

تعیین معیارهای زیستی نشان‌دهنده تنش آلودگی هوا بر درخت چنار (*Platanus orientalis* L.)

زینب رفیعی^۱، نورالله میرغفاری^{۲*} و سیدحمید متین‌خواه^۳
۱. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲. دانشیار دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳. استادیار دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۶/۱۶)

چکیده

افزایش نیاز به انرژی به همراه رشد اقتصادی و صنعتی شدن سبب افزایش آلودگی هوا در شهرهای بزرگ ایران شده است. آلودگی هوا با بهم‌زدن حالت پایدار سلول‌های در معرض آن به گیاهان آسیب وارد می‌سازد. در این پژوهش، معیارهای گوناگون نشان‌دهنده تنش آلودگی هوا در سطوح مختلف شامل بیوشیمی سلول، برگ و کل تاج در درخت چنار اندازه‌گیری شد و ارتباط آن‌ها با غلظت آلاینده‌های هوا شامل ازن، اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، مونواکسید کربن و ذرات معلق بررسی شد. نتایج مطالعه نشان داد غلظت کلروفیل‌های آ و ب در برگ چنار با افزایش غلظت ازن در هوا کاهش می‌یابد. در پاییز کلروفیل آ و کلروفیل ب با مونواکسید نیتروژن همبستگی معنادار منفی (به ترتیب $r = -0/69$ و $r = -0/72$) نشان داد. در بهار، سطح ویژه برگ با ازن و دی‌اکسید نیتروژن همبستگی معنادار مثبت ($P < 0/05$) و با مونواکسید کربن همبستگی معنادار منفی ($P < 0/01$) نشان داد. هیچ‌یک از ضرایب همبستگی بین شفافیت تاج و آلاینده‌های هوا معنادار نشد. اما نسبت مساحت تاج در تابستان با آلاینده دی‌اکسید نیتروژن همبستگی معنی‌دار ($P < 0/05$) مثبت نشان داد. شاخص سطح ویژه برگ معیار مناسبی از تماس گیاه با آلاینده‌های مختلف هوا خصوصاً در فصل بهار بود. علاوه بر آن، نسبت مساحت تاج بهتر از شفافیت تاج به آلودگی پاسخ داد و می‌تواند معیار مناسبی از تأثیر آلاینده دی‌اکسید نیتروژن بر درخت چنار باشد. این شاخص به دلیل آسانی و سرعت اندازه‌گیری آن به وسیله دوربین عکاسی دیجیتال معمولی و نرم‌افزارهای پردازش تصویر موجود از پتانسیل بالایی برای کاربرد در مطالعات مربوط به آسیب انواع تنش‌ها بر درختان برخوردار است.

کلیدواژه‌گان: آلودگی هوا، بی‌برگ‌شدگی تاج، چنار، سطح ویژه برگ، کلروفیل.

۱. مقدمه

Bamniya و همکاران (2011) محتوای کلروفیل در برگ‌های باقلای هندی^۳ را که از مناطق با سطوح مختلف غلظت آلاینده‌های دی‌اکسیدگوگرد، دی‌اکسیدنیتروژن و PM₁₀ در شهر اوداپپور هند جمع‌آوری شده بود، مقایسه کردند.

سطح ویژه برگ که یکی از ویژگی‌های ریخت‌شناسی برگ است، از تقسیم مساحت برگ به وزن خشک آن به دست می‌آید. سطح ویژه برگ (SLA)^۴ به دلیل هزینه اندک و سادگی اندازه‌گیری آن، شاخص مهمی در مطالعات پایش آلودگی هوا در مقیاس مکانی بزرگ به وسیله گیاهان به‌شمار می‌رود. برای مثال، Balasooriya و همکاران (2009) قابلیت سطح ویژه برگ در مطالعات پایش آلودگی هوا در مقیاس مکانی بزرگ را با انتخاب ۱۴۸ نقطه نمونه‌برداری در چهار کلاس کاربری زمین در شهر گنت بلژیک و جمع‌آوری نمونه‌های برگ از گونه علفی فراوان در منطقه یعنی گل قاصد^۵ بررسی کردند. علاوه بر گیاهان علفی، تغییرات سطح ویژه برگ در درختان نیز گاهاً برای پایش زیستی آلودگی هوا در شهرها و مناطق آلوده به کار می‌رود. Carreras و همکاران (1996) تغییرات سطح ویژه برگ در برگ نو را با سطح ترافیک در مناطق مختلف شهر کوردوبا در آرژانتین مرتبط دانستند. در مطالعه‌ای مشابه، Gratani و همکاران (2000) صفات ریخت‌شناسی برگ بلوط لوبدار^۶ از جمله سطح ویژه برگ و ضخامت برگ را در پاسخ به سطوح مختلف ترافیک در شهر روم را بررسی کردند. Nikula و همکاران (2011) دریافتند سطح ویژه برگ در کبوده^۷ با فاصله از خیابان افزایش می‌یابد. Alves و همکاران (2008) برگ‌های اوژنیا^۸ در شهر سانتاپائولو را با منطقه‌ای روستایی مقایسه کردند و دریافتند برگ‌های شهری کوچک‌تر و نازک‌تر از برگ‌های روستایی هستند؛ اما در شهر پارانیشیم اسفنجی برگ درختان روئیده در حاشیه خیابان ضخیم‌تر از برگ درختان پارک است.

آلودگی هوا با برهم‌زدن حالت پایدار سلول‌های در معرض آن به گیاهان آسیب وارد می‌سازد. آلاینده‌های مختلف هوا از راه‌های متفاوت به آسیب‌دیدگی گیاه منجر می‌شوند. پس از ورود به برگ، ازن با لایه مرطوب سطح سلول‌های پارانیشیمی درون اتاقک زیر روزنه یعنی اپوپلاست واکنش داده و تولید رادیکال‌های آزاد مانند هیدروپروکسید (HO₂) و سوپر اکسید^۱ (O₂⁻) می‌کند. HO₂ موجب پراکسایش لیپیدها می‌شود و رادیکال هیدروکسیل به اجزای غشای سیتوپلاسمی حمله می‌کند (Longe & Naidu, 2002). آلاینده‌های دیگر مانند دی‌اکسیدگوگرد و دی‌اکسیدنیتروژن علاوه بر اکسیداسیون با تغییر pH و تداخل در متابولیسم عناصر غذایی گوگرد و نیتروژن، تعادل متابولیکی سلول‌ها را برهم می‌زنند. در حالی که آلاینده ذرات معلق بیشتر از راه فیزیکی و با مسدود کردن روزنه و به مقدار کمتر از راه شیمیایی به گیاه آسیب وارد می‌سازد (Bell & Treshow, 2003). پاسخ گیاه به تنش آلودگی هوا به دو صورت است: یا گیاه آلاینده را در خود تجمع می‌دهد و یا در اثر تنش آلودگی از خود علائم ویژه نشان می‌دهد. این علائم بسته به نوع آلاینده، غلظت آن، گونه، شرایط فیزیولوژیکی و سن گیاه متفاوت است (Bell & Treshow, 2003). در مقابل، این علائم نشان‌دهنده وجود تنش آلودگی هوا در گیاه است. شاخص‌های مختلفی برای نشان دادن تنش آلودگی هوا در درختان به کار می‌رود. عیب عمده این شاخص‌ها اختصاصی نبودن و تأثیرپذیری آن‌ها از تنش‌های محیطی دیگر است.

