



University of Tehran

Detection of ironwood (*Parrotia persica*) trees tolerance to air pollution using anatomical, physiological and biochemical leaf traits

Zahra Boor¹ | Kambiz Taheri Abkenar^{2*} | Mohsen Mohammadi Galangash³ | Seyed Mohammad Moein Sadeghi⁴

1. Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Guilan University, Sowmeih Sara, Iran.

E-mail: zahraboor@webmail.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Guilan University, Sowmeih Sara, Iran.

E-mail: taherikambiz@guilan.ac.ir

3. Department of environmental science and engineering faculty of natural resources, university of Guilan Sowmeih-Sara, Iran.

E-mail: m_mohammadi@guilan.ac.ir

4. School of Forest, Fisheries, and Geomatics Sciences, University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA.

E-mail: s.sadeghi@ufl.edu

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 04 November 2024

Revised: 20 January 2025

Accepted: 31 January 2025

Published online: 05 March 2025

Keywords:

Air pollution tolerance index,

Chamestan industrial park,

Proline,

Relative water content.

We identified several pollution-responsive variables, including ascorbic acid, glutathione, pH, total chlorophyll, carotenoids, relative water content, total soluble sugar, proline, protein, and anatomical parameters, while also determining the air pollution tolerance index (APTI) of *Parrotia persica* around Chamestan Industrial Park in Mazandaran Province, Iran. Three polluted stations at varying distances from the industrial park (10, 400, and 800 m) and a control station in a clean area were selected to assess the effects of pollution. The results indicated that the relative water content (RWC) of *P. persica* remained unchanged under pollution exposure. However, total chlorophyll content and pH decreased in leaves collected from the industrial site compared to the control. In contrast, proline, soluble sugar, and protein levels were higher in samples from the industrial site than in those from the control station. Carotenoid content decreased in *P. persica* under air pollution exposure. The findings also showed that air pollution led to the accumulation of ascorbic acid and glutathione in the leaves. Air pollution reduced stomatal size while increasing stomatal density in *P. persica* leaves. Based on APTI values, *P. persica* was classified as moderately tolerant to air pollution. Additionally, the adverse effects of air pollution were more pronounced at stations closer to the industrial park (stations one and two) than at the third station. Overall, *P. persica* can be considered a tolerant species suitable for industrial areas.

Cite this article: Boor, Z., Taheri Abkenar, K., Mohammadi Galangash, M., Sadeghi, S.M.M. (2025). Detection of ironwood (*Parrotia persica*) trees tolerance to air pollution using anatomical, physiological and biochemical leaf traits. *Journal of Forest and Wood Products*, 77 (4), 407-421. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2025.388038.1325>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2025.388038.1325>



تعیین مقاومت درختان انجیلی به آلودگی هوا با استفاده از صفات آناتومیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی برگ

زهرا بور^۱ | کامبیز طاهری آبکنار^{۲*} | محسن محمدی گلنگش^۳ | سید محمد معین صادقی^۴

۱. گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: zahrabor@webmail.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: taherikambiz@guilan.ac.ir
۳. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: m_mohammadi@guilan.ac.ir
۴. دانشکده جنگل، شیلات و ژئوماتیک، دانشگاه فلوریدا، گینزویل، آمریکا. رایانامه: s.sadeghi@ufl.edu

چکیده

اطلاعات مقاله

تحقیق حاضر به منظور شناسایی برخی از متغیرهای پاسخ‌دهنده به آلودگی هوا مانند اسید اسکوربیک، گلوکاتینون، pH، کلروفیل کل، کاروتنوئید، محتوای نسبی آب، کل قند محلول، پرولین، پروتئین و پارامترهای آناتومیکی، به علاوه شاخص مقاومت به آلودگی هوای گونه انجیلی در اطراف شهرک صنعتی چمستان در استان مازندران بود. برای این مطالعه سه ایستگاه آلوده به فواصل مختلف از شهرک صنعتی (۱۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ متر) و یک ایستگاه به‌عنوان شاهد با فاصله دورتر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که محتوای رطوبت نسبی گونه انجیلی تحت تأثیر آلودگی تغییر معنی‌داری نشان نداد. کاهش محتوای کلروفیل کل و pH در نمونه‌های برگ گیاهان منتخب جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های اطراف شهرک صنعتی در مقایسه با شاهد مشاهده شد، درحالی‌که پرولین، قند محلول و پروتئین در نمونه‌های گیاهی ایستگاه‌های صنعتی نسبت به شاهد بیشتر بود. محتوای کاروتنوئید در گونه انجیلی تحت تأثیر آلودگی هوا کاهش معنی‌داری نشان داد. آلودگی هوا باعث تجمع محتوای اسید اسکوربیک و گلوکاتینون در برگ گونه انجیلی شد. در گونه انجیلی آلودگی هوا باعث کاهش اندازه روزه و افزایش تراکم آن شد. براساس مقادیر شاخص تحمل آلودگی هوا (APTI)، انجیلی گونه‌ای نسبتاً مقاوم به آلودگی هوا معرفی گردید. همچنین اثرات نامطلوب آلودگی هوا در ایستگاه‌های نزدیک‌تر به محدوده شهرک صنعتی یعنی ایستگاه اول و دوم نسبت به ایستگاه سوم مخرب‌تر بوده است. در مجموع، با توجه به یافته‌های به‌دست آمده می‌توان انجیلی را جزء گونه‌های مقاوم در مناطق صنعتی به‌شمار آورد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

کلیدواژه:

پرولین،
شاخص مقاومت به آلودگی هوا،
شهرک صنعتی چمستان،
محتوای رطوبت نسبی.

استناد: بور، زهرا، طاهری آبکنار، کامبیز، محمدی گلنگش؛ محسن، صادقی؛ سید محمد معین (۱۴۰۳). تعیین مقاومت درختان انجیلی به آلودگی هوا با استفاده از صفات آناتومیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی برگ. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۷ (۴)، ۴۲۱-۴۰۷. DOI: <https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.388038.1325>



۱. مقدمه

آلودگی هوا تهدیدی مهم برای مناطق شهری در کشورهای در حال توسعه است. صنعتی شدن کنترل نشده و شهرنشینی سریع به دلیل افزایش انتشار آلاینده‌ها و فقدان مقررات سخت‌گیرانه محیط‌زیستی باعث ایجاد مشکلات جدی می‌شود. آلاینده‌های هوای محیط، تهدیدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست هستند. عوامل اصلی آلودگی شامل رشد شدید جمعیت و صنعتی شدن است که منجر به سطوح بالاتر فلزات سنگین در اتمسفر و خاک می‌شوند [۱]. زمانی که تعداد زیادی ذرات معلق در هوا و مواد شیمیایی در جو در مقایسه با شرایط طبیعی وجود داشته باشد، هوا آلوده می‌شود. احتراق سوخت‌ها، گازهای گلخانه‌ای خودروها و عملیات صنعتی، گازهای سمی مانند دی‌اکسید گوگرد (NO_2)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، دی‌اکسید کربن (CO_2)، مونوکسید کربن (CO)، فلورید هیدروژن (HF) و ذرات (PM) را در جو آزاد می‌کنند. افزایش انتشار بیشتر آلاینده‌ها در چند سال اخیر با افزایش سالانه ۰/۵ تا ۲ درصد، بر موجودات زنده در سراسر جهان تأثیر منفی گذاشته است [۲]. پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش ۴۰ تا ۶۰ درصدی میزان انتشار تا سال ۲۱۰۰ است. منابع آلودگی از واحد کوچک سیگار و منابع طبیعی مانند فعالیت‌های آتشفشانی گرفته تا حجم زیاد انتشار از موتورهای خودروها و فعالیت‌های صنعتی متفاوت است. آلودگی هوا اکنون در کشورهای در حال توسعه در نتیجه فعالیت‌های صنعتی و همچنین افزایش مقدار منابع انتشار مانند وسایل نقلیه نامناسب پدیدار شده است [۳].

در ایران به‌عنوان یک کشور در حال توسعه، میزان آلاینده‌های هوا از ابتدای صنعتی شدن در دهه ۱۹۷۰ به تدریج افزایش یافته است، اما در برخی از کلان‌شهرها به حد بسیار زیان‌باری رسیده است. ایران سومین کشور آلوده جهان است که خسارات اقتصادی ناشی از این آلودگی سالانه ۱۶ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود. در واقع، چهار شهر از ده‌شهر دارای بالاترین میزان آلودگی هوای دنیا در ایران هستند. منابع کلیدی آلودگی هوا در ایران حمل و نقل، استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، ناوگان شهری قدیمی خودروهای بنزینی و دیزلی، منابع صنعتی در داخل و نزدیک به مرزهای شهر و گرد و غبار طبیعی است.

