاهی که نسبت به شدت آلودگی هوا، حساس است و افاقیا به عنوان گیاهی که به طور نسبی مقاوم است، انجام گرفت. این مقایسه با سنجش تغییرات صفاتی مانند هدایت روزنه، مقاومت روزنه، رطوبت نسبی برگ، میزان کلروفیل، کاروتنوئید و آنتوسیانین در برگ و عناصر آهن، روی، نیکل و مس در برگ و خاک ارزیابی شد.

Three studied areas include Sadra Park, located in District 22 is shown as a clean area with the Rose Park air pollution monitoring station; Al-Mahdi Park, located in District 9, is shown as a polluted area 1 with the Fatah and Municipality air pollution monitoring stations in District 10. Avesta Park, located in District 11, is identified as a polluted area 2, with the Municipality's air pollution monitoring station in District 11.

(Kapoor). بررسی دو گونه غیربومی شامل *Ligustrum lucidum* W.T.Aiton و *Euonymus fortunei* var. *fortunei* در جنوب تهران نشان داد که قرارگیری در هوای آلوده حاوی فلزات سنگین، به ویژه آهن، موجب بروز تغییرات شاخص تشریحی در برگ‌ها می‌شود (Taghavizad et al., 2024). با وجود آنکه غلظت آهن جذب شده در گونه دوم بیشتر بود، میزان آسیب بافتی آن کمتر گزارش شد که بیانگر تفاوت گونه‌ای در تحمل آلودگی فلزی است. بررسی ۱۴ گونه درختی در شهر مرسین در کشور ترکیه نشان داد که غلظت نیکل به ویژه در برگ‌های شسته نشده چنار بسیار زیاد بود (Koç et al., 2024).

چنار از درختان قدیمی و رایج کشت شده در تهران است



شکل ۱- محل‌های نمونه‌برداری (ستاره‌های سبز) در شهر تهران
سه منطقه مورد مطالعه شامل پارک صدرا واقع در منطقه ۲۲ به عنوان منطقه پاک با ایستگاه سنجش آلودگی هوای رز پارک، پارک المهدی واقع در منطقه ۹ به عنوان منطقه آلوده ۱ با ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوای فتح و شهرداری منطقه ۱۰ و پارک اوستا واقع در منطقه ۱۱ به عنوان منطقه آلوده ۲ با ایستگاه سنجش آلودگی هوای شهرداری در منطقه ۱۱ بودند.

Figure 1. The samples' locations (green stars) in Tehran city, Iran

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

به منظور یکسان بودن نسبی شرایط رشد درختان، سه پارک با موقعیت‌های جغرافیایی نزدیک به هم (ارتفاع ۱۲۸۳ متری از سطح دریا و عرض جغرافیایی بین $35^{\circ} 40'$ تا $35^{\circ} 44'$ شمالی)، از غرب تهران به سمت مرکز آن انتخاب شدند (شکل ۱). با توجه به داده‌های ایستگاه‌های شاخص آلودگی هوای تهران مانند پارک رز، فتح، شهرداری منطقه ۱۰ و شهرداری منطقه ۱۱ (جدول ۱)، مناطق پاک (یا با آلودگی کم)

و آلوده انتخاب شدند. پارک صدرا در شهرک صدرا بالای استادیوم آزادی (منطقه ۲۲) در حاشیه شهر و منطقه کم‌ترافیک به عنوان منطقه پاک یا با آلودگی کم انتخاب شد. پارک المهدی به عنوان منطقه آلوده ۱ واقع در ضلع جنوب شرقی میدان آزادی تهران در حاشیه بزرگراه سعیدی (منطقه ۹) خارج از محدوده طرح ترافیک اصلی بود. پارک اوستا واقع در خیابان انقلاب بین خیابان توحید و جمال‌زاده (منطقه ۱۱) در منطقه طرح ترافیک اصلی، به عنوان منطقه آلوده ۲ انتخاب شد (شکل ۱ و جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا و میانگین مقادیر آلاینده‌ها در ماه‌های فروردین و اردیبهشت

Table 1. Geographical characteristics of air pollution monitoring stations and average pollutant values in the months of Farvardin (March–April) and Ordibehesht (April–May)

Station name	District	latitude	longitude	O ₃ (ppb)	CO (ppm)	NO (ppb)	NO ₂ (ppb)	NO _x (ppb)	SO ₂ (ppb)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Ros Park (T)	22	N 35° 44' 23.60"	W 51° 16' 40.39"	15.45	1.59	31.35	49.1	53.15	11	20.1	32.3
Fath (T)	9	N 35° 40' 43.75"	W 51° 20' 15.12"	15.57	1.75	22.93	16.27	38.6	-	25.6	77.28
Mantaghe10 (T)	10	N 35° 41' 50.94"	W 51° 21' 28.91"	26.7	2.63	60.2	74.74	104.26	22	27.8	55.15
Mantaghe11 (R)	11	N 35° 40' 22.72"	W 51° 23' 23.04"	22.17	3.06	27.38	52.6	80	-	26.6	32.1

Traffic station: (T); Residential station: (R)

روش پژوهش

جمع‌آوری نمونه

در تاریخ پنجم خردادماه سال ۱۴۰۰ پیش از شروع تنش خشکی ناشی از هوای گرم تابستان، برگ‌های درختان چنار و اقاقیا از سه منطقه در غرب تهران جمع‌آوری شد. در هر منطقه، پنج پایه درخت چنار و اقاقیای تقریباً مشابه از نظر قطر و محل استقرار در قسمت‌های مختلف پارک انتخاب شدند تا نمایشی از وضعیت کلی پارک باشد. حداقل ۲۰ برگ سالم و قابل دسترس از سرشاخه‌های چهار سمت از هر پنج پایه از ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری با توجه به محل تاج درختان چنار و اقاقیا انتخاب و جمع‌آوری شدند. نمونه‌های خاک از هر پارک به تفکیک جمع‌آوری شدند (Maddah et al., 2014; Babapour Alyiar et al., 2016).