کاهش غلظت کلروفیل‌ها و زرد شدن برگ‌ها بر اثر تنش آلاینده‌های هوا از همان مطالعات اولیه شناخته شده بود. Tripathi Sharma & (2009) غلظت کلروفیل در برگ‌های گونه همیشه‌سبز انجیر بنگالی و گونه برگ ریزجک^۲ را برای پایش زیستی آلاینده‌های دی‌اکسیدگوگرد، دی‌اکسیدنیتروژن و ذرات معلق در منطقه‌ای خشک و گرم در هند به کار بردند.

3. Pongamia pinnata
4. Specific Leaf Area
5. Taraxacum officinalis
6. Quercus ilex
7. Populus tremula Michx
8. Eugenia uniflora

1. Reactive Oxygen Species
2. Dalbergia sisso Roxb

برای این منظور، معیارهای گوناگون در سطوح مختلف شامل بیوشیمی سلول، برگ و کل تاج استفاده شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقه مطالعه شده

اصفهان سومین شهر بزرگ ایران بعد از تهران و مشهد محسوب می‌شود. این شهر یکی از بزرگ‌ترین شهرهای خشک و کم‌باران دنیا به حساب می‌آید. ارتفاع آن از سطح عمومی دریا حدود ۱۵۸۰ متر است. تغییر ارتفاع در بالاترین نقطه ۲۴۱۸ متر و در پایین‌ترین نقطه ۹۰۰ متر است. متوسط دمای سالیانه ۱۶/۵ سلسیوس و بارندگی متوسط سالیانه ۱۲۵ میلی‌متر است. وزش باد در اصفهان عموماً ملایم و آرام است و در تمامی فصل‌ها جریان دارد و به‌ویژه در فصل‌های بهار و پاییز بادهای غربی و جنوب غربی از مناطق کوهستانی و کمابیش در امتداد رود زاینده‌رود می‌وزد.

۲.۲. نمونه برداری

ایستگاه‌های پایش دائم کیفیت هوای شهر اصفهان شامل لاله (ابتدای خیابان پروین)، میدان بزرگمهر، میدان آزادی و میدان احمدآباد (ابتدای خیابان ولیعصر) است. نمونه برداری از برگ و عکس برداری از تاج سه درخت چنار در محدوده اطراف هر کدام از چهار ایستگاه پایش دائم کیفیت هوای شهر اصفهان (مجموعاً ۱۲ درخت) و در تابستان و پاییز ۱۳۸۹ و بهار ۱۳۹۰ انجام گرفت. عکس برداری از تاج هر دو هفته یکبار در طول سال (۱۳ نوبت قبل از خزان برگ و یک نوبت بعد از خزان) انجام شد. نمونه برداری از برگ از ارتفاع ۴ تا ۵ متر از سطح زمین و از پایین‌ترین قسمت تاج درخت در ۶ نوبت و در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز انجام شد.

داده‌های کیفیت هوای شهر اصفهان در سال ۱۳۸۸، برای چهار ایستگاه پایش دائم شامل میدان آزادی، میدان بزرگمهر، میدان احمدآباد و میدان لاله از اداره کل محیط زیست اصفهان تهیه شد. این آمار به صورت هر پنج دقیقه یکبار و برای کل شبانه‌روز و شامل آلاینده‌های ازن، دی‌اکسیدنیترژن، دی‌اکسیدگوگرد، ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر و مونواکسیدکربن است.

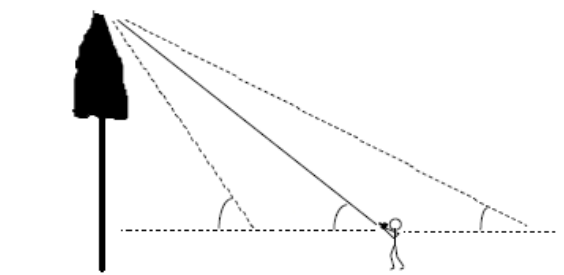
در بسیاری از کشورها، بی‌برگ‌شدگی تاج درخت به‌طور سالیانه از اواسط دهه ۸۰ به دلیل نگرانی‌های عمومی و سیاسی به دلیل کاهش وسیع جنگل‌ها بر اثر آلودگی هوا پایش می‌شود (Innes, 1993). بی‌برگ‌شدگی تاج به صورت مشاهده‌ای به وسیله مشاهده‌گر آموزش دیده از سطح زمین و یا به صورت کمی در تصاویر تاج درخت به کمک روش‌های پردازش تصویر در غالب دو پارامتر «نسبت مساحت تاج» و «شفافیت تاج» برآورد می‌شود (Mizoue et al., 2004). شفافیت تاج مقدار نسبی نور عبور یافته از تاج تعریف می‌شود و نشان‌دهنده میزان ریزش برگ‌ها (بی‌برگ‌شدگی) است (Innes, 1993). نسبت مساحت تاج در تصویر تاج درخت نسبت تعداد پیکسل‌های تاج به تعداد کل پیکسل‌های درون ناحیه تاج است (Lee et al., 2003).