سطح بالای آلاینده‌ها نگرانی‌های عمده‌ای را در درجه اول به دلیل تأثیر منفی بالقوه بر سلامت انسان و همچنین پوشش گیاهی و سایر موجودات زنده ایجاد کرده است. آلودگی هوا تهدیدی جدی برای جنگل‌ها هستند و موجب تغییر مؤلفه‌های جنگل مانند ترسیب کربن، نرخ فتوسنتز و تعرق، تنوع زیستی، ترکیب گونه‌ها و غیره شده که پس از آن فرآیندهای محیطی را تغییر می‌دهند. جنگل به‌خودی خود یک اکوسیستم کامل است که فیبر، سوخت، غذا، چوب و سایر محصولات غیر چوبی، آب شیرین، خدمات اکوسیستمی مانند افزایش کیفیت هوا، تعدیل آب و هوا، کنترل فرسایش، گرده افشانی و تنظیم خطرات طبیعی را فراهم می‌کند. عامل استرس‌زای آلودگی هوا این پتانسیل را دارد که مدیریت محصولات جنگلی و عملکرد اکوسیستم را تغییر دهد [۴].

هر اکوسیستمی ظرفیت بافری برای مقابله با شرایط نامطلوب محیطی دارد. زمانی که تخلیه آلاینده‌ها از محدودیت‌های ظرفیت بافری هر اکوسیستمی فراتر رود، نمی‌تواند ساختار و عملکرد طبیعی خود را حفظ کند. هر گونه اکوسیستم آسیب‌دیده تنها می‌تواند با کاهش آلاینده‌ها در منبع یا با استقرار گونه‌های گیاهی متحمل در اکوسیستم بازسازی شود. آلودگی هوا از طریق از بین بردن گونه‌های حساس یا جایگزینی آن‌ها توسط گونه‌های مقاوم به آلودگی سبب اختلال در ترکیب گونه‌های گیاهی، عملکرد و ساختار اکوسیستم‌ها می‌شود و در دراز مدت می‌تواند بر سطح ژن‌ها و تنوع ژنتیکی گونه‌های مختلف نیز تأثیرگذار باشد. گیاهانی که در معرض آلودگی محیطی نامطلوب قرار می‌گیرند از طریق تنظیمات مورفولوژیکی، آناتومیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مناسب برای زنده‌مانی در شرایط تنش واکنش نشان می‌دهند [۵]. مطالعات نشان داده است که گونه‌های گیاهی رشد یافته در مناطق شهری به‌شدت تحت تأثیر آلاینده‌های مختلف قرار دارند که به‌صورت مستقیم از طریق اندام هوایی به‌ویژه برگ و یا به‌طور غیرمستقیم از طریق اسیدی شدن خاک و جذب توسط ریشه‌ها سبب آسیب به گیاه می‌شوند [۶]. فعالیت‌های زیاد کارخانه‌های صنعتی سبب آلودگی‌های محیط‌زیستی شده و آسیب‌های جدی بر بافت‌های گیاهی، اختلالات نکروری در اندام رویشی، صدمه به جوانه‌زنی بذور و رشد نهال‌ها، آسیب به برگ گیاهان و محدود کردن عملکرد روزه‌ها و به‌دنبال آن کاهش هدایت روزه‌ای گیاه، نرخ فتوسنتز، تعرق و تجزیه رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه می‌شود که در نهایت، منجر به پلاسمولیز سلول و مرگ کل گیاه می‌شود [۷]. تنش آلودگی هوا فرآیندهای بیوشیمیایی گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و تحمل گیاه را به دیگر تنش‌های محیطی نیز کاهش می‌دهد. سطوح کلروفیل a و b، اسید اسکوربیک، کاروتنوئیدها، محتوای نسبی آب برگ و شاخص

تحمل آلودگی تحت تأثیر آلاینده‌های هوا به شدت کاهش می‌یابد [۸]. تأثیری که می‌تواند توسط آلاینده‌ها ایجاد شود یا در حال ایجاد است را می‌توان با استفاده کارآمد از تکنیک‌های مناسب در مدیریت محیط‌زیست تا حد قابل توجهی کاهش داد. واکنش گیاهان به آلاینده‌های هوا ممکن است بسیار متفاوت باشد، به طوری که برخی از گیاهان در شرایط محیطی یکسان مقاوم و برخی حساس هستند. این تفاوت‌ها به غلظت آلاینده‌ها و توزیع زمانی، منشاء ژنتیکی و فعالیت فیزیولوژیکی گیاهان، عوامل هواشناسی، وضعیت تغذیه‌ای گیاه و سایر عوامل محیطی بستگی دارد [۸].

درختان به طور کلی به‌عنوان گونه‌های شاخص زیستی طبیعی برای نظارت بر کیفیت هوا به‌ویژه در مناطق شهری و صنعتی عمل می‌کنند و از اثرات مضر فلزات سمی جلوگیری می‌کنند. به‌عنوان یکی از حساس‌ترین بخش‌ها، برگ‌ها به‌عنوان شاخص خوبی در ارزیابی آلودگی هوا استفاده می‌شوند. همان‌طور که اشاره شد آلودگی باعث تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی زیادی در گیاهان می‌شود. با مطالعه این پارامترها، می‌توان مقاومت گیاهان را در برابر آلاینده‌ها تخمین زد. برای به‌دست آوردن تصویر واضحی از اثرات آلودگی بر گیاهان، ارزیابی یک پارامتر واحد قابل اعتماد نیست. بنابراین، شاخص تحمل آلودگی هوا (APTI)^۱ ابزاری یکپارچه برای ارزیابی واکنش گیاهان به طیف متنوعی از آلاینده‌ها از طریق پارامترهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی است. بنابراین، این ابزار قابل اعتماد می‌تواند به‌طور مؤثر برای شناسایی گونه‌های گیاهی شاخص (متحمل و حساس) مورد استفاده قرار گیرد که در محیط آلوده رشد می‌کنند. APTI با چهار پارامتر بیوشیمیایی مانند اسید اسکوربیک، محتوای کلروفیل کل، pH عصا برگ و محتوای نسبی آب محاسبه می‌شود. گونه‌هایی که امتیاز APTI بالاتری دارند، به‌عنوان مقاوم‌ترین گونه‌ها در برابر محیط‌های آلوده محسوب می‌شوند و برای توسعه کمربند سبز ترجیح داده می‌شوند و گونه‌هایی که امتیاز APTI پایینی دارند حساس‌ترین گونه‌ها هستند و به‌عنوان گونه‌های زیستی شاخص آلودگی هوا عمل می‌کنند [۹].

انجیلی (*Parrotia persica*) یک درخت خزان‌کننده است که به‌عنوان گونه بومی در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران و آذربایجان شناخته شده است. این گونه، تنش‌های مختلف از جمله گرما، باد، یخبندان، خشکی و آلودگی هوا را تحمل کرده و سختی زمستانی آن تا ۲۸/۹- درجه سلسیوس می‌باشد که این امر انجیلی را به یک گونه خیلی مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی آینده تبدیل می‌کند. به‌علاوه، ویژگی‌های زینتی مانند شکوفه‌های قبل از برگ، رنگ برگ‌ها در فصل خزان و مقاوم بودن در برابر حمله آفات این گونه را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای کاشت در فضای سبز شهری و خیابان‌ها معرفی می‌کند [۱۰].

اگرچه پاسخ گونه‌های مختلف گیاهی به تنش آلودگی هوا به‌خوبی شناخته شده است، اما اطلاعات زیادی در ارتباط با تأثیر فعالیت کارخانه‌های صنعتی مستقر در شهرک‌های صنعتی حاشیه جنگل‌ها به‌خصوص جنگل‌های طبیعی شمال ایران صورت نگرفته است و تاکنون تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی حاصل از فعالیت‌های صنعتی روی گیاهان در رویشگاه‌های طبیعی به‌ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین، پژوهش حاضر، به مطالعه و ارزیابی تأثیر کارخانه‌های صنعتی مستقر در شهرک صنعتی چمستان با اندازه‌گیری مشخصه‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و آناتومیکی گونه انجیلی به‌عنوان یکی از گونه‌های غالب اطراف این منابع آلاینده پرداخته است. علاوه بر این، شاخص تحمل آلودگی هوا نیز برای آگاهی از سطوح تحمل گونه‌های درختی برای یافتن مناسب بودن گونه‌های درختی برای توسعه کمربند سبز در برنامه‌های جنگلکاری محاسبه شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در جنگل‌های هیرکانی اطراف شهرک صنعتی چمستان در استان مازندران انجام گرفت. شهرک صنعتی چمستان واقع در کیلومتر ۱۵ جاده نور-چمستان و در زمینی به‌وسعت ۳۶ هکتار در ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه طول شرقی و ۵۲ درجه و ۰۵ دقیقه عرض شمالی و در ارتفاع ۹۵ متری از سطح دریاهای آزاد قرار دارد. صنایع اصلی مستقر در شهرک صنعتی چمستان شامل صنایع برق و الکترونیک، غذایی، فلزی، شیمیایی، سلولزی و نساجی می‌باشد. شیب منطقه بین صفر تا ۳ درصد متغیر بوده و دارای سطحی کاملاً هموار است. پوشش گیاهی اطراف شهرک صنعتی که جزء جنگل‌های هیرکانی ایران محسوب می‌شود،