سنجش صفات

در این پژوهش، صفات فیزیولوژیکی برگ شامل هدایت روزنه، مقاومت روزنه، رطوبت نسبی برگ، میزان کلروفیل،

کاروتنوئید و آنتوسیانین اندازه‌گیری شد. همچنین، مقدار عناصر آهن، روی، نیکل و مس در برگ و خاک سنجش شد. به کمک دستگاه هدایت‌سنج روزنه (leaf prometer Model SC-J Eijkelpamp هلندی)، هدایت روزنه (تغرق روزنه)، مقاومت روزنه و رطوبت نسبی برگ‌ها بر روی درخت اندازه‌گیری شد.

سنجش میزان کلروفیل و کاروتنوئید به روش استاندارد Porra (۲۰۰۲) انجام شد. ۰/۲۵ گرم برگ در ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد هموژن شد. سپس، عصاره حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۵۰۰ g سانتریفوژ شد و جذب رومایع حاصل در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۶ و ۴۴۰ نانومتر به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Cary 100Bio خوانده شد. مقدار رنگیزه‌ها با استفاده از روابط Porra (۲۰۰۲) براساس میکروگرم بر گرم وزن تر محاسبه شد (Askari & Amini, 2023).

به منظور سنجش میزان آنتوسیانین، ۰/۲۵ گرم از برگ پودر شده با ۲۰ میلی‌لیتر متانول اسیدی (V/V HCL 1%)

سرد به مدت یک شبانه روز عصاره گیری شد. عصاره ها به مدت ۱۵ دقیقه در ۶۰۰۰ rpm سانتریفوژ شدند. جذب عصاره های صاف شده در ۵۳۰ نانومتر (A_{530}) و ۶۵۷ نانومتر (A_{657}) به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Cary 100Bio ارزیابی شد و با استفاده از رابطه (۱) محتوای آنتوسیانین عصاره ها محاسبه شد (Mancinelli *et al.*, 1988; Askari & Amini, 2023).

$$A = A_{530} - 0.25 A_{657} \quad \text{رابطه (۱)}$$

مقدار ۱۰ گرم از برگ های تازه هریک از درختان چنار و اقاچیا توزین شدند و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد در آون قرار داده شد. از برگ های خشک شده و نیز نمونه خاک های سه منطقه با استفاده از دستگاه Digesdahl به روش Pichtel و Bradway (۲۰۰۸) به کمک اسیدسولفوریک ۹۸ درصد و آب اکسیژنه ۳۰ درصد عصاره گیری انجام شد. در نهایت، با استفاده از اسپکتروفتومتر به کمک دستگاه ICP (Atomic Absorption/AAS/England/PG-990) غلظت عناصر آهن، روی، نیکل و مس در هریک از عصاره های

حاصل از برگ ها و خاک تعیین شد (Pichtel & Bradway, 2008). همچنین، با انتقال خاک به آزمایشگاه خاک شناسی، مشخصات فیزیکوشیمیایی و بافت خاک های برداشت شده از ۱۰ سانتی متری سطح خاک سه منطقه بررسی شد (Atabaki & Lotfi, 2018).

آزمایش در قالب طرح کامل تصادفی در پنج تکرار به اجرا درآمد. تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS version 9.1 انجام گرفت. آنالیز واریانس داده ها با روش Two Way Anova و مقایسه میانگین ها براساس آزمون چنددامنه ای دانکن انجام شد.

نتایج

براساس تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیکی در جدول ۲، صفات هدایت روزنه، کلروفیل، کاروتنوئید و آنتوسیانین برگ درختان چنار در مناطق مختلف با یکدیگر اختلاف معنی دار با اطمینان ۹۹ درصد داشتند، اما تفاوت مقاومت روزنه و رطوبت نسبی برگ معنی دار نبود. در اقاچیا، اختلاف صفات هدایت روزنه، مقاومت روزنه و رطوبت نسبی برگ بین سه منطقه مورد مطالعه با اطمینان ۹۹ درصد و آنتوسیانین با اطمینان ۹۵ درصد معنی دار بود. تفاوت مقدار کلروفیل و کاروتنوئیدها، غیرمعنی دار به دست آمد (جدول ۲).

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیکی برگ درختان چنار و اقاچیا در سه منطقه

Table 2. Analysis of variance table of physiological traits of leaves of oriental plane and black locust trees in three regions

Source of variation	Degree of freedom	plants	Stomatal conductance	Stomatal resistance	Leaf moisture	Chlorophyll	Carotenoid	Anthocyanin
Between groups	2	<i>P. orientalis</i>	11244 **	2.99 ns	197.1 ns	2697233 **	4123832 **	0.00021 **
		<i>R. pseudoacacia</i>	14581 **	452.05 **	730 **	14454 ns	169005 ns	0.000212 *
Error	9	<i>P. orientalis</i>	631.4	2.22	197.1	75976	152095	0.0000128
		<i>R. pseudoacacia</i>	595	17.285	17.51	32943	293724	0.000032
Coefficient of variation	-	<i>P. orientalis</i>	23.13	27.69	30	17.13	15.99	24.09
		<i>R. pseudoacacia</i>	29	23.3	8.64	12.4	23.5	26.5

**: Significant at $p < 0.01$; *: Significant at $p < 0.05$; ns: non-significant

به میزان $5 \pm 169/28 \text{ mmol/m}^2\text{s}$ مربوط به پارک المهدی است که با دو منطقه دیگر، اختلاف معنی دار نشان داد. کمترین

براساس جدول ۳، مقایسه میانگین های صفات فیزیولوژیکی برگ چنار نشان داد که بیشینه هدایت روزنه

مقدار هدایت روزنه نیز در برگ چنارهای پارک صدرا (mg/g.fw) آن (899 ± 146) در برگ‌های چنار پارک اوستا مشاهده شد. در ارتباط با مقادیر کاروتنوئید نیز بیشترین مقدار معنی‌دار متعلق به چنارهای منطقه پاک پارک صدرا بود. حتی بیشترین مقدار جذب آنتوسیانین (0.021 ± 0.102) نیز در منطقه پارک صدرا مشاهده شد (جدول ۳).