Ozolincius و همکاران (2005) با مطالعه جنگل‌های لیتوانیا دریافت بی‌برگ‌شدگی رابطه معناداری با اسیدیت باران، دی‌اکسیدگوگرد و دی‌اکسیدنیترژن نشان می‌دهد. Ferretti و همکاران (1999) کاربرد شفافیت تاج را به عنوان شاخص آلودگی هوا در جنگل‌های توسکانی مرکز ایتالیا و بر روی گونه‌های بلوط و ممرز بررسی کردند. Sanz و همکاران (2000) نتیجه گرفت در جنگل‌های مدیترانه‌ای غرب اسپانیا، لکه‌های زردبرگی حاصل از ازن بر روی سوزن‌های کاج حلب^۱ با مقدار شفافیت تاج همبستگی معنادار نشان می‌دهد. برخلاف آنچه گفته شد، تردیدهایی درباره استفاده از این شاخص وجود دارد. مثلاً مشخص شده است شفافیت تاج به‌طور طبیعی با تغییر سن درخت، ارتفاع، تنش خشکی، مواد غذایی خاک و به احتمال زیاد قارچ‌های بیماری‌زا و حشرات تغییر می‌کند (Modrzynski, 2003; Badea et al., 2004; Zierl, 2004).

هدف از انجام این مطالعه: الف) بررسی پاسخ معیارهای سلامت درخت چنار (*Platanus L. orientalis*) به آلاینده‌های هوای شهر اصفهان و ب) مقایسه معیارهای مختلف گیاهی و انتخاب بهترین معیار برای نشان دادن آسیب حاصل از آلاینده‌های هوا بود.

1. *Pinus halepensis*

آسمان باشد و ساختمان‌ها و سازه‌های شهری در پیش‌زمینه و پس‌زمینه تاج تداخل ایجاد نکنند، زیرا وجود این اشیا در تقسیم‌بندی تصویر مشکل ایجاد می‌کند (Service, 2002). پس از عکس‌برداری، تصاویر به رایانه منتقل شد. اولین مرحله قبل از پردازش تصاویر، حذف اشیاء و ساختمان‌های مزاحم و انتخاب محدوده تاج درخت (ROI) است (شکل ۲) (Dobbertin et al., 2005).



شکل ۱. عکس‌برداری از درخت از فاصله‌ای به اندازه قامت درخت

۶.۲. شفافیت تاج (بی‌برگ‌شدگی)

برای اندازه‌گیری شفافیت تاج، از روش Mizoue & Dobbertin (2004) استفاده شد. در این روش، مقادیر DSO برای هر درخت به دست می‌آید. سپس، با معادلات خاص هر گونه درختی، از مقادیر DSO مقدار شفافیت تاج به دست می‌آید. روش کار به این شرح است: ۱. ابتدا محدوده تاج (ROI) با حذف اشیای مزاحم و شاخه‌های درختان اطراف انتخاب می‌شود و هم‌زمان درجه هم‌پوشانی با شاخه‌های درختان اطراف با استفاده از یک سیستم ۸ طبقه‌ای (بدون هم‌پوشانی، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰٪ یک طرف تاج و ۲۵، ۵۰، ۷۵٪ دو طرف تاج درخت) مشخص می‌شود (Dobbertin et al., 2005). ۲. در مرحله بعدی تصاویر رنگی حاصل از مرحله قبل با استفاده از الگوریتم‌های آستانه‌یابی اتوماتیک به تصاویر دودویی تبدیل شد. تصویر دودویی حاصل تصویر محیط مرئی^۳ (شکل ۳ الف) خوانده می‌شود. با استفاده از الگوریتم‌های حاشیه‌یاب^۴ از تصویر حاصل، تصویر حاشیه^۵ (شکل ۳ ب) به دست می‌آید. تصاویر حاصل برای ادامه پردازش ذخیره می‌شود (Dobbertin et al., 2005).

1. Region of Interest
2. Difference of silhouette and outline
3. Silhouette
4. Edge detection
5. Outline

۳.۲. محاسبه غلظت کلروفیل‌ها

غلظت رنگدانه‌ها در برگ به روش Lichtenthaler (1987) که اصلاح‌شده روش Arnon (1949) است اندازه‌گیری شد. مطابق این روش، ۰/۵ g برگ چنار با ۱۵ ml استن ۸۰٪ درون هاون ساییده شد. سپس عصاره حاصل با دور ۴۰۰۰ سانتریفوژ شده و طیف محلول شفاف حاصل توسط طیف سنج نوری ثبت شد. فرمول‌های محاسبه غلظت کلروفیل آ و کلروفیل ب به صورت زیر است:

$$C_a (\mu\text{g} / \text{ml}) = 12 / 25 A_{663/2} - 2 / 79 A_{646/8}$$

$$C_b (\mu\text{g} / \text{ml}) = 12 / 50 A_{663/8} - 5 / 10 A_{663/2}$$

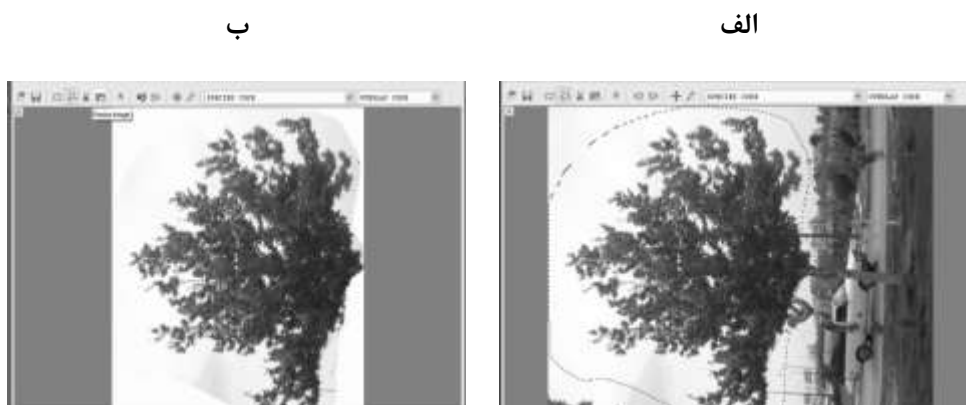
با خشک کردن ۰/۵g برگ در دمای ۸۰°C به مدت ۲۴ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت و توزین نمونه قبل و بعد از قراردادن در آون و محاسبه درصد آب نمونه، غلظت رنگدانه‌های کلروفیل آ و ب و کل کاروتنوئیدها براساس وزن خشک محاسبه شد.