^۱Air Pollution Tolerance Index

مشمول بر تعدادی درختان پهن برگ به همراه برخی درختچه‌ها و رستنی‌های علفی است که در مجموع از تنوع گونه‌ای خوبی هم برخوردار می‌باشند. از نظر وضعیت فعلی پوشش جنگلی و کیفیت درختان با توجه به آشفستگی‌های به‌وجود آمده در سنوات اخیر، اکثر درختان بلوط، انجیلی و ممرز غالب هستند. منطقه مورد مطالعه به‌طور عمده متشکل از تیپ‌های آمیخته انجیلی ممرز، ممرز انجیلی به‌همراه بلوط و تک پایه‌های کلهو، توت، شیردار، توسکا، اوجا و لرگ می‌باشد. جهت باد غالب از سمت شمال شرقی، میانگین حداقل دما در سردترین ماه سال (بهمن ماه) ۲/۲ درجه سلسیوس، میانگین حداکثر دما در گرم‌ترین ماه سال (مرداد ماه) ۲۹ درجه سلسیوس و متوسط دمای سالیانه ۱۶/۳ درجه سلسیوس می‌باشد و میانگین بارندگی سالانه ۸۶۵ میلی‌متر است.

۲-۲. نمونه‌برداری

به‌منظور تعیین نقاط نمونه‌برداری ابتدا راه‌های ارتباطی، موقعیت کارخانه و کاربری‌های اطراف آن با استفاده از نرم‌افزار Google Earth بررسی شد. نظر به جهت باد غالب منطقه و احتمال پراکنش آلاینده‌های کارخانه‌ها، چهار ایستگاه به فاصله مشخص از منبع آلودگی انتخاب شد. ایستگاه اول به فاصله ۱۰ متری از شهرک، ایستگاه دوم به ۴۰۰ متری از شهرک، ایستگاه سوم به فاصله ۸۰۰ متری از شهرک و ایستگاه چهارم در نقطه‌ای دورتر از منابع آلاینده با جوامع گیاهی و مشخصه‌های فیزیوگرافیکی و اداپتیکی یکسان ولی فاقد آلودگی به‌عنوان شاهد، انتخاب شد. در هر یک از رویشگاه‌ها، گونه درختی انجیلی انتخاب و تأثیر آلودگی‌های ناشی از فعالیت کارخانه‌های شهرک صنعتی چمستان بر فرآیندهای فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و آناتومیکی گیاهان مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، با استفاده از دانش اولیه، تغییرات مکانی و زمانی مواد آلاینده، زمان و مکان انجام نمونه‌برداری مشخص شد. نمونه‌برداری به روش انتخابی انجام شد و در هر رویشگاه سه درخت انجیلی با صفات حتی‌الامکان هم قطر، سالم، دارای تاج متقارن و بدون آفت انتخاب گردید. نمونه‌برداری از برگ درختان در شهریور و مهر ماه ۱۴۰۰ انجام گرفت. نمونه‌های برگ از هر پایه در سه مقطع ارتفاعی و از شاخه‌های بیرونی برداشت شد. نمونه‌های برگ در درون کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و سریعاً به آزمایشگاه منتقل و در دمای ۴- و ۲۰- درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شدند.

۲-۳. پارامترهای مورد اندازه‌گیری

۲-۳-۱. پارامترهای فیزیولوژی

۲-۳-۱-۱. محتوی رطوبت نسبی برگ (RWC)^۱

در مرحله اول، وزن تر نمونه برگ (FW) اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در دمای اتاق، داخل آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت، غوطه‌ور شدند و پس از این زمان، وزن آماس (TW) ثبت شد. در نهایت، وزن خشک نمونه‌ها (DW) پس از قرار گرفتن آنها درون آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت محاسبه شد. درصد رطوبت نسبی برگ از طریق رابطه ۱ محاسبه شد:

$$RWC = ((FW-DW)/(TW-DW)) \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

۲-۳-۱-۲. pH برگ

مقداری از نمونه برگ (۵ گرم) خرد و در ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر دیونیزه شده، همگن شد. pH سوسپانسیون برگ با استفاده از pH متر (YSI, 1200) پس از فیلتر کردن نمونه، اندازه‌گیری شد.

۲-۳-۲. پارامترهای بیوشیمیایی برگ

۲-۳-۲-۱. محتوای رنگدانه‌ای

در پایان آزمایش، نمونه‌های برگ برای هر تیمار از سه برگ کاملاً توسعه‌یافته گرفته شده و در استون ۸۰ درصد حل شدند. جهت اندازه‌گیری مقادیر کلروفیل a، b و کل و همچنین محتوی کارتنوئید بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر از روش Arnon (۱۹۴۹) استفاده شد [۱۱].

^۱Relative water content

۲-۲-۳-۲. محتوای پرولین، پروتئین و قندهای محلول

به‌منظور اندازه‌گیری پرولین، در پایان آزمایش، ۰/۵ گرم از نمونه‌برگ تازه در ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد به‌وسیلهٔ هاون هموژن شد و عصارهٔ حاصل به‌مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. به ۲ میلی‌لیتر از عصارهٔ حاصل، ۲ میلی‌لیتر اسید-استیک و ۲ میلی‌لیتر اسیدناین هیدرین (شامل: ۰/۲۵ گرم ناین‌هیدرین، ۳۰ میلی‌لیتر اسیداستیک و ۲۰ میلی‌لیتر اسیدارتوسفریک ۶ مولار) اضافه شد. محلول حاصل به‌مدت یک ساعت در حمام آب با دمای ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس قرار داده شد. سپس لوله‌های آزمایش در داخل بستر یخی قرار داده و پس از سرد شدن ۴ میلی‌لیتر تولوئن به هر لوله اضافه شد. غلظت پرولین نمونه‌ها در تولوئن با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر و در نهایت با توجه به منحنی حاصل از غلظت‌های مختلف پرولین، میزان پرولین نمونه (برحسب گرم وزن تر) محاسبه شد [۱۲].

محتوای پروتئین‌های محلول کل با استفاده از روش Bradford (۱۹۷۶) اندازه‌گیری شد. برای سنجش مقدار پروتئین، ابتدا پروتئین‌ها از نمونه‌های گیاهی در دمای ۴-۰ درجهٔ سلسیوس استخراج شدند. یک گرم بافت تر در یک هاون چینی محتوی سه میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با pH= ۷/۲ سائیده شد. عصارهٔ حاصل به‌مدت ۱۵ دقیقه در سانتریفیوژ یخچال‌دار در دور ۱۴۰۰۰ و دمای ۴ درجهٔ سلسیوس قرار گرفت. از محلول رویی برای سنجش پروتئین استفاده گردید. به این منظور به لوله‌های آزمایش مقدار ۰/۱ میلی‌لیتر عصارهٔ پروتئینی و پنج میلی‌لیتر معرف بیوره افزوده و سریعاً ورتکس شد. پس از دو دقیقه و قبل از یک ساعت جذب، نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۹۵ نانومتر خوانده شد و غلظت پروتئین با استفاده از منحنی استاندارد آلبومین گاوی محاسبه و برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه گردید [۱۳].

اندازه‌گیری قندهای محلول در اتانول ۸۰ درصد مطابق با روش Irigoyen و همکاران (۱۹۹۲) انجام گرفت. مقدار ۲۰۰ میکرولیتر عصاره الکلی با سه میلی‌لیتر آنترون تازه تهیه شده مخلوط گردید. این محلول، ۱۰ دقیقه در حمام آب گرم قرار داده شد تا واکنش انجام و رنگی شود. سپس میزان جذب آن با اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر قرائت و مقدار قندهای محلول محاسبه گردید. گلوکز به‌عنوان استاندارد استفاده شد [۱۴].

۲-۲-۳-۲. آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی

نمونه‌های تازه برگ بلوط در یخ ۶ درصد TCA (w/v) (1/12, w/v) سائیده شد و سپس برای ۲۰ دقیقه با دور ۲۰۰۰۰ سانتریفیوژ گردید. مقدار اسید آسکوربیک با استفاده از روش Kampfenkel و همکاران (۱۹۹۵) از محلول رویی تعیین شد [۱۵]. محتوای گلوکاتایون کل نیز از محلول رویی مطابق با روش Sgherri و Navari- Izzo (۱۹۹۵) اندازه‌گیری شد [۱۶].