مقدار هدایت روزنه نیز در برگ چنارهای پارک صدرا (74.43 ± 6.95) مشاهده شد. هرچند اختلاف معنی‌داری بین میانگین مقاومت روزنه چنار در مناطق مختلف وجود نداشت، اما بیشترین مقاومت روزنه به میزان $6/1 \pm 37/0.07$ m^2s/mol مربوط به برگ‌های چنار در پارک صدرا بود. بیشترین مقدار کلروفیل کل (250.8 ± 148)

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های صفات فیزیولوژیکی برگ درختان چنار در سه منطقه

Table 3. Comparison of the averages of the physiological characteristics of the leaves of oriental plane trees in three regions

Regions	Stomatal conductance (Mmol/M ² S)	Stomatal resistance (M ² S/mol)	Leaf moisture (percentage)	Total chlorophyll (mg/gr.fw)	Carotenoid (mg/gr.fw)	Anthocyanin absorption
Sadra	74.43 ± 6.95 b	6.37 ± 1.007 a	46.4 ± 3.727 a	2508 ± 148 a	3568 ± 124 a	0.021 ± 0.102 a
Al-Mahdi	169 ± 5.28 a	5.05 ± 0.763 a	52.8 ± 3.157 a	1417 ± 116 b	2145 ± 191.5 b	0.016 ± 0.001 a
Avesta	81.75 ± 19.9 b	4.75 ± 0.272 a	38.8 ± 11.2 a	899 ± 146 c	1602 ± 248.5 b	0.0069 ± 0.0005 b

Different letters in each column indicate a significant difference between means ($P < 0.05$).

رطوبت نسبی برگ اقاچیا مربوط به برگ‌ها در پارک صدرا به مقدار $33/35 \pm 1/28$ درصد بود. مقایسه میانگین کلروفیل کل در برگ‌های درختان اقاچیا، اختلاف معنی‌داری را بین سه منطقه نشان نداد. همچنین، علی‌رغم اینکه مقدار کاروتنوئیدها در پارک صدرا (2741 ± 407) بیشتر از دو منطقه دیگر به دست آمد، اما این اختلاف معنی‌دار نبود. بیشترین میانگین جذب آنتوسیانین در اقاچیا (0.029 ± 0.003) مربوط به نمونه‌های واقع در پارک اوستا است. کمترین آن نیز در نمونه‌های پارک صدرا (0.016 ± 0.002) مشاهده شد که با یکدیگر اختلاف معنی‌دار داشتند (جدول ۴).

براساس مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیکی برگ اقاچیا (جدول ۴)، بیشترین میزان هدایت روزنه ($150/9 \pm 17/86$) $mmol/m^2 s$ مربوط به منطقه آلوده ۲ پارک اوستا بود که به‌طور معنی‌داری نسبت به دو منطقه دیگر بیشتر بود. برعکس، این منطقه، کمترین میزان مقاومت روزنه ($6/3 \pm 1/115$) m^2s/mol را داشت. بیشترین مقاومت روزنه مربوط به منطقه پاک پارک صدرا ($27/1 \pm 27/782$) m^2s/mol بود. برگ‌های اقاچیا در پارک اوستا نه تنها بیشترین تعرق روزنه را داشتند، بلکه بیشترین رطوبت نسبی برگ ($59/45 \pm 2/073$) درصد را نیز به‌خود اختصاص دادند، درحالی‌که کمترین مقدار

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های صفات فیزیولوژیکی برگ درختان اقاچیا در سه منطقه

Table 4. Comparison of the averages of physiological characteristics of leaves of black locust trees in three regions

Regions	Stomatal conductance (Mmol/M ² S)	Stomatal resistance (M ² S/mol)	Leaf moisture percentage	Total chlorophyll (mg/gr.fw)	Carotenoid (mg/gr.fw)	Anthocyanin absorption
Sadra	37.13 ± 2.424 b	27.27 ± 1.782 a	33.35 ± 1.28 c	1488 ± 28.18 a	2741 ± 407 a	0.016 ± 0.0029 b
Al-Mahdi	58.98 ± 11.1 b	19.8 ± 2.922 b	52.47 ± 2.682 b	1388 ± 8 a	2072 ± 125 a	0.018 ± 0.0022 b
Avesta	150.9 ± 17.86 a	6.3 ± 1.115 c	59.45 ± 2.073 a	1496 ± 132 a	2357 ± 197 a	0.029 ± 0.0032 a

Different letters in each column indicate a significant difference between means ($P < 0.05$).

یافته‌های حاصل از بررسی خصوصیات و بافت خاک نشان داد که بافت خاک منطقه صدرا، لوم رس، پارک المهدی، لوم و پارک اوستا، لوم ماسه‌ای است (جدول ۵). میزان pH و EC منطقه پاک اگرچه از مناطق آلوده کمتر است، اما این تفاوت معنی‌دار نبود. مقادیر چهار عنصر آهن، روی، نیکل و مس در خاک سه منطقه مشخص و با مقادیر استاندارد جهانی در خاک‌های با آلودگی کم مقایسه شد. اگرچه مقایسه مقدار

آهن و روی در سه منطقه، تفاوت‌هایی با یکدیگر نشان دادند، اما در محدوده خاک‌های آلوده به فلزات سنگین قرار نمی‌گیرند. هر سه منطقه دارای آلودگی کم به فلز سنگین نیکل هستند. پارک صدرا به میزان مرزی آلودگی به مس را نشان داد، درحالی‌که دو منطقه دیگر، مقدار مس خاک کمتر از مرز آلودگی داشتند. باتوجه به موارد ذکر شده به نظر می‌آید که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین خاک سه منطقه وجود ندارد.

جدول ۵- خصوصیات فیزیکی خاک و مقدار عناصر برحسب ppm در خاک سه منطقه

Table 5. Physical properties of soil and the amount of elements in mg/kg in the soil of three regions

Region	Clay	Sand	Silt	pH	EC	Fe	Zn	Ni	Cu
Sadra	38%	28%	24%	7.4	0.73	61.1	53.2	26.5	36.2
Al-Mahdi	24%	40%	36%	7.7	0.8	69.3	56.8	24.3	28.4
Avesta	16%	64%	20%	7.6	0.76	73.2	48.2	27.2	29.2
Low Pollution WHO	-	-	-	-	-	2000	120	23	35

براساس جدول ۶، تحت تأثیر آلودگی هوا، مقدار عنصر آهن در برگ درختان اقاقیا سه منطقه با یکدیگر اختلاف معنی‌دار با اطمینان ۹۹ درصد داشتند. همچنین، در برگ درختان اقاقیا، اختلاف میانگین مقادیر عنصر نیکل با اطمینان ۹۵ درصد، معنی‌دار بود (جدول ۶).