۴.۲. تعیین سطح ویژه برگ

برای اندازه‌گیری سطح ویژه برگ، یک برگ بالغ و شاداب از درخت انتخاب شد. برگ‌ها قبل از نمونه‌برداری در آب مقطر شسته شده و به وسیله پانچ از هر برگ ۱۵ قرص با مساحت یکسان از هر دو طرف رگبرگ اصلی خارج شد. قرص‌ها در ۶۰°C به مدت ۲۴ یعنی تا زمان رسیدن به وزن ثابت خشک شد. وزن خشک هر ۱۵ قرص به وسیله ترازوی الکترونیکی با دقت ۰/۰۰۱ g اندازه‌گیری خواهد شد. در نهایت شاخص SLA برای هر برگ از تقسیم مساحت بر وزن مربوط به دست آمد (Kardel et al., 2010).

۵.۲. عکس‌برداری از تاج

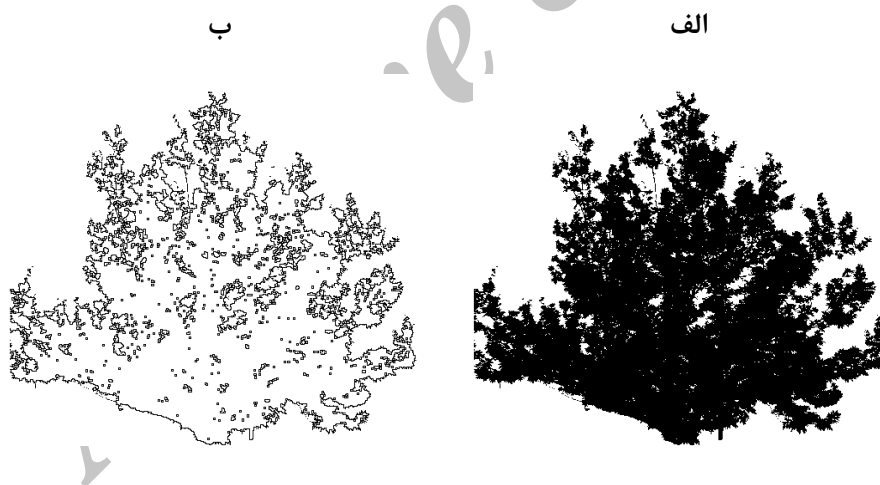
تصاویر تاج درخت توسط دوربین عکاسی دیجیتال (برای این مطالعه، تنظیمات اتوماتیک فعال شد)، از نزدیک زمین و به فاصله‌ای از قاعده درخت به اندازه قامت درخت گرفته شد (شکل ۱). بهترین زمان برای عکس‌برداری زمانی است که خورشید در زاویه‌ای بیش از ۳۰ درجه با خط افق قرار گرفته باشد. بدترین مکان قرارگیری خورشید مستقیماً پشت درخت است. عکس‌برداری از جهتی انجام شد که زمینه تصویر



شکل ۲. انتخاب ناحیه تاج (الف) و حذف نواحی مزاحم (ب)

ایده اصلی روش Mizoue & Dobbertin (2004) برای محاسبه شفافیت تاج (یا بی‌برگ‌شدگی)، بیشتر بودن ناحیه تاج (D_S) نسبت به خطوط تشکیل‌دهنده حاشیه آن (D_O) در تاج‌های متراکم نسبت به تاج‌های بی‌برگ‌شده است (Mizoue & Dobbertin, 2004).

۳. در این مرحله، ابعاد جزئی^۱ برای تصاویر محیط مرئی (D_S) و حاشیه (D_O) و تفاوت این دو (DSO) محاسبه می‌شود. با استفاده از این تفاوت‌ها و توابع رگرسیون برازش‌داده‌شده DSO در مقابل مقادیر شفافیت تاج حاصل از عکس‌های راهنمای استاندارد، مقدار شفافیت تاج برای هر تصویر محاسبه می‌شود (Dobbertin *et al.*, 2005).



شکل ۳. تصویر محیط مرئی (الف) و تصویر حاشیه حاصل از الگوریتم‌های Mizoue & Dobbertin (2004) (ب)

پردازش تصویر^۲ انجام شد:
 ۱. ابتدا تصویر محدوده تاج (ROI) به کمک تابع زیر در محیط برنامه MATLAB باز شد.
 $RGB = \text{imread}(\text{filename}, \text{fmt})$
 و با استفاده از توابع زیر آستانه‌یابی شده به تصویر دودویی تبدیل شد.

۷.۲. نسبت مساحت تاج

نسبت مساحت تاج، نسبت تعداد پیکسل‌های تاج به تعداد کل پیکسل‌های درون ناحیه تاج است (Lee *et al.*, 2003). برای به دست آوردن این نسبت عملیات زیر به کمک برنامه MATLAB ۷/۶ و جعبه ابزار

2. Image processing toolbox

1. Fractal dimentions

۳. نتایج

تغییرات غلظت آلاینده‌های هوا در سال ۱۳۸۸ در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری و در مقایسه با استانداردهای موجود در شکل ۴ آمده است. میانگین غلظت دی‌اکسید گوگرد در ایستگاه‌های بزرگمهر و آزادی بیشتر از ایستگاه‌های لاله و احمدآباد است. غلظت ازن و دی‌اکسید نیتروژن در ایستگاه لاله نسبت به ایستگاه‌های دیگر بیشترین میانگین را به خود اختصاص داده است؛ در حالی که، غلظت مونواکسید کربن در همین ایستگاه کمترین بود. غلظت ازن در ایستگاه لاله در حد غلظت زمینه‌ای این آلاینده یعنی ۴۰ ppb (Longe & Naidu, 2002) و در ایستگاه‌های دیگر کمتر است.

۱.۳. غلظت کلروفیل‌ها

غلظت کلروفیل‌های آ و ب در همه ایستگاه‌ها به جز ایستگاه بزرگمهر از بهار تا پاییز روند کاهشی نشان داد. غلظت کلروفیل‌های آ و ب در ایستگاه لاله کمترین و در ایستگاه‌های آزادی و احمدآباد بیشترین میانگین را به خود اختصاص داد (جدول ۱). به‌طور مشابه، بیشترین میانگین غلظت ازن ۴۰/۱۷ در ایستگاه لاله و کمترین میانگین غلظت ازن ۳۶/۱۰ در ایستگاه احمدآباد اتفاق افتاد (شکل ۴). بنابراین، می‌توان کاهش غلظت کلروفیل در ایستگاه لاله را به آسیب حاصل از آلاینده ازن نسبت داد. در پاییز، غلظت کلروفیل آ و کلروفیل ب در بین ایستگاه‌ها تفاوت معنادار ($P > 0/05$) نشان داد. غلظت هر دو نوع کلروفیل در برگ چنار در پاییز در ایستگاه آزادی بیشینه و در ایستگاه بزرگمهر کمینه و در ایستگاه‌های لاله و احمدآباد در حد متوسط بود.