۲-۳-۲. شاخص مقاومت به آلودگی هوا (APTI)

در پایان با استفاده از پارامترهای فوق شاخص مقاومت به آلودگی هوا براساس رابطهٔ ۲ محاسبه گردید:

$$APTI = \frac{A(T+P)+R}{10} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطهٔ فوق:

A = اسکوربیک اسید (میلی گرم بر گرم)

T = کلروفیل کل (میلی گرم بر گرم)

pH = P

R = رطوبت نسبی برگ

مقدار شاخص مقاومت به آلودگی، توسط Bharti و همکاران (۲۰۱۸) به سه طبقه تقسیم‌بندی شده است: [۱۷] (جدول ۱).

۲-۳-۲. پارامترهای آناتومیکی

به‌منظور مطالعهٔ پارامترهای روزنه، نمونه‌های برگ بعد از شستشو با آب مقطر با استفاده از اسکالپل از سطح پشتی برگ برش‌های

نازک از اپیدرم برگ تهیه شد و سپس با هدف از بین بردن کلروفیل یا سبزینه به مدت ۵ دقیقه درون آب ژاول قرار گرفتند. پس از این زمان، مشخصات روزه‌ها شامل طول، عرض، مساحت و تراکم روزه پس از عکس برداری توسط میکروسکوپ نوری مدل N-180، با استفاده نرم افزار Image Tools با دقت ۰/۰۱ میکرومتر اندازه‌گیری شدند.

جدول ۱. طبقه‌بندی گونه‌های گیاهی براساس شاخص مقاومت به آلودگی

واکنش گیاه	مقدار شاخص مقاومت به آلودگی	ردیف
حساس	۱-۱۱	۱
متوسط	۱۲-۱۶	۲
مقاوم	۱۷ ≤	۳

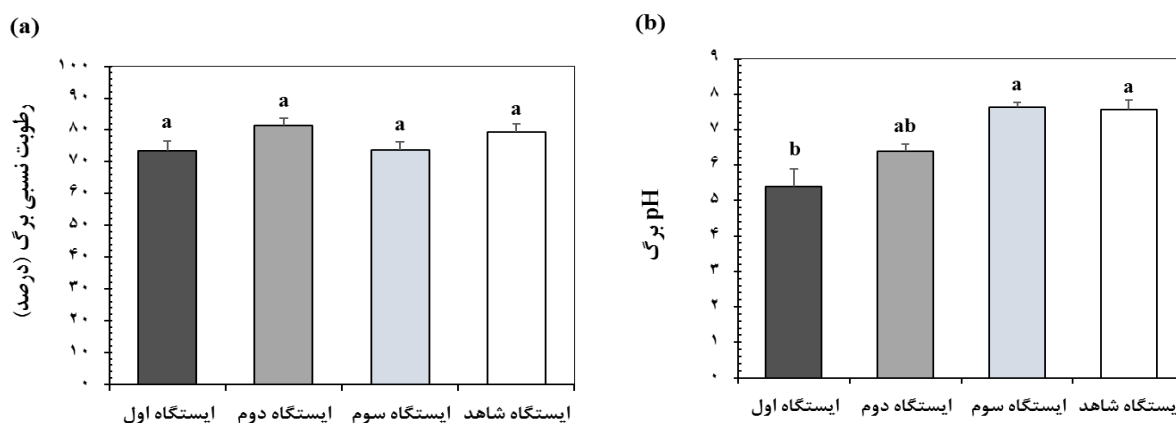
۲-۴. تجزیه و تحلیل آماری

به منظور بررسی نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌های کمی به ترتیب از آزمون‌های شاپیرو ویلک^۱ و لون^۲ استفاده شد. تعیین اختلاف آماری داده‌ها با استفاده از آزمون تجزیه واریانس یک طرفه^۳ و مقایسه میانگین‌ها با آزمون Tukey در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ آنالیز شد. تمام آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۶ صورت گرفت. در صورت نرمال نبودن از آزمون‌های ناپارامتریک معادل استفاده می‌شود.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. پارامترهای فیزیولوژیکی

نتایج نشان داد که در گونه انجیلی محتوای رطوبت نسبی برگ درختان تحت تاثیر آلودگی هوا تغییر معنی‌داری نشان نداد (شکل ۱). در شرایط تنش، زمانی که میزان تعرق زیاد است، با حفظ محتوای آب برگ، گیاهان می‌توانند نسبت به محیط نامساعد مقاومت کنند. یکی از پارامترهای نشان‌دهنده وضعیت آبی گیاه محتوای رطوبت نسبی است. این پارامتر اندازه‌گیری مقدار آبی است که یک گیاه در زمانی که قادر به جذب بیشتر آب نباشد، در خود دارد و این حالت به عنوان اشباع کامل شناخته می‌شود. رطوبت نسبی زیاد در برگ گیاهان، عملکردهای فیزیولوژیکی گیاهان را تحت شرایط تنش تنظیم می‌کند، به ویژه زمانی که گیاهان در معرض سطوح بالایی از آلاینده‌های موجود در هوا قرار می‌گیرند [۱۸].



شکل ۱. محتوای رطوبت نسبی و pH برگ در گونه انجیلی تحت تاثیر آلودگی هوا در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

داده‌ها نشان‌دهنده مقدار میانگین \pm خطای معیار است ($n=6$). حروف بالای ستون‌ها نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون Tukey HSD می‌باشد.

¹Shapiro-Wilk's

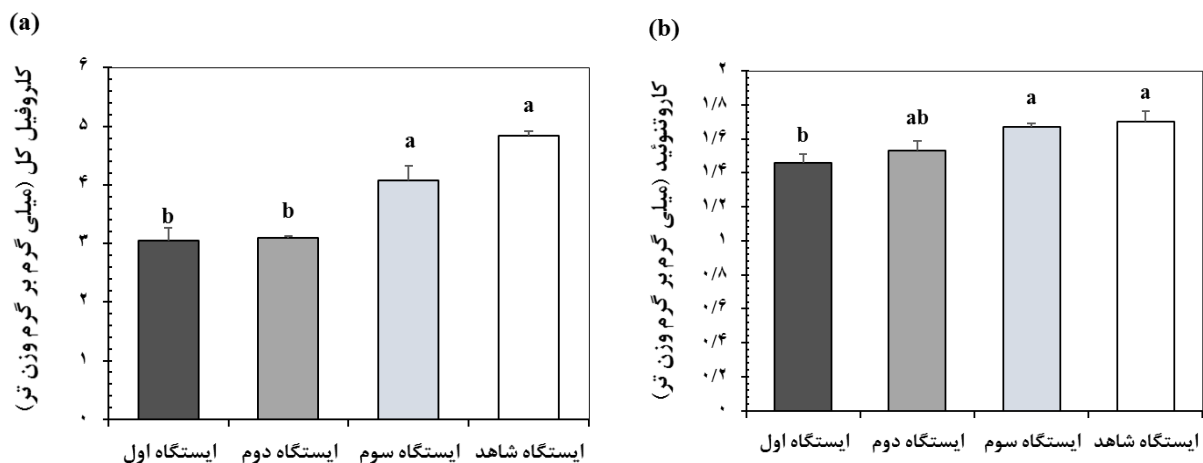
²Levene's test

³One-way ANOVA

مقدار pH عصاره برگ انجیلی بین ۵/۴ تا ۷/۶۳ متغیر بود. گونه‌های گیاهی جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های صنعتی اول و دوم در هر دو گونه pH اسیدی نشان دادند، در حالی که در ایستگاه سوم و شاهد pH عصاره برگ بالاتر از ۷ بود (شکل ۱). نقش pH این است که در تنظیم حساسیت گیاه به آلودگی شرکت می‌کند. وجود آلاینده‌های اسیدی ناشی از صنایع و وسایل نقلیه، به عنوان عامل اصلی کاهش pH عصاره برگ در تحقیقات بسیاری گزارش شده است [۱۹]. Singh و Verma (۲۰۰۶) نشان دادند که تغییرات در pH برگ ممکن است به دلیل تأثیر آلودگی هوا بر حساسیت روزنه‌ها باشد [۲۰]. محققانی مانند Swami و همکاران (۲۰۰۴) بر این باور بودند که وقتی آلاینده‌های گازی هوا در شیره سلولی منتشر می‌شوند، به رادیکال‌های اسیدی تبدیل می‌شوند که pH اسیدی مشاهده شده در مطالعه حاضر را توضیح می‌دهند [۲۱]. در مجموع، برگ‌هایی که pH پایین‌تر دارند، بیشتر تحت تأثیر آلاینده‌های جوی هستند، در حالی که آنهایی که pH بالاتری دارند نسبت به آلاینده‌ها تحمل بیشتری دارند.