بررسی جدول ۷ نشان داد که بیشترین مقدار آهن در مناطق آلوده به میزان $5/37 \pm 0/128$ ppm در برگ‌های چنار پارک اوستا و نیز به مقدار $5/06 \pm 0/065$ ppm در پارک المهدی مشاهده شد. کمترین مقدار آن نیز در برگ درختان

اقاقیای پارک صدرا $4/84 \pm 0/041$ ppm بود. نیکل در برگ‌های اقاقیا در منطقه آلوده پارک المهدی $0/82 \pm 0/014$ ppm کمترین مقدار را بین سه منطقه به خود اختصاص داد. مقدار آهن، روی، نیکل و مس در برگ درختان چنار تحت تأثیر آلودگی هوا تغییری نکرده بود. برگ درخت چنار نسبت به برگ درخت اقاقیا دارای مقادیر بیشتری از عنصر روی و نیکل بود. برعکس، برگ اقاقیا حاوی مقادیر بیشتری از آهن و مس بود (جدول ۷).

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس مقدار عناصر در برگ چنار و اقاقیا

Table 6. Results of analysis of variance of element content in oriental plane and black locust leaves

Source of variation	Degree of freedom	Plants	Fe	Zn	Ni	Cu
Between groups	2	<i>P. orientalis</i>	0.083925 ^{ns}	0.5101 ^{ns}	0.0961 ^{ns}	0.05882 ^{ns}
		<i>R. pseudoacacia</i>	0.2833 ^{**}	0.0374 ^{ns}	0.0087 [*]	0.0433 ^{ns}
Error	9	<i>P. orientalis</i>	0.0327	0.1904	0.0484	0.07543
		<i>R. pseudoacacia</i>	0.03009	0.0222	0.001297	0.03381
Coefficient of variation	-	<i>P. orientalis</i>	7.23	4.01	9.04	11.54
		<i>R. pseudoacacia</i>	3.40	10.15	4.12	2.94

** : Significant at $p < 0.01$; * : Significant at $p < 0.05$; ns: non-significant

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های مقدار عناصر در برگ درختان چنار و افاقیا برحسب ppm در سه منطقه

Table 7. Comparison of the average amount of elements in the leaves of oriental plane and black locust trees in terms of ppm in three regions

Region	Cu		Ni		Zn		Fe	
	R. <i>pseudoacacia</i>	<i>P. orientalis</i>	R. <i>pseudoacacia</i>	<i>P. orientalis</i>	R. <i>pseudoacacia</i>	<i>P. orientalis</i>	R. <i>pseudoacacia</i>	<i>P. orientalis</i>
Sadra	6.372±0.128 a	2.37±0.026 a	0.91±0.018 a	2.2±0.122 a	1.522±0.0385 a	11.19±0.034 a	4.84±0.041 b	2.62±0.06 a
Al-Mahdi	6.207±0.03 a	2.5±0.02 a	0.82±0.014 b	2.59±0.091 a	1.357±0.0385 a	10.9±0.012 a	5.06±0.065 a	2.34±0.288 a
Avesta	6.180±0.089 a	2.26±0.013 a	0.88±0.0201 a	2.43±0.03 a	1.527±0.117 a	10.48±0.007 a	5.37±0.128 a	2.53±0.236 a

Different letters in each column indicate a significant difference between means (P<0.05).

بحث

به احتمال زیاد به دلیل خصوصیات ریخت‌شناختی و ژنتیکی نارون است (Mohsenzadeh & Akbari, 2017). ارزیابی تأثیر آلودگی هوای شهر پکن در کشور چین بر پنج گونه درختی نشان داد که محتوای نسبی کلروفیل، تراکم بافت برگ و تراکم روزنه‌ای به سمت مرکز شهر با آلودگی هوای زیاد افزایش یافتند (Yan et al., 2025).

آلودگی هوا در پژوهش پیش‌رو سبب افزایش هدایت روزنه یا از دست دادن آب در هر دو درخت افاقیا و چنار شد، اما در افاقیا، مقاومت روزنه کاهش و رطوبت برگ افزایش یافت، درحالی‌که این دو متغیر در برگ چنار تغییری نکردند. حرکت روزنه برگ تحت تأثیر غلظت دی‌اکسیدکربن در فضاهای بین سلولی است. هنگامی که غلظت دی‌اکسیدکربن در داخل سلول، بیشتر از محیط بیرون باشد، روزنه‌ها به طور کامل بسته می‌شوند. کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن در داخل برگ، یک مسیر زیست‌شیمیایی درگیرکننده ناقل‌های پتاسیم و کلرید را ایجاد می‌کند که به روزنه‌ها اجازه می‌دهد تا دوباره باز شوند. بررسی گیاهان باقلا، تربچه، خیار و سویا نشان داد که هدایت روزنه برگ‌ها در پاسخ به گاز SO₂ به تنهایی، افزایش و در پاسخ به گاز O₃ به تنهایی کاهش یافت و در پاسخ به حضور هر دو آلاینده، هدایت روزنه بیشتر کاهش یافت (Unsworth & Black, 1981). در پژوهش پیش‌رو، افزایش هدایت روزنه‌ای در هر دو گیاه مشاهده شد که مانند پاسخ به SO₂ است. با توجه به نتایج حاصل در این پژوهش به نظر می‌رسد از جمله آسیب‌های

با بررسی نتایج مربوط به تغییرات مقدار رنگیزه‌ها در دو گیاه مشاهده شد که تحت تأثیر آلودگی هوا، مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل و کاروتنوئید) و نیز آنتوسیانین در درختان چنار کاهش یافته است، اما در افاقیا با افزایش آنتوسیانین از مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی کاسته نشد. کاهش کلروفیل، کاروتنوئید و آنتوسیانین در چنار همسو با نتایج گزارش‌شده توسط Govindaraju و همکاران (۲۰۱۰)، Kapoor و همکاران (۲۰۱۲) و نیز Mohsenzadeh و Akbari (۲۰۱۷) است. به نظر می‌رسد که یکی از دلایل مقاوم بودن افاقیا، توان آن در افزایش آنتوسیانین در پاسخ به تنش است که موجب جلوگیری از کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود. آنتوسیانین‌ها و فنل‌ها، متابولیت‌های ثانویه گیاهی هستند که از گیاه در برابر واکنش‌های فتودینامیک آسیب‌رسان با سرکوب کردن گونه‌های فعال اکسیژن حفاظت می‌کنند (Qanati et al., 2009).