۲.۳. سطح ویژه برگ (SLA)

سطح ویژه برگ در ایستگاه‌های لاله و آزادی از بهار تا پاییز روند افزایشی داشت. اما در ایستگاه‌های بزرگمهر و احمدآباد از بهار تا تابستان افزایش و پس از آن، در پاییز کاهش یافت (جدول ۲). ایستگاه‌های لاله و آزادی کمترین غلظت آلاینده مونواکسید نیتروژن و ایستگاه‌های بزرگمهر و احمدآباد بیشترین غلظت این

$$I = rgb2gray(RGB)$$

$$Level = graythresh(I)$$

$$BW = im2bw(I, levelz)$$

۲. در تصویر دودویی حاصل از مرحله قبل پیکسل‌های برگ دارای ارزش صفر و پیکسل‌های آسمان دارای ارزش یک هستند. به همین دلیل ابتدا به کمک روابط جبر ماتریسی ساده، تصویر دودویی (BW) که در آن پیکسل‌های برگ ارزش صفر و پیکسل‌های زمینه ارزش یک به خود بگیرند به دست آمد. سپس تعداد کل پیکسل‌های مربوط به تاج (N_L) از تصویر دو دویی حاصل به کمک تابع زیر محاسبه شد.

$$N_L = \text{sum}(\text{sum}(BW))$$

۳. در مرحله بعدی، تصویر دودویی با استفاده از روش بسط‌دادن و توابع زیر به تصویر ناحیه تاج تبدیل شد.

$$se = \text{strel}('disk', 10);$$

$$Io = \text{imclose}(bw, se);$$

۴. تعداد کل پیکسل‌های ناحیه تاج (N_R) از روی تصویر حاصل از مرحله قبل مشابه مرحله دو به دست آمد. سپس، نسبت مساحت با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$\text{نسبت مساحت} = N_L / N_R$$

۸.۲. تجزیه و تحلیل آماری

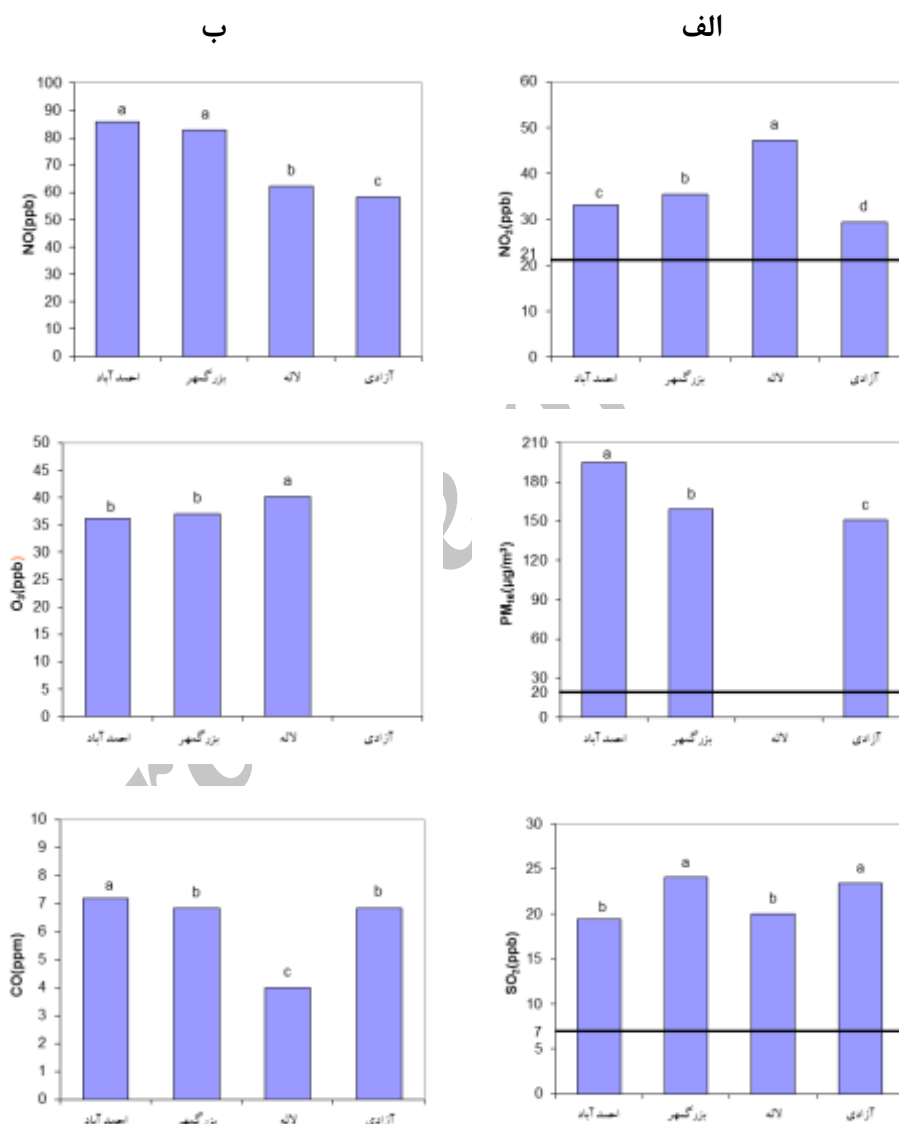
کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS تجزیه و تحلیل شد. ضرایب همبستگی پیرسون بین غلظت آلاینده‌ها و پارامترهای گیاهی محاسبه شد. اما قبل از آن نرمال‌بودن داده‌ها توسط آزمون کلموگروف-اسمیرنو آزمون شد و داده‌های غیرنرمال با استفاده از تبدیل باکس-کاکس نرمال شدند. علاوه بر آن، برای تعیین تفاوت‌های معنادار بین مناطق مختلف تجزیه واریانس (ANOVA) بر روی داده‌ها اعمال شد و هر جا ANOVA بیانگر تفاوت‌های معنادار بود، مقایسه میانگین بین جفت گروه‌ها توسط آزمون کمترین تفاوت معنادار (LSD) انجام شد.