۳-۲. پارامترهای بیوشیمیایی

اندازه‌گیری کلروفیل ابزار مهمی برای ارزیابی اثرات آلاینده‌های هوا روی گیاهان است، زیرا نقش مهمی در متابولیسم گیاه ایفا می‌کند و هرگونه کاهش در محتوای کلروفیل به‌طور مستقیم با رشد گیاه مطابقت دارد. محتوای کلروفیل گونه انجیلی تحت تأثیر آلودگی هوا تغییر معنی‌داری نشان داد. بیشترین محتوای کلروفیل کل در درختان موجود در ایستگاه شاهد بود و کمترین مقدار در درختان موجود در ایستگاه اول و دوم اندازه‌گیری شد. به علاوه، بین محتوای کلروفیل کل ایستگاه شاهد با ایستگاه سوم تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۲). این نتایج با تحقیقات قبلی مطابقت دارد که در آن محققان، کاهش محتوای کلروفیل بسیاری از گیاهان از جمله *Ligustrum lucidum* و *Morus nigra*، *Melia azedarach*، *Nerium indicum*، *Azadirachta indica* را گزارش کرده‌اند [۲۳، ۲۲]. گیاهانی که دائماً در معرض آلاینده‌های محیطی هستند، این آلاینده‌ها را جذب، انباشته و در درون خود ذخیره می‌کنند. این آلاینده‌ها هنگامی که توسط برگ‌ها جذب می‌شوند ممکن است باعث کاهش غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی شوند که مستقیماً بر بهره‌وری گیاه تأثیر می‌گذارد. محتوای کاروتنوئید برگ درختان موجود در ایستگاه‌های شاهد و ایستگاه سوم دارای بیشترین مقدار بود و درختان موجود در ایستگاه اول دارای کمترین مقدار بودند. همچنین بین محتوای کاروتنوئید برگ درختان ایستگاه اول و دوم تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۲). کاروتنوئیدها رنگدانه‌هایی هستند که مسیر بیوسنتز آنها شبیه به کلروفیل است که از آنها در برابر اکسیداسیون نور و تنش اکسیداتیو محافظت می‌کند.



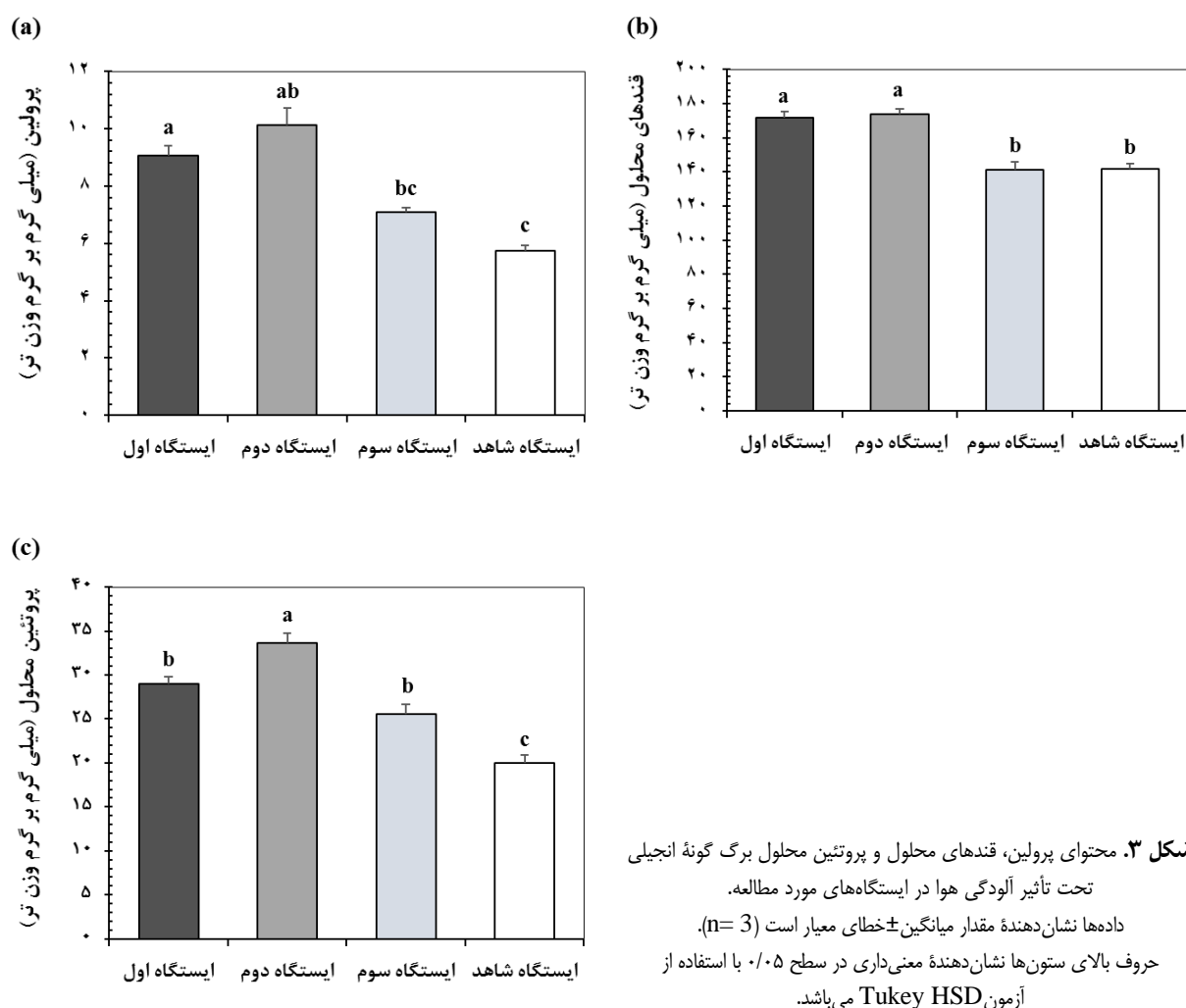
شکل ۲. محتوای کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ گونه انجیلی تحت تأثیر آلودگی هوا در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

داده‌ها نشان‌دهنده مقدار میانگین \pm خطای معیار است ($n=3$). حروف بالای ستون‌ها نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ با استفاده از آزمون Tukey HSD می‌باشد.

از این‌رو غلظت کلروفیل و کاروتنوئیدها در ساختار کلروپلاست با یکدیگر مرتبط هستند. Pal و Singh (۲۰۱۷) کاهش محتوای کاروتنوئید در گونه‌های گیاهی کنار جاده را در مقایسه با محل شاهد به دلیل ذرات گرد و غبار تجمع یافته در سطح برگ گزارش

کردند [۲۴]. نتایج به دست آمده برای گونه انجیلی همچنین با تحقیقات Tak و Kakde (۲۰۲۰) که نتیجه گرفتند آلودگی زیاد مسئول محتوای کم کاروتنوئید و در نتیجه رشد و نمو کلی گیاهان است، مطابقت دارد [۲۵].

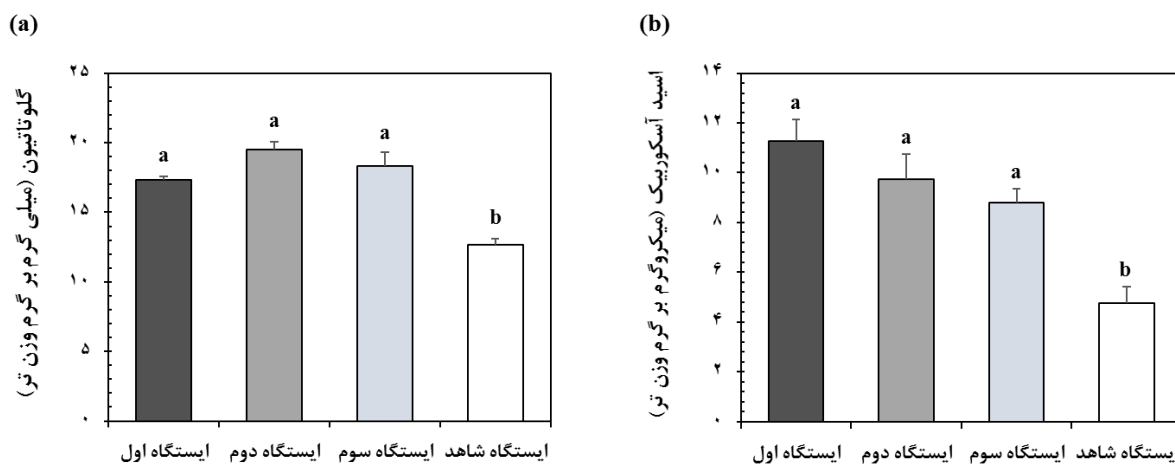
در تحقیق حاضر، محتوای پرولین، قندهای محلول و پروتئین محلول کل انباشته شده در برگ انجیلی در گیاهانی که در مناطق نزدیک تر به شهرک صنعتی رشد کرده بودند در مقایسه با گیاهان دورتر به مقدار قابل توجهی بیشتر بود (شکل ۳). بزرگی افزایش متناسب با نزدیکی به محدوده شهرک صنعتی بود که نشان می دهد این افزایش ها واکنش های تطبیقی مهم گیاهان برای غلبه بر سمیت آلاینده ها است. یافته های این تحقیق فرضیه پیشنهاد شده توسط Zouari و همکاران (۲۰۱۸) را تأیید می کند که بیان داشتند محتوای پرولین و قندهای محلول در گیاهان در پاسخ به تنش های محیطی از جمله آلودگی هوا تجمع می یابند [۲۶]. غلظت بالای پرولین با نقش آن در اسمولیز ارتباط دارد، جایی که به دلیل آب دوستی بالا، فشار اسمزی سلول ها را افزایش می دهد، تعادل آب آنها را بهبود می بخشد و از اثرات مضر تأمین آب ناکافی بر کلونیدهای سیتوپلاسمی جلوگیری می کند.