بررسی خصوصیات فیزیولوژیکی درختان نارون، چنار و افرا در شهر شیراز نشان داد که آلودگی هوا سبب کاهش معنی‌دار کلروفیل، کاروتنوئید و آنتوسیانین و افزایش معنی‌دار پرولین و پراکسیداسیون غشا در مناطق آلوده شده است (Mohsenzadeh & Akbari, 2017). میزان کاهش و یا افزایش برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی مانند کلروفیل، آنتوسیانین و لیپید پراکسیداسیون غشا برگ در گیاه نارون از نظر مقاومت به آلودگی هوا نسبت به افرا و چنار بهتر بود که

برخی فرایندهای فیزیولوژیکی صنوبر در شمال ایران نشان داد که در برگ‌های تابستانه، هم‌زمان با افزایش دما و خشکی هوا، میزان کلروفیل a, b، قندهای محلول و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، افزایش معنی‌داری نسبت به فصل بهار داشتند (Farzami Sepehr et al., 2014). به همین دلیل نیز برای آنکه تأثیر تنش خشکی و دمایی تابستان با آلودگی هوا همراه نباشد، پژوهش پیش‌رو در اواخر بهار انجام شد. براساس داده‌های مراکز سنجش آلودگی هوا، شدت آلودگی هوا در خردادماه و پس از آن بیشتر بود، اما گرمای تابستان نیز به عوامل مؤثر بر صفات مورد سنجش اضافه می‌شد. همچنین، در صورتی‌که مناطق شمالی با جنوبی تهران مقایسه می‌شدند، علاوه بر آلودگی هوا، دما، ارتفاع و شیب زمین نیز تفاوت زیاد داشتند. پس این عوامل نیز در نتایج تأثیرگذار بودند، بنابراین منطقه‌های غرب به مرکز که تقریباً ارتفاع و شیب و دمای مشابه‌تری دارند، انتخاب شدند.

آهن برای سنتز کلروفیل، لازم و پیش‌ساز آن است. به همین دلیل، کمبود آن موجب کلروز برگ گیاه می‌شود. آهن به‌عنوان حامل اکسیژن عمل می‌کنند و در واکنش‌های درگیر در تقسیم سلولی و رشد نقش دارد (Ganjali et al., 2018; Salehi Eskandari & Khorati Kopaei, 2020). تحت تأثیر آلودگی هوا، مقدار آهن در برگ افاقیا به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. شاید به همین دلیل مقدار کلروفیل کم نشده است. البته غلظت این عنصر در خاک مناطق آلوده، کمی بیشتر از پارک صدر بود. از مقایسه افاقیا و چنار در ارتباط با مقدار آهن برگ مشخص می‌شود که افاقیا، مقدار زیادی از این عنصر را در خود انباشته است. با توجه به نقش آهن در سنتز کلروفیل احتمال دارد که یکی از دلایل زود شدن برگ چنار و کاهش کلروفیل در آن به عدم توان این درخت در نگهداری مقدار زیاد آهن برگردد. اغلب پژوهشگران، کمبود آهن یا کلروزه را ناشی از عدم توازن یون‌های فلزی مانند مس و منگنز، زیاد بودن مقدار فسفر در خاک، pH زیاد، آهک زیاد، رطوبت زیاد خاک، دمای سرد و زیادی مقدار HCO_3^- در محیط ریشه به‌ویژه آب آبیاری می‌دانند (Lakzian et al., 2013).

آلودگی هوا، افزایش هدایت روزنه است. افاقیا با کاهش مقاومت روزنه و افزایش رطوبت برگ از خشک شدن برگ در اثر از دست دادن آب جلوگیری می‌کند. از نظر ظاهری نیز در اواخر بهار، برگ‌های درختان چنار به‌ویژه در پارک اوستا، نقاط خشک‌شده بیشتری داشتند، درحالی‌که در درختان افاقیا، نکروزه شدن برگ مشاهده نشد. یکی از دلایل زود شدن چنار نیز ممکن است ادامه روند از دست دادن آب و عدم توان گیاه در کاهش آن در تابستان باشد. این پدیده چون با کم‌آبی و گرمای تابستان همراه می‌شود، شدت از دست دادن آب بیشتر می‌شود و فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرند. براساس نتایج پژوهش‌های پیشین، بسیاری از آلودگی‌های اتمسفری حتی وقتی در غلظت‌های به نسبت کم باشند، ممکن است در کنترل دستگاه روزنه‌ای دخالت کنند، بنابراین آلاینده‌ها، توانایی به هم ریختن تعادل آب برگ و گیاه را دارند. اگرچه غلظت‌های زیاد آلاینده‌هایی مانند SO_2 و O_3 به‌طور معمول سبب بسته شدن روزنه‌ها می‌شود، اما در غلظت‌های کم اغلب هدایت روزنه کاهش می‌یابد (Kohan et al., 2021). پس برحسب نوع و مقدار آلاینده‌ها و نوع گیاه می‌توان پاسخ‌های متفاوتی از گیاهان مشاهده کرد.