کمترین مقدار شفافیت تاج در همه ایستگاه‌ها در تابستان یعنی زمانی که رشد برگ‌ها به حداکثر خود رسیده است مشاهده شد و در همه ایستگاه‌ها، مقدار شفافیت تاج در پاییز با خزان برگ افزایش یافت. تجزیه واریانس بیانگر وجودنداشتن تفاوت معنادار در مقدار شفافیت تاج بین ایستگاه‌ها بود.

آلاینده را نشان می‌دهند (شکل ۴). در هیچ یک از فصول سال، سطح ویژه برگ چنار تفاوت معناداری بین ایستگاه‌های مختلف نشان نداد (جدول ۲).

۳.۳. شفافیت تاج

مقادیر مربوط به میانگین و انحراف معیار و نتایج تجزیه واریانس شفافیت تاج چنار در ایستگاه‌ها و فصول مختلف سال در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۴. غلظت میانگین آلاینده‌های مختلف هوا در ایستگاه‌های نمونه‌برداری برای دوره فعالیت درخت چنار در سال ۱۳۸۸ (میله‌های دارای حروف غیریکسان بیانگر وجود تفاوت معنادار در سطح ۰/۰۱ توسط آزمون مقایسه میانگین LSD است. الف) آلاینده‌های دارای استاندارد سالیانه (خط ممتد) مصوب شورای عالی حفاظت محیط‌زیست سال ۱۳۸۸ (Ahadi *et al.*, 2011). ب) آلاینده‌های فاقد استاندارد سالیانه.

جدول ۱. میانگین و انحراف معیار و نتایج تجزیه واریانس غلظت کلروفیلها ($\mu\text{g}/\text{mg}$) در برگ چنار در ایستگاهها و فصول مختلف

ANOVA	آزادی	لاله	بزرگمهر	احمدآباد	فصل	پارامتر
ns	$52/84 \pm 36/25$	$39/09 \pm 28/04$	$36/42 \pm 25/54$	$51/28 \pm 30/58$	بهار	کلروفیل آ
ns	$25/50 \pm 29/88$	$26/24 \pm 14/51$	$42/79 \pm 32/44$	$30/09 \pm 35/73$	تابستان	
$P < 0/05$	$22/02 \pm 7/18^a$	$16/18 \pm 5/72^{ab}$	$9/19 \pm 8/20^b$	$11/06 \pm 6/39^{ab}$	پاییز	
ns	$26/57 \pm 22/20$	$18/46 \pm 14/75$	$6/40 \pm 23/61$	$30/27 \pm 21/98$	بهار	کلروفیل ب
ns	$15/34 \pm 20/15$	$13/87 \pm 8/76$	$30/39 \pm 26/10$	$18/43 \pm 20/53$	تابستان	
$P < 0/05$	$13/73 \pm 5/77^a$	$10/56 \pm 3/47^{ab}$	$6/56 \pm 4/46^b$	$6/70 \pm 3/67^{ab}$	پاییز	

ns غیرمعنادار؛ اعداد درون هر سطر با حروف یکسان تفاوت معناداری در سطح $0/05$ توسط آزمون مقایسه میانگینها نشان نمی دهند.

منفی ($P < 0/01$) نشان داد. هیچ یک از ضرایب همبستگی بین شفافیت تاج و آلایندگی هوا معنادار نشد (جدول ۵). اما نسبت مساحت تاج در تابستان با آلایندگی دی اکسید نیتروژن همبستگی معنادار ($P < 0/05$) مثبت نشان داد.

۳.۶. ارتباط بین آلایندگیهای هوا و پارامترهای گیاهی

ضرایب همبستگی بین پارامترهای اندازه گیری شده بیانگر آن است که کلروفیل آ و کلروفیل ب با همبستگی معنادار مثبت و با شفافیت تاج همبستگی معنادار منفی در سطح ۱ درصد نشان دادند (جدول ۶). با خزان و ریزش برگ (افزایش شفافیت تاج) محتوای رنگدانهها کاهش می یابد. نسبت مساحت با سطح ویژه برگ همبستگی مثبت و با شفافیت تاج همبستگی منفی نشان داد (جدول ۶). پدیدهی است که هر چه نسبت مساحت افزایش یابد، شفافیت تاج کمتر می شود.

۳.۴. نسبت مساحت تاج

جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس نسبت مساحت تاج را نشان می دهد. نسبت مساحت تاج در بهار بین ایستگاهها تفاوت معنادار نشان داد. نسبت مساحت تاج در ایستگاه لاله ۸۱/۵۹ درصد و در ایستگاه بزرگمهر ۷۲/۹۱ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین میانگین بین ایستگاهها را به خود اختصاص داد.

۳.۵. ارتباط بین آلایندگیهای هوا و پارامترهای گیاهی

برای تعیین اثر آلایندگیهای هوا بر معیارهای سلامت درخت چنار، آنالیز همبستگی بر روی داده های نرمال اعمال شد (جدول ۵). در پاییز کلروفیل آ و کلروفیل ب با NO همبستگی معنادار منفی (به ترتیب $r = -0/69$ و $r = -0/72$) نشان داد. در بهار، سطح ویژه برگ با از ن دی اکسید نیتروژن همبستگی معنادار مثبت ($P < 0/05$) و با مونواکسید کربن همبستگی معنادار

جدول ۲. میانگین و انحراف معیار و نتایج تجزیه واریانس سطح ویژه برگ چنار (cm^2/g) در ایستگاهها و فصول مختلف

ایستگاه	بهار	تابستان	پاییز
احمدآباد	$51/19 \pm 11/154$	$60/23 \pm 59/166$	$26/20 \pm 67/157$
بزرگمهر	$14/21 \pm 42/153$	$53/10 \pm 06/140$	$80/20 \pm 23/124$
لاله	$49/35 \pm 36/194$	$00/34 \pm 21/159$	$52/23 \pm 78/144$
آزادی	$77/21 \pm 65/165$	$44/16 \pm 69/156$	$48/24 \pm 30/149$
ANOVA	ns	ns	ns

ns: غیرمعنادار

جدول ۳. میانگین و انحراف معیار و نتایج تجزیه واریانس شفافیت تاج چنار در ایستگاه‌ها و فصول مختلف