Koochak و Seyyednejad (۲۰۱۱) نیز نشان داد که در شرایط آلودگی هوا، سطح پرولین برگ های آلوده به طور قابل توجهی افزایش می یابد [۲۷]. بنابراین، پرولین در شرایط تنش تجمع می یابد و بیشتر از این دیدگاه حمایت می کند که این اسیدآمینو در مقاومت به تنش نقش دارد [۵]. غلظت قندهای محلول نشان دهنده فعالیت فیزیولوژیکی گیاهان است و نشان دهنده حساسیت گیاهان به آلودگی هوا می باشد. در تأیید نتایج این تحقیق، Bamniya و همکاران (۲۰۱۲) افزایش غلظت قندهای محلول تحت تأثیر آلاینده های هوا را در گونه *Pongamia pinnata* گزارش کردند [۲۸]. افزایش قندهای محلول در برگ گیاهان تحت شرایط

تنش می‌تواند به دلیل تبدیل نشاسته به قندهای محلول و یا کاهش مصرف آن و یا کاهش انتقال آن توسط آوند آبکش باشد. پروتئین یکی از ضروری‌ترین ترکیبات بیوشیمیایی برگی گیاهان است که برای فعالیت آنزیمی در گونه‌های گیاهی مورد نیاز است. محتوای پروتئینی گیاهان بسته به گونه‌های گیاهی و مقاومت ذاتی آن در برابر آلودگی هوا در واکنش به آلودگی هم روند افزایشی و هم کاهش را نشان می‌دهند. افزایش محتوای پروتئین کل تحت تأثیر آلاینده‌های هوا ممکن است ناشی از تحریک سنتز آمینو اسیدها باشد و نشان‌دهنده افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی در برابر تنش اکسیداتیو است [۲۹].

محتوای گلوپتایون و اسید آسکوربیک برگ گونه انجیلی تحت تأثیر آلودگی هوا پاسخ یکسانی نشان دادند، به طوری که محتوای آنها در ایستگاه‌های نزدیک به شهرک صنعتی نسبت به ایستگاه شاهد به طور معنی‌داری بیشتر بود. همچنین بین سه ایستگاه اول، دوم و سوم تفاوت معنی‌داری در محتوای گلوپتایون و اسید آسکوربیک مشاهده نشد (شکل ۴). تغییر در محتوای اسید آسکوربیک یکی از عواملی است که ممکن است مسئول پتانسیل تحمل گیاهان در برابر آلاینده‌های مختلف هوا باشد. اسید اسکوربیک این پتانسیل را دارد که اثرات مضر ناشی از آلودگی هوا را خنثی کند، بنابراین نقش مهمی در توسعه تحمل گیاهان به آلودگی هوا دارد. براساس مشاهدات قبلی، مشخص شده که افزایش محتوای اسید آسکوربیک در برگ‌های جمع‌آوری شده از مناطق آلوده نشان‌دهنده مکانیسم مقاومتی گونه‌های درختی در برابر سطوح بالای آلودگی هوا در محیط رشد آنها بود [۳۰]. آلودگی هوا همچنین باعث تجمع بیشتر گلوپتایون در برگ‌های درخت انجیلی شد. مطابق با نتایج به دست آمده در این تحقیق، Brandão و همکاران (۲۰۱۷) سطح بالای تجمع گلوپتایون برگ در درختان جنگلی را تحت تأثیر تنش آلودگی هوا گزارش کردند [۳۱]. گلوپتایون به طور کلی در برگ گونه‌های درختی تحت تأثیر آلاینده‌هایی مانند ازن افزایش یافته است. تجمع گلوپتایون نیز مانند اسید آسکوربیک ممکن است با از بین بردن آنیون سوپراکسید و سایر گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) از غشای سلولی محافظت کند و در نتیجه موجب افزایش مقاومت گیاهان شده که اهمیت آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی را در محافظت در برابر تنش اکسیداتیو نشان می‌دهد [۳۲].



شکل ۴. محتوای گلوپتایون و اسید آسکوربیک برگ گونه انجیلی تحت تأثیر آلودگی هوا در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

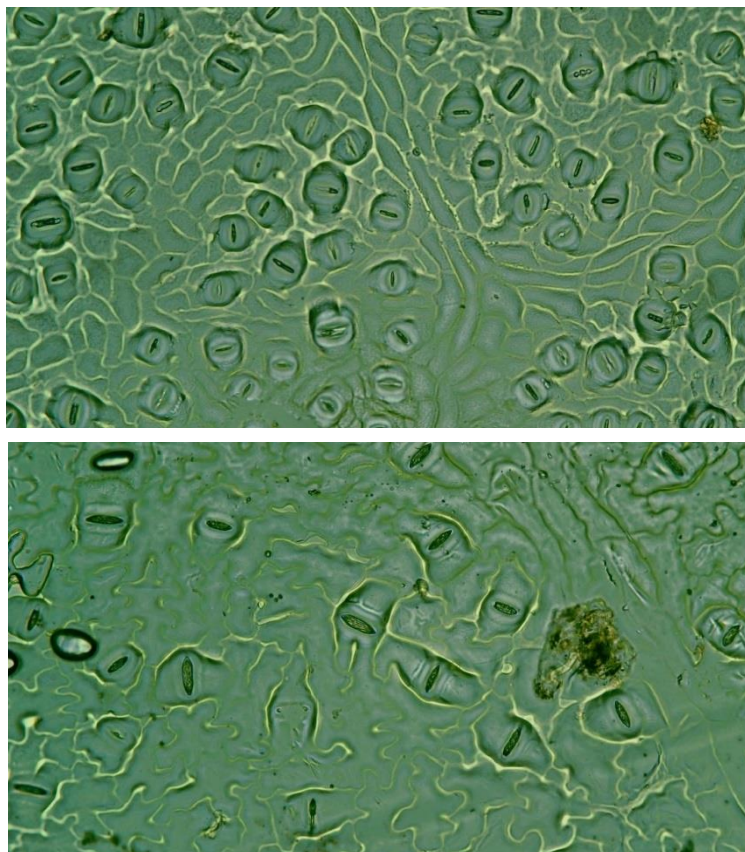
داده‌ها نشان‌دهنده مقدار میانگین \pm خطای معیار است ($n=3$). حروف بالای ستون‌ها نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون Tukey HSD می‌باشد.

۳-۳. پارامترهای آناتومیکی

تصویر میکروسکوپی روزنه‌های گونه انجیلی در بین ایستگاه‌های آلوده و شاهد در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با تصاویر مشاهده شده، می‌توان گفت که تراکم روزنه در ایستگاه‌های آلوده نسبت به ایستگاه‌های شاهد بیشتر است.