بررسی اثر ذرات معلق هوا بر دو گیاه *Neolitsea aurata* Koidz. (Hayata) و *Lindera kwangtungensis* (H.Liu) C.K.Allen نشان داد که سرعت خالص فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای در طول زمان در مقدار زیاد $\text{PM}_{2.5}$ کاهش می‌یابد (Li et al., 2019). اثر بازدارندگی ممکن است با بسته شدن روزنه و کاهش رسانایی روزنه ایجاد شود که با کاهش اندازه روزنه تحت شرایط آلودگی $\text{PM}_{2.5}$ ثابت شد (Li et al., 2019). پیش‌تر، کاهش در وزن خشک برگ چنار و درصد رطوبت به دلیل افزایش گازهای آلوده در مناطق مختلف شهر تهران گزارش شده است (Rashidi & Jalili, 2018). کاهش رشد در منطقه آلوده به کاهش وزن خشک منجر می‌شود. در واقع، آلودگی هوا و رسوب ذرات آگروز موتور روی برگ‌ها، سرعت تبادل گاز را از طریق سطح برگ کاهش می‌دهد و با مسدود کردن روزنه‌ها، فرایند فتوسنتز را کاهش می‌دهد (Rashidi & Jalili, 2018). بررسی اثر تغییرات فصلی بر

عنصر روی به شکل کاتیون دوظرفیتی توسط گیاه جذب می‌شود و فعال‌کننده تعداد زیادی از آنزیم‌ها است. روی در تولید کلروفیل، کربوهیدرات‌ها و نشاسته نقش دارد و به ساخت هورمون‌های رشد کمک می‌کند. از علائم کمبود روی می‌توان به کلروز و محدود شدن رشد گیاه اشاره کرد (Ganjali et al., 2018; Salehi Eskandari & Khorati, 2020). مقایسه مقدار روی در چنار و اقاquia نشان داد که در مجموع، مقدار روی در برگ چنار بسیار بیشتر از برگ اقاquia است. حتی درخت چنار، مقدار این عنصر را دو برابر مقدار آن در خاک در خود انباشته است، اما مقدار روی در دو گیاه تحت تأثیر آلودگی هوا، تغییر معنی‌داری نداشتند. نیکل، عنصری است که در مقادیر بسیار کم برای گیاه ضروری است و در ترکیب آنزیم‌های گیاهی مانند اوره‌آز وجود دارد. به‌طوری که فقدان نیکل موجب مسمومیت گیاه از اوره می‌شود. همچنین، نیکل به‌عنوان کاتالیزور در فعالیت آنزیم‌هایی که در گیاهان لگومینوزه مانند اقاquia در تثبیت نیتروژن نقش دارند، عمل می‌کند. در گیاهان چوبی، سمیت ناشی از زیاد بودن نیکل در صورتی رخ می‌دهد که مقدار آن در بافت گیاه بین ۸۰ تا ۱۲۰ ppm باشد (Brown et al., 1987; Ganjali et al., 2018; Salehi Eskandari & Khorati, 2020). نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که در مناطق مختلف شهر تهران، مقدار نیکل در حد مسمومیت گیاه نیست، اما در منطقه آلوده پارک المهدی، کاهش نیکل در برگ گیاه اقاquia مشاهده شد. البته مقدار این عنصر در برگ اقاquia، بسیار کمتر از خاک و برگ چنار است. مقدار نیکل در برگ چنار تقریباً مشابه مقدار آن در خاک است. برای مشخص شدن تأثیر دقیق آلودگی هوا بر مقادیر انواع زیرعنصر و درشت‌عناصر به سنجش‌های تکمیلی نیاز است. ریزعنصر مس به‌طور عمده به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌های مختلف اکسیداتیو عمل می‌کند. مس، نقش مهمی در فتوسنتز و به‌طور غیرمستقیم در تولید کلروفیل دارد. این عنصر در غلظت‌های زیاد سمی است. از نشانه‌های کمبود آن می‌توان به قهوه‌ایی شدن سر برگ و کلروز اشاره کرد (Ganjali et al., 2018; Salehi Eskandari & Khorati, 2020).

بر اساس نتایج پژوهش پیش‌رو، مقدار مس در مناطق مختلف در هیچ‌یک از درختان تغییر معنی‌داری نکرد، اما مقدار مس در برگ اقاquia، دو برابر برگ چنار به‌دست آمد. همچنین، مقدار آن در برگ اقاquia، بسیار بیشتر از مقدار این عنصر در خاک بود. احتمال دارد که نوع پاسخ‌های این دو گیاه به آلودگی هوا تحت تأثیر مقادیر عناصر باشد. به‌طوری که مقدار نیکل و روی در برگ چنار نسبت به اقاquia و مقدار آهن و مس در برگ اقاquia نسبت به چنار به‌طور طبیعی بیشتر باشد که خود می‌تواند بر پاسخ این گیاهان به تنش‌های محیطی تأثیر بگذارد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقدار آهن و نیکل در برگ‌های اقاquia تحت تأثیر آلودگی هوا کاهش یافت. ارزیابی برگ‌های اقاquia به‌عنوان پایشگر زیستی آلودگی فلزات سنگین در شهر دینزلی در کشور ترکیه نشان داد که غلظت همه عناصر اندازه‌گیری شده (Fe, Zn, Cu, Pb, Mn و Cd) در نمونه‌های جمع‌آوری شده از مناطق صنعتی زیاد بودند (به‌جز سرب و مس که در نمونه‌های جمع‌آوری شده از کنار جاده‌های شهری به‌علت ترافیک جاده‌های شهری، بیشتر از مناطق صنعتی به‌دست آمد) (Çelik et al., 2005). همبستگی قوی بین درجه آلودگی و غلظت عناصر در برگ‌های اقاquia نشان داد که برگ‌های این گونه به‌طور دقیق منعکس‌کننده تغییرات محیطی هستند (Çelik et al., 2005). به‌نظر می‌رسد که میزان فلزات سنگین در برگ‌های آن‌ها به‌عنوان پایشگرهای زیستی مؤثری از کیفیت محیطی در مناطق در معرض آلودگی صنعتی و ترافیکی عمل می‌کنند (Çelik et al., 2005). مقایسه خصوصیات ریخت‌شناختی برگ سه درخت مقاوم به آلودگی هوا (اقاquia، چنار و ون) در شهر تهران نشان داد که اقاquia، بیشترین ارتباط معنی‌دار با شاخص‌های مقاومت به شرایط آلودگی را دارد، درحالی که کمترین مقاومت در چنار مشاهده شد (Rashidi, 2019). در پژوهش پیش‌رو نیز مقادیر آهن و مس در برگ‌های اقاquia زیاد بود که می‌تواند مربوط به توان اقاquia در تجمع برخی فلزات سنگین باشد. به‌طوری که این عناصر را از خاک شهر تهران جذب و در خود انباشته کرده است. به‌طور کلی، درخت اقاquia به‌عنوان پایشگر زیستی فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم، مس و روی