ایستگاه	بهار	تابستان	پاییز
احمدآباد	۳۲/۵۶±۱۷/۵۴	۱۷/۱۸±۱۰/۰۱	۳۲/۱۳±۸/۳۲
بزرگمهر	۳۷/۲۷±۱۹/۰۸	۲۱/۸۲±۱۲/۷۹	۳۴/۱۳±۱۱/۸۲
لاله	۳۳/۱۱±۲۳/۵۹	۲۵/۲۸±۷/۴۳	۳۶/۷۵±۱۱/۳۴
آزادی	۳۰/۱۸±۲۰/۱۷	۲۲/۰۰±۹/۷۹	۳۵/۵۴±۷/۳۶
ANOVA	ns	ns	ns

ns: غیرمعنادار

۴. بحث و نتیجه‌گیری

۱.۴. کلروفیل‌ها

نتایج این مطالعه نشان داد غلظت کلروفیل‌های آ و ب در برگ با افزایش غلظت ازن در هوا کاهش می‌یابد. کاهش فتوسنتز اولین پاسخ به حضور ازن و حتی تنها پاسخ حاصل از تماس مزمن ازن با برگ‌ها است (Felzer *et al.*, 2007). در برگ‌های گندم، ۲۰۰-۴۰۰ ppb ازن پس از ۳۰ دقیقه ظرفیت فتوسنتز گیاه را مستقل از گذردهی روزنه، به‌طور قابل توجهی کاهش داد (Farage *et al.*, 1991). اگر چه، غلظت‌های زیاد ازن در عملکرد سلول‌های نگهبان روزنه اختلال ایجاد می‌کند، اما در غلظت‌های کم یعنی در حدود ۴۰ ppb که در شهر اصفهان معمولاً اتفاق می‌افتد، ازن فقط به‌صورت غیرمستقیم آن هم از طریق کاهش فتوسنتز سبب بسته‌تر شدن روزنه می‌شود (Wagg *et al.*, 2013). در نتیجه، در غلظت‌های کم عامل دیگری به‌جز گذردهی روزنه سبب کاهش فتوسنتز می‌شود و آن کاهش نسخه‌برداری از روی ژن‌های آنزیم‌های فتوسنتزی مانند روبیسکو است (Agrawal & Agrawal, 2000). مطالعات Leitao و همکاران (2003) نشان داد بارزترین تغییر پس از تماس مزمن با ازن کاهش فعالیت روبیسکو است. ازن علاوه بر آسیب به روزنه و تغییر بروز ژن‌ها از طریق افزایش تولید هورمون اتیلن بر محتوای کلروفیل گیاه تأثیر می‌گذارد. هورمون گیاهی اتیلن (C_2H_4) چندین وظیفه مانند ریزش برگ، پژمردگی برگ و جلوگیری از بلند شدن برگ بر عهده دارد (Yang *et al.*, 2013) و طی فرایند پژمردگی برگ، کلروفیل تخریب می‌شود (Sakuraba *et al.*, 2013).

کلروفیل آ و کلروفیل ب در پاییز با افزایش غلظت مونواکسیدنیتروژن در هوا روند کاهشی نشان داد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد نیتروز اکسید تأثیر منفی بر غلظت کلروفیل‌ها در برگ می‌گذارد. احتمالاً مکانیسم اثر این آلاینده بر گیاه از طریق القای تولید اتیلن است. مشخص شده است غلظت‌های کم مونواکسیدنیتروژن در حد ppb منجر به القای خزان زود هنگام در برگ می‌شود (Procházková & Wilhelmová, 2011). همان‌طور که قبلاً ذکر شد اتیلن موجب فعال شدن ژن‌های خزان و تخریب رنگدانه‌ها می‌شود (Sarwat, in press). مکانیسم آسیب دیگر احتمالاً از طریق تخریب کلروفیل به دلیل اسیدی شدن برگ بر اثر مونواکسیدنیتروژن است. آلاینده NO_x که از روزنه عبور می‌کند و به اتاقلک زیر روزنه وارد می‌شود در لایه مرطوب سطح سلول‌ها یعنی آپوپلاست حل شده و به اسیدنیتریک و اسیدنیتروز تبدیل می‌شود. (Bell & Treshow, 2003). سپس، این NO_2^- و NO_3^- به همراه NO_3^- که از آوند چوبی می‌آید از غشا عبور می‌کند و به سیتوپلاسم وارد می‌شود و در آنجا، توسط آنزیم نیتريت‌ریداکتاز به NH_4^+ تبدیل و در ساخت اسیدهای آمینه استفاده می‌شود. این واکنش‌ها موجب تغییر pH سلول می‌شود (Chaparro-Suarez & Kesselmeier, 2011). پژوهش‌ها نشان داده است کلروفیل به اسیدپته بسیار حساس است و یون Mg^{2+} مولکول کلروفیل در محیط اسیدی به وسیله H^+ جایگزین شده و منجر به تخریب کلروفیل به فتوفین می‌شود (Thimann, 1983). ارتباط اندک کلروفیل آ و ب با آلاینده‌های هوا (جدول ۶) نشان می‌دهد رنگدانه‌ها با غلظت آلاینده‌ها در هوای شهر اصفهان ارتباط کمی نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد تنش‌های دیگر به‌جز آلودگی هوا (مانند

پروسه‌های کاتابولیک در سلول ممکن است موجب کاهش غلظت کلروفیل شوند (Gan, 2005). فاکتورهای محیطی مانند نور، دما، خشکی، شرایط غرقابی، کمبود مواد غذایی خاک و تنش‌های زیستی در فعال کردن ژن‌های تنظیم‌کننده خزان نقش دارند (Woo *et al.*, 2004). رنگدانه‌ها به آلاینده‌ای به‌خصوص پاسخ اختصاصی نمی‌دهند و انواع مختلف آلاینده‌ها و استرس‌های محیطی بر آن تأثیر می‌گذارد.

کلروز آهن، مقدار آب در دسترس، سایه درختان اطراف و ساختمان‌ها) با تأثیر بر محتوای کلروفیل اثر آلودگی هوا را پوشانده است. مولکول‌های کلروفیل در سلول در وضعیتی بسیار باثبات نگهداری می‌شوند و تحت انواع استرس ممکن است در چندین واکنش فتوشیمیایی مانند اکسیداسیون، کاهش، فتوفیتیزاسیون^۱ و سفیدشدگی قابل بازگشت شرکت کنند (Sharma & Tripathi, 2009). تنش‌های محیطی از طریق دیگر با فعال کردن ژن‌های تنظیم‌کننده فرایند خزان و آغاز

جدول ۴. میانگین و انحراف معیار و نتایج تجزیه واریانس نسبت مساحت تاج چنار (درصد) در ایستگاه‌ها و فصول مختلف