طول روزنه در ایستگاه شاهد بالاترین مقدار و در ایستگاه سوم پایین‌ترین مقدار بود، اما بین عرض روزنه برگ‌های گرفته شده از ایستگاه‌های مختلف تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. مساحت روزنه نیز در ایستگاه‌های دوم و شاهد بالاترین مقدار بود، در حالی که ایستگاه سوم پایین‌ترین مقدار را به ثبت رساند. تراکم روزنه برگ درختان جمع‌آوری شده از ایستگاه دوم دارای

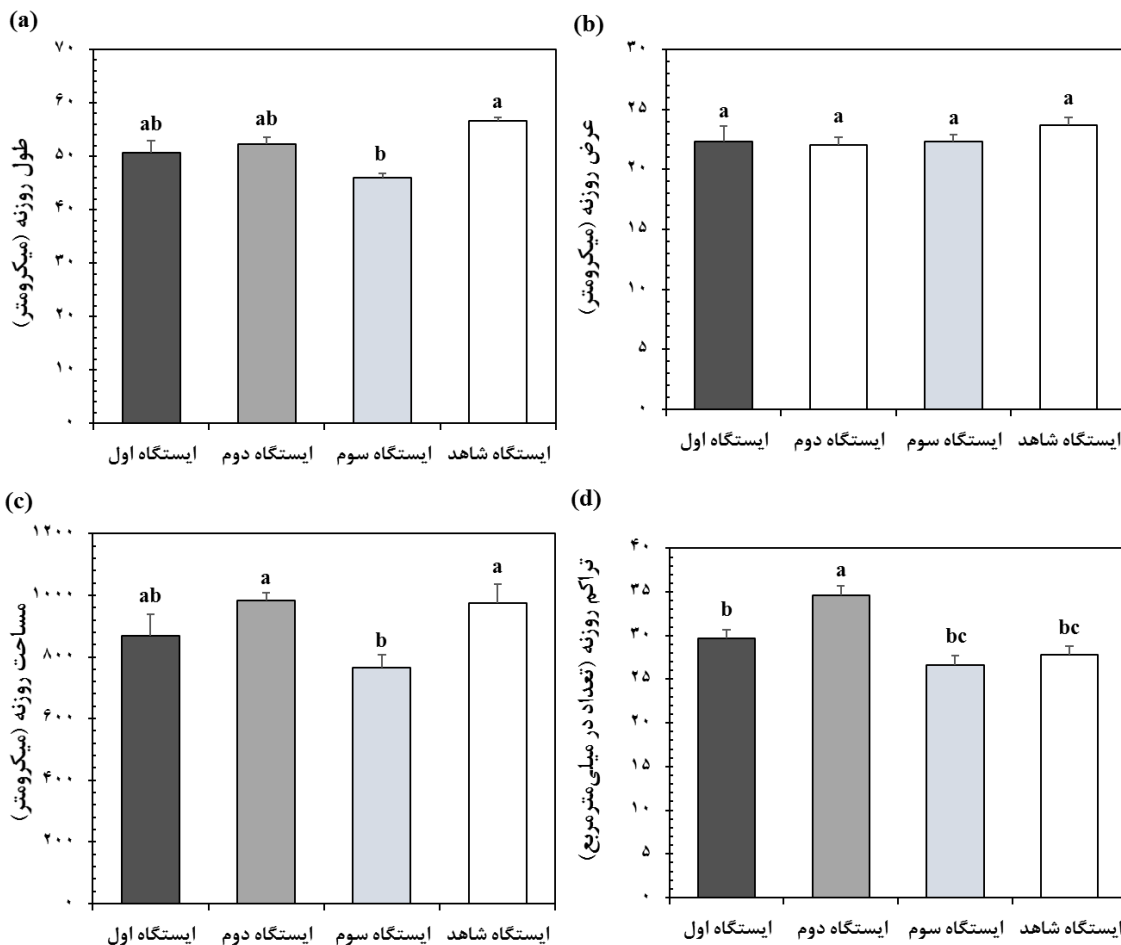
بیشترین مقدار بود و بین سایر ایستگاه‌ها تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۶). برگ‌ها به‌عنوان گیرنده‌های آلودگی هوا و جاذب‌های بیولوژیکی یا فیلترهای آلاینده‌ها عمل می‌کنند و می‌توانند به‌عنوان نشانگر واکنش‌ها به تغییر کیفیت هوا در نظر گرفته شوند. اندازه برگ، اندازه سلول‌های روزنه و اپیدرمی و اندازه سلول‌های نگهبان از جمله تغییرات عمده در برگ‌های گیاهان قرار گرفته در معرض آلودگی هوا می‌باشند. تحقیقات قبلی نشان داده است که کاهش اندازه روزنه‌ها در اثر آلودگی هوا باعث تغییر مشخصه‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان می‌شود [۳۳]. تحت تأثیر آلودگی هوا، کاهش اندازه روزنه و افزایش ضخامت برگ‌ها مشاهده شده است [۳۴]. همچنین، Kapoor (۲۰۱۴) کاهش اندازه سلول‌های اپیدرمی و روزنه‌ها و افزایش تعداد سلول‌های اپیدرمی، روزنه‌ها و تریکوم‌ها برگ درختان *Ficus Benghalensis* را تحت شرایط آلودگی SO_2 گزارش کرد [۳۵].



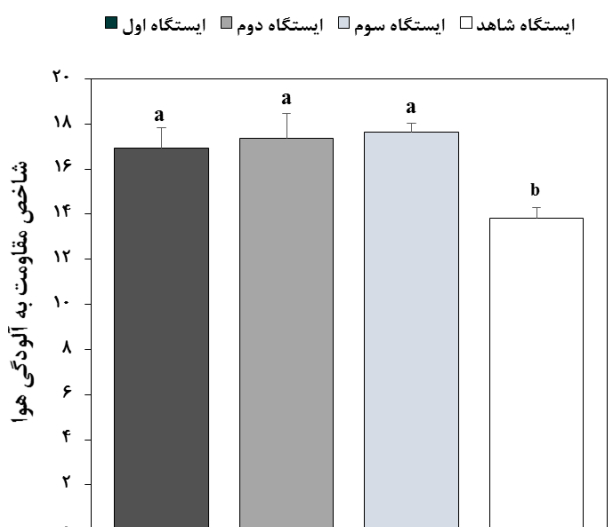
شکل ۵. تصویری از روزنه برگ درختان انجیلی در دو رویشگاه آلوده (بالا) و شاهد (پایین)

۳-۴. شاخص مقاومت به آلودگی هوا

شاخص مقاومت به آلودگی گونه انجیلی بین ۱۳/۸۳ تا ۱۷/۶۳ در ایستگاه‌های مختلف متغیر بود، به طوری که در ایستگاه‌های آلوده بیشتر بود (شکل ۷). شاخص مقاومت به آلودگی هوا یک رابطه تجربی است که با در نظر گرفتن پارامترهای بیوشیمیایی برگ مانند کلروفیل کل، اسید اسکوربیک، pH عصاره برگ و محتوای نسبی آب، سطح تحمل گونه‌های گیاهی را در برابر آلودگی هوا ارزیابی می‌کند. APTI در مطالعاتی مانند توسعه کمربند سبز، کاهش صدای ترافیک و کاهش آلودگی در کنار جاده‌ها و اطراف صنایع استفاده شده است [۳۶]. در این تحقیق، بالاتر بودن مقدار APTI در ایستگاه‌های آلوده منعکس‌کننده سطوح بالاتر آلاینده‌ها و کارایی بیشتر گیاهان برای جذب آن آلاینده است. با توجه به طبقه‌بندی جدول ۱، گونه انجیلی در سطح ایستگاه‌های دوم و سوم در طبقه گونه مقاوم به آلودگی در نظر گرفته می‌شود، در حالی که در سطح شاهد و ایستگاه اول، جزء گونه با مقاومت متوسط محسوب می‌شود. گیاهان مختلف به آلودگی هوا واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند و به طوری که گیاهانی که در محیط ظاهراً آلوده رشد می‌کنند، APTI بالاتری نسبت به گیاهانی دارند که در محیطی با آلودگی کمتر رشد می‌کنند.



شکل ۶. طول روزنه، عرض روزنه، سطح روزنه و تراکم روزنه گونه انجیلی تحت تأثیر آلودگی هوا در ایستگاه‌های مورد مطالعه. داده‌ها نشان‌دهنده مقدار میانگین \pm خطای معیار است ($n=3$). حروف بالای ستون‌ها نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون Tukey HSD می‌باشد.