باتوجه به اینکه مقدار زیرعناصر کمتر تحت تأثیر آلودگی هوا قرار گرفتند، لازم است در مورد نقش آن‌ها پژوهش‌های بیشتر و دقیق‌تری انجام شود. به‌ویژه بررسی شود آیا مقدار زیاد آهن و مس در برگ اقاقیا، تأثیری در مقاومت آن به آلودگی دارد؟

تشکر و قدردانی

پژوهش پیش‌رو با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهری به‌اجرا درآمده است. بدین‌وسیله از مسئولان آن واحد دانشگاهی و نیز جناب آقای دکتر ساسان فرهنگیان و مهندس فرناز افدیده که ما را در انجام این پژوهش یاری کردند، کمال تقدیر و تشکر را داریم.

References

- Aksoy, A., Sahun, U. and Duman, F., 2000. *Robinia pseudo-acacia* L. as a possible biomonitor of heavy metal pollution in Kayseri. Turkish Journal of Botany, 24(5): 279-284.
- Ali Ahmad Korori, S., Shirvany, A., Matiniazadeh, M., Shabestani, S. and Valipour, H.K., 2011. Study of increment variations in plane tree species at 5 sites in Tehran (Case study: *Platanus orientalis*). Iranian Journal of Forest, 2(4): 345-355 (In Persian with English summary).
- Askari, M. and Amini, F., 2023. Practical Guide of Plant Physiology. Arak University Press, Arak, Iran, 293p (In Persian).
- Atabaki, M. and Lotfi, A., 2018. Investigation of soil heavy metals concentrations (Pb, Cd, Zn, and Cu) in different areas of Isfahan in 1396. Journal of Research in Environmental Health, 4(1): 21-30 (In Persian with English summary).
- Babapour Alyiar, Z., Banj Shafiei, A. and Seyed, N., 2016. Effect of air pollution on leaf morphology in narrow-leafed ash (*Fraxinus rotundifolia* Mill.), oriental plane (*Platanus orientalis* L.) and box elder (*Acer negundo* L.) (Case study: Urmia city). Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 24(1): 31-21 (In Persian with English summary).
- Brown, P.H., Welch, R.M. and Cary, E.E., 1987. Nickel: a micronutrient essential for higher plants. Plant Physiology, 85(3): 801-803.

مناسب و مفید است (Aksoy et al., 2000).

به‌نظر می‌رسد که درخت اقاقیا برخلاف چنار، تحت تأثیر آلودگی هوا تا اواخر بهار دچار کاهش مقدار کلروفیل و کاروتنوئید نمی‌شود. این احتمال وجود دارد که یکی از سازوکارهای دفاعی این گیاه، افزایش مقدار آنتوسیانین برگ‌ها است. همچنین، آلودگی هوا، هدایت روزنه‌های هر دو گیاه را افزایش داد. اقاقیا با کاهش مقاومت روزنه و افزایش رطوبت برگ از خشک شدن برگ در اثر از دست دادن آب جلوگیری می‌کند، درحالی‌که روزنه‌های برگ چنار، چنین واکنشی نداشتند و علائم نکروزه شدن و خشکی برگ‌های چنار به‌طور مشخص در منطقه آلوده پارک اوستا قابل مشاهده است. مقدار آهن در برگ اقاقیای مناطق آلوده بیشتر از منطقه پاک بود و کمترین مقدار نیکل نیز در منطقه آلوده مشاهده شد.

- Budovich, L.S., 2021. Effects of heavy metals in soil and plants on ecosystems and the economy. Caspian Journal of Environmental Sciences, 19(5): 991-997.
- Çelik, A., Kartal, A.A., Akdoğan, A. and Kaska, Y., 2005. Determining the heavy metal pollution in Denizli (Turkey) by using *Robinia pseudo-acacia* L. Environment International, 31(1): 105-112.
- Doğanlar, Z.B. and Atmaca, M., 2011. Influence of airborne pollution on Cd, Zn, Pb, Cu, and Al accumulation and physiological parameters of plant leaves in Antakya (Turkey). Water Air and Soil Pollut, 214: 509-523.
- Farzami Sepehr, M., Mohammadi, M. and Gurbanli, M., 2014. The effect of seasonal changes on some physiological processes of *Populus deltoides* Marsh. Journal of Plant Ecophysiology, 35(3): 12-24 (In Persian).
- Ganjali, A., Zare Hassanabadi, M. and Safar Yazdi, A., 2018. Plant Physiology. Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad, Iran, 354p (In Persian).
- Govindaraju, M., Ganeshkumar, R.S., Suganthi, P., Muthukumar, V.R. and Visvanathan, P., 2010. Impact assessment of air pollution stress on plant species through biochemical estimations. Proceedings of the Conference on World Academy of Science, Engineering and Technology (48). Venice, Italy, 24-26 Nov. 2010: 933-936.
- Javan Siamardi, S., Rezaei Kahkha, M.R., Safaei Moghaddam, A. and Noori, R., 2014. Survey of heavy