شکل ۷. شاخص مقاومت به آلودگی گونه انجیلی در ایستگاه‌های مورد مطالعه. داده‌ها نشان‌دهنده مقدار میانگین \pm خطای معیار است ($n=3$). حروف بالای ستون‌ها نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون Tukey HSD می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این تحقیق به منظور بررسی واکنش درختان انجیلی به آلودگی هوای اطراف شهرک صنعتی چمستان انجام شد. اثرات مخرب آلودگی هوا بر pH برگ، رنگدانه‌های فتوسنتزی و صفات روزنه‌ای برگ مشاهده شد. پاسخ‌های بیوشیمیایی گونه انجیلی به تنش‌های ناشی از آلودگی هوا شامل سنتز اسمولیت‌ها و فعال شدن سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی بود. تحریک سیستم آنتی‌اکسیدانی غیر آنزیمی و افزایش غلظت متابولیت‌های برگ، مکانیسم مهمی برای مقاومت درختان انجیلی به آلودگی هوا است. به‌طور خلاصه، بسیاری از تغییرات در فیزیولوژی و بیوشیمیایی، مانند تغییرات ناشی از آلودگی هوا، پاسخ‌های جبرانی بیولوژیکی به تنش‌های محیطی هستند. استراتژی اصلی جبران تنش در گیاهان به حداقل رساندن آسیب ناشی از تنش است. در واقع، این تغییرات به گیاهان کمک می‌کند تا اثرات منفی تنش را به حداقل رسانده و استفاده از منابع درونی و بیرونی را به حداکثر برسانند. نتایج بررسی شاخص مقاومت به آلودگی هوا نشان می‌دهد گونه انجیلی در بین گونه‌های با توانایی متوسط تا مقاوم قرار دارد. با توجه به کل پارامترهای ارزیابی شده در این تحقیق شامل فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، مشخص شد که اثرات نامطلوب آلودگی هوا در ایستگاه‌های نزدیک‌تر به محدوده شهرک صنعتی یعنی ایستگاه اول و دوم نسبت به ایستگاه سوم مخرب‌تر بوده است. نتایج حاصل از این مطالعه درک ما را در مورد تعاملات آلودگی هوا با پوشش گیاهی افزایش می‌دهد و می‌تواند در دستورالعمل‌های مدیریت جنگل‌ها و فضای سبز شهری محلی مورد توجه قرار گیرد. برای شناسایی درختان مؤثر مقاوم به آلاینده‌های جوی و کاشت آنها با هدف کاهش سطح آلودگی به شیوه‌ای کارتر، تحقیقات بیشتر در مورد گونه‌های گیاهی متعددی که در اطراف منابع مختلف آلودگی رشد می‌کنند، مورد نیاز است.

۵. منابع

- [1] Kleckerova, A., & Docekalová, H. (2014). Dandelion plants as a biomonitor of urban area contamination by heavy metals. *International Journal of Environmental Research*, 8, 157-164.
- [2] Ashmore, M.R. (2005). Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. *Plant, Cell & Environment*, 28(8), 949-964.
- [3] Molina, M.J., & Molina, L.T. (2004). Megacities and atmospheric pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(6), 644-680.
- [4] Lu, S., Qin, F., Chen, N., Yu, Z., Xiao, Y., Cheng, X., & Guan, X. (2019). Spatiotemporal differences in forest ecological security warning values in Beijing: Using an integrated evaluation index system and system dynamics model. *Ecological Indicators*, 104, 549-558.
- [5] Elloumi, N., Zouari, M., Mezghani, I., Ben Abdallah, F., Woodward, S., & Kallel, M. (2017). Adaptive biochemical and physiological responses of *Eriobotrya japonica* to fluoride air pollution. *Ecotoxicology*, 26, 991-1001.
- [6] Makhniova, S., Mohnachev, P., & Ayan, S. (2019). Seed germination and seedling growth of Scots pine in technogenically polluted soils as container media. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2), 113.
- [7] Siqueira-Silva, A.I., Pereira, E.G., Modolo, L.V., Lemos-Filho, J.P., Paiva, E.A. 2016. Impact of cement dust pollution on *Cedrela fissilis* Vell. (Meliaceae): A potential bioindicator species, *Chemosphere*, 28(158), 56-65.
- [8] Kohan, A., Haghighi, M., Mirghaffari, N., & 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.
- [9] Roy, A., Bhattacharya, T., & Kumari, M. (2020). Air pollution tolerance, metal accumulation and dust capturing capacity of common tropical trees in commercial and industrial sites. *Science of the Total Environment*, 722, 137622.
- [10] Talebi, S. M., Hatami, H., & Tabaripour, R. (2023). Population Genetic Diversity and Structure of *Parrotia persica* CA Mey. (Hamamelidaceae), a Relict Tree in Iran. *Plant Molecular Biology Reporter*, 41(4), 622-635.

- [11] Arnon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in beta vulgaris. *Plant Physiology*, 24, 1-15.
- [12] Bates, L., Waldren, R.P., & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- [13] Bradford, M.M., (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254.
- [14] Irigoyen, J.J., Einerich, D.W. & Sánchez-Díaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, 84, 55-60.
- [15] Kampfenkel, K., Vanmontagu, M., & Inze, D. (1995). Extraction and determination of ascorbate and dehydroascorbate from plant tissue. *Analytical Biochemistry*, 225, 165-167.
- [16] Sgherri, C.L.M., & Navari-Izzo, F. (1995). Sunflower seedlings subjected to increasing water deficit stress: oxidative stress and defence mechanisms. *Physiologia Plantarum*, 93, 25-30.
- [17] Bharti, S. K., Trivedi, A., & Kumar, N. (2018). Air pollution tolerance index of plants growing near an industrial site. *Urban climate*, 24, 820-829.
- [18] Tsega, Y. C., & Prasad, A. D. (2014). Variation in air pollution tolerance index and anticipated performance index of roadside plants in Mysore, India. *Journal of Environmental Biology*, 35(1), 185-190.
- [19] Verma, J., Singh, P., & Sharma, R. (2023). Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of selected roadside tree species in Ludhiana, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 240.
- [20] Verma, A., & Singh, S.N. (2006). Biochemical and ultrastructural changes in plant foliage exposed to auto-pollution. *Environmental monitoring and assessment*, 120, 585-602.
- [21] Swami, A., Bhatt, D., & Joshi, P. C. (2004). Effects of automobile pollution on sal (*Shorea robusta*) and rohini (*Mallotus philippinensis*) at Asarori, Dehradun. *Himalayan Journal of Environment and Zoology*, 18(1), 57-61.
- [22] Ahmad, I., Abdullah, B., Dole, J. M., Shahid, M., & Ziaf, K. (2019). Evaluation of the air pollution tolerance index of ornamentals growing in an industrial area compared to a less polluted area. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60, 595-601.
- [23] Yadav, A., Dixit, A., & Singh, D. (2024). Estimation of air pollution tolerance index of plants in selected locations in Kanpur City, India. *Materials Today: Proceedings*, 102, 148-151.
- [24] Singh, P., & Pal, A. (2017). Response of dust accumulation on roadside plant species due to open cast mining at Jhansi-Allahabad NH-76, Uttar Pradesh, India. *Tropical Plant Research*, 4(3), 461-467.
- [25] Tak, A.A., & Kakde, U.B. (2020). Biochemical, morphological and anatomical changes in tree foliage exposed to vehicular-pollution. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 5(2), 1-10.
- [26] Zouari, M., Elloumi, N., Mezghani, I., Labrousse, P., Ben Rouina, B., Ben Abdallah, F., & Ben Ahmed, C. (2018). Physiological evaluation of apricot (*Prunus armeniaca* L.) leaves to air pollution for biomonitoring of atmospheric quality. *Pollution*, 4(4), 563-570.
- [27] Seyyednejad, S.M., & Koochak, H. (2011). A study on air pollution-induced biochemical alterations in *Eucalyptus camaldulensis*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(3), 601-606.
- [28] Bamniya, B. R., Kapoor, C. S., Kapoor, K., & Kapasya, V. (2012). Harmful effects of air pollution on physiological activities of *Pongamia pinnata* (L.) Pierre. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14, 115-124.
- [29] Bacelar, E.A., Moutinho-Pereira, J.M., Gonçalves, B.C., Lopes, J.I., & Correia, C.M. (2009). Physiological responses of different olive genotypes to drought conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31, 611-621.
- [30] Patil, P.Y., Goud, A.V., Patil, P.P., & Jadhav, K.K. (2023). Assessment of air pollution tolerance index (APTI) and anticipated performance index (API) of selected roadside plant species for the green belt development at Ratnagiri City in the Konkan region of Maharashtra, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(4), 494.

- [31] Brandão, S.E., Bulbovas, P., Lima, M.E., & Domingos, M. (2017). Biochemical leaf traits as indicators of tolerance potential in tree species from the Brazilian Atlantic Forest against oxidative environmental stressors. *Science of the Total Environment*, 575, 406-417.
- [32] Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Alam, M.M., & Fujita, M. (2015). Glutathione-induced drought stress tolerance in mung bean: coordinated roles of the antioxidant defence and methylglyoxal detoxification systems. *AoB Plants*, 7, plv069.
- [33] Li, Y., Wang, Y., Wang, B., Wang, Y., & Yu, W. (2019). The response of plant photosynthesis and stomatal conductance to fine particulate matter (PM 2.5) based on leaf factors analyzing. *Journal of Plant Biology*, 62, 120-128.
- [34] Gostin, I.N. (2009). Air pollution effects on the leaf structure of some Fabaceae species. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37(2), 57-63.
- [35] Kapoor, C. S. (2014). *Ficus benghalensis* L. tree as an efficient option for controlling air pollution. *Research in Health and Nutrition*, 2, 1-11.
- [36] Pathak, V., Tripathi, B. D., & Mishra, V. K. (2011). Evaluation of anticipated performance index of some tree species for green belt development to mitigate traffic generated noise. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(1), 61-66.