- metals concentration (Fe, Ni, Cu, Zn, Pb) in farmland soils of Sistan central part. Journal of Environmental Health Engineering, 2(1): 46-53 (In Persian with English summary).
- Kapoor, C.S., Bamniya, B.R. and Kapoor, K., 2012. Natural and effective control of air pollution through plants- studies on a tree species: *Holoptelea integrifolia* L. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 17(7): 793-803.
 - Khosropour, E., Attarod, P., Shirvany, A., Bayramzadeh, V., Moeinaddini, M. and Hakimi, L., 2018. Morphological and physiological properties of *Platanus orientalis* and *Pinus eldarica* leaves to urban pollution in Tehran. Iranian Journal of Forest, 10(2): 123-137 (In Persian with English summary).
 - Koç, İ., Canturk, U., Isinkaralar, K., Ozel, H.B. and Sevik, H., 2024. Assessment of metals (Ni, Ba) deposition in plant types and their organs at Mersin City, Türkiye. Environmental Monitoring Assessment, 196(3): 282.
 - Kohan, A., Haghighi, M., Mirghaffari, N. and Ehtemam, M.H., 2021. Effect of air pollution resulting from exhaust emission on the morphological, physiologic, and biochemical responses of lettuce (*Lactuca sativa* var. *longifolia*). Journal of Plant Process and Function, 9(40): 43-53.
 - Lakzian, A., Feiziasl, V., Tehranifar, A., Halajnia, A., Rahmani H., Pakdel, P., ... and Talebi, A., 2013. Evaluation of dieback and early yellowing of sycamore trees (*Platanus* sp.) in Mashhad by using GGE Biplot analysis. Journal of Horticultural Science, 27(3): 259-274 (In Persian with English summary).
 - Li, Y., Wang, Y., Wang, B., Wang, Y. and Yu, W., 2019. The response of plant photosynthesis and stomatal conductance to fine Particulate Matter (PM_{2.5}) based on leaf factors analyzing. Plant Biologists, 62: 120-128.
 - Maddah, S.M., Moraghebi, F., Farhangian Kashani, S. and Afdideh, F., 2014. Investigation of physiological responses and causes of resistance of acacia tree (*Robinia pseudoacacia* L.) under the influence of air pollution in Tehran. Journal of Plant Environmental Physiology, 10(38): 48-56 (In Persian with English summary).
 - Mahdovian, K., 2019. The effect of heavy metal zinc on soil and plant pollution. Abstracts of the Third National Conference on Sustainable Development Strategies in Iran. Tehran, Iran, 4 Aug. 2019: 4p (in Persian).
 - Mancinelli, A., Hoff, A. and Cottrell, M., 1988. Anthocyanin production in chl-rich and chl-poor seedlings. Plant Physiology, 86: 652-654.
 - Mohsenzadeh, S. and Akbari, Y., 2017. Effect of air pollution on some physiological indexes of *Ulmus*, *Acer*, and *Platanus* plants in Shiraz city. Journal of Environmental Sciences Studies, 2(2): 387-396 (In Persian with English summary).
 - Mousavi Javardi, N.S., Pakravan Fard, M., Panahi, P. and Zarei, R., 2023. Assessment of the relationships between leaf characteristics with air pollutants; A case study on Oriental plane (*Platanus orientalis* L.) and Caucasian hackberry (*Celtis caucasica* Willd.). Arboriculture and Urban Forestry, 49(6): 329-342.
 - Mozaffarian, V., 2005. Trees and Shrubs of Iran. Published by Farhang Moaser, Tehran, Iran, 1082p (In Persian).
 - Mozaffarian, V.A., 1994. Plant Classification Volume II: Dicotyledons. Published by Danesh Emrouz, Tehran, Iran, 610p (In Persian).
 - Nouri, E., Matinzade, M., Moshki, A., Ensafi Moghaddam, T. and Rahimi, M., 2016. Evaluating the amount of heavy metals in dusts and their absorption by Brant's oak (*Quercus brantii* Lindl.) (Case study: Meleh Siah, Ilam). Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 23(4): 605-616 (In Persian with English summary).
 - Omid, N., Seyed, N., Banj Shafiei, A. and Abbaspour, N., 2015. Content of carbohydrates and proline of Oriental plane (*Platanus Orientalis* L.) leaf in air pollution stress, case study: Urmia city. Forest Research and Development, 1(2): 109-122 (In Persian with English summary).
 - Pichtel, J. and Bradway, D.J., 2008. Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd, and Zn treatment at a severely contaminated site. Bioresource Technology, 99(5): 1242-1251.
 - Porra, R.J., 2002. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls *a* and *b*. Photosynthesis Research, 73: 149-156.
 - Pourkhabbaz, A., Rastin, N., Olbrich, A., Langenfeld-Heyser, R. and Polle, A., 2010. Influence of environmental pollution on leaf properties of urban plane trees, *Platanus orientalis* L. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 85: 251-255.
 - Qanati, F., Bakhtiarian, S. and Abdul Mulki, P., 2009. Effect of methyl jasmonate on secondary metabolites of evergreen plant (*Calendula officinalis* L.). Modares Journal of Biotechnology, 1(1): 21-33 (In Persian).
 - Rashidi, F. and Jalili, A., 2018. The effects of airborne pollutants and climatic factors of different sections of Tehran areas on leaf characteristics of oriental plane (*Platanus orientalis* L.) trees. Eopersia. 6(1): 67-78.
 - Rashidi, F., 2019. Air pollution tolerant Species in city green area. Journal of Natural Environment, 72(2): 251-261 (In Persian with English summary).

- Rosselli, W., Keller, C. and Boschi, K., 2003. Phytoextraction capacity of growing on a metal-contaminated soil. *Plant and Soil*, 256(2): 265-272.
- Sabeti, H., 1994. *Forests, Trees and Shrubs of Iran*. Published by University of Yazd, Yazd, Iran, 884p (In Persian).
- Salehi Eskandari, B. and Khorati Kopaei, M., 2020. *Basics of Plant Physiology*. Payam Noor University Press, Tehran, 240p (In Persian).
- Solgi, E., Abbasitabar, H., Hasanvand, F. and Bakhshi, F., 2024. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil and leaf of pistachio trees (Case Study: Kabootar Khaneh-Rafsanjan). *Iranian Journal of Forest*, 16(2): 243-256 (In Persian with English summary).
- Taghavizad, R., Badkoubbeh, S.M. and Ghorbannejad, M., 2024. Investigating the effects of air pollution on anatomical characteristics of two species *Ligustrum lucidum* W.T.Aiton and *Euonymus japonicas* Thunb. *Iranian Journal of Forest*, 16(3): 405-417 (In Persian with English summary).
- Unsworth, M.H. and Black, V.J., 1981. Stomatal responses to pollutants: 188-200. In: Jarvis, P.G. and Mansfield, T.A. (Eds.). *Stomatal Physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 295p.
- Yan, X., Li, P., Wu, X., Wang, J., Wang, Z., Xu, J., ... and Du, E., 2025. Variations in the leaf economics spectrum, anatomical, ultrastructural, and stomatal traits of five tree species in the urban-rural air pollution environment. *Journal of Environmental Sciences*, 155: 177-192.