ANOVA	آزادی	لاله	بزرگمهر	احمدآباد	فصل	پارامتر
ns	۳۰/۱۸±۲۰/۱۷	۳۳/۱۱±۲۳/۵۹	۳۷/۲۷±۱۹/۰۸	۲۲/۵۶±۱۷/۵۴	بهار	شفافیت تاج
ns	۲۲/۰۰±۹/۷۹	۲۵/۲۸±۷/۴۳	۲۱/۸۲±۱۲/۷۹	۱۷/۱۸±۱۰/۰۱	تابستان	
ns	۳۵/۵۴±۷/۳۶	۳۶/۷۵±۱۱/۳۴	۳۴/۱۳±۱۱/۸۲	۳۲/۱۳±۸/۳۲	پاییز	
P<۰/۰۵	۷۹/۲۱±۶/۰۵ ^a	۸۱/۵۹±۱۸/۶۸ ^{ab}	۷۲/۹۱±۱۹/۰۳ ^b	۷۶/۶۲±۱۸/۴۳ ^{ab}	بهار	نسبت مساحت تاج
ns	۷۴/۱۸±۵/۱۳	۷۸/۹۳±۳/۱۵	۷۷/۰۸±۷/۱۱	۷۵/۰۳±۳/۹۳	تابستان	
ns	۷۵/۷۰±۷/۹۴	۷۷/۷۶±۷/۸۷	۷۶/۵۶±۶/۹۳	۷۳/۸۰±۷/۶۲	پاییز	

ns غیرمعنادار؛ اعداد درون هر سطر با حروف یکسان تفاوت معناداری در سطح ۰/۰۵ توسط آزمون مقایسه میانگین‌ها نشان نمی‌دهند.

سلولی و ضخامت دیواره سلولی افزایش یافت و سبب کاهش سطح ویژه برگ شد. آن‌ها این مشاهدات را تغییرات ساختاری برگ برای محدودساختن فعالیت گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن حاصل از تماس طولانی مدت با ازن توصیف کردند. Pandey & Agrawal (1994) گیاهان ۴۵ روزه گوجه‌فرنگی^۳ را به مدت ۴ ساعت و برای ۵۰ روز در معرض ۰/۱ ppm SO₂، ۰/۲ ppm NO₂ و ۰/۱ ppm SO₂ + ۰/۲ ppm NO₂ قرار داد و مشاهده کرد سطح ویژه برگ ابتدا افزایش سپس با افزایش مدت تماس با آلودگی کاهش می‌یابد.

مونواکسیدکربن جزء آلاینده‌های غالب در شهر اصفهان است و شواهدی که نشان بدهد برای گیاهان سمی است در دست نیست. اما احتراق ناقص در موتور خودروها که منبع انتشار اصلی آلاینده‌های موجود در اطراف خیابان‌های شهر است علاوه بر مونواکسیدکربن عامل انتشار هیدروکربن‌های نسوخته به اتمسفر است و انتظار می‌رود با مونواکسیدکربن ارتباط بالایی نشان دهد. نتایج

۲.۴. سطح ویژه برگ

در بهار سطح ویژه برگ با افزایش غلظت آلاینده‌های ازن و دی‌اکسیدنیتروژن در هوا افزایش پیدا کرد. اما در فصول تابستان و پاییز با آن‌ها ارتباط معناداری نشان نداد. احتمالاً تماس کوتاه‌مدت با آلاینده‌های اکسندۀ هوا موجب نازک‌تر شدن برگ می‌شود. اما پس از مدتی، گیاه در پاسخ به آلاینده‌ها تغییرات ساختاری از خود نشان می‌دهد که این تغییرات ساختاری موجب مقاوم شدن برگ به حمله اکسیداسیونی می‌شود. Chappelka و همکاران (1988) نهال‌های لاله‌دار^۲ را تحت شرایط آزمایشگاهی در معرض سطوح مختلف ازن برای ۶ هفته قرار دادند و به‌طور مشابه، افزایش سطح ویژه برگ با افزایش آلودگی ازن را گزارش کردند. بر خلاف آن‌ها، Laakso و همکاران (2006) دریافتند پاسخ گیاه به تماس طولانی مدت با ازن، کاهش سطح ویژه برگ است. آن‌ها نشان دادند پس از دو ماه تماس با ازن، قندهای دیواره

3. *Lycopersicon esculentum*

1. Pheophytisation
2. *Liriiodendron tulipifera*

مطالعه‌ای مشابه، Gratani و همکاران (2000) صفات مورفولوژیک برگ بلوط لوب‌دار^۲ از جمله سطح ویژه برگ و ضخامت برگ در پاسخ به سطوح مختلف ترافیک در شهر رم را مطالعه کردند. Nikula و همکاران (2011) تغییرات سطح ویژه برگ در ۱۳ کلون از کبوده هیبرید^۳ را در ارتباط با فاصله از خیابان مطالعه کردند و دریافتند سطح ویژه برگ با فاصله از خیابان افزایش می‌یابد.

این مطالعه نشان داد سطح ویژه برگ با مونواکسیدکربن ارتباط منفی نشان می‌دهد. به همین دلیل، عامل اثرگذار بر شاخص سطح ویژه برگ را می‌توان آلاینده‌های دیگری که به همراه مونواکسیدکربن از آگزوز خودروها خارج می‌شوند فرض کرد. Carreras و همکاران (1996) تغییرات سطح ویژه برگ در برگ نو^۱ را با سطح ترافیک در مناطق مختلف شهر کوردوبا در آرژانتین مرتبط دانست. در

جدول ۵. ضرایب همبستگی پیرسون آلاینده‌ها با پارامترهای گیاهی

فصل	O ₃	NO	NO ₂	PM ₁₀	SO ₂	CO
کلروفیل آ	بهار	۳۶/۰-	۳۲/۰	۲۱/۰-	۴۴/۰	۲۹/۰
	تابستان	۲۶/۰-	۳۳/۰	۰۴/۰-	۰۴/۰-	۱۸/۰
	پاییز	۴۴/۰	**۶۹/۰-	۱۴/۰-	۳۴/۰-	۱۳/۰-
کلروفیل ب	بهار	۲۳/۰-	۱۳/۰	۱۶/۰-	۴۶/۰	۱۷/۰
	تابستان	۴۱/۰-	۴۲/۰	۱۳/۰-	۰۸/۰-	۲۹/۰
	پاییز	۵۶/۰	**۷۲/۰-	۱۰/۰-	۴۲/۰-	۱۸/۰-
سطح ویژه برگ	بهار	*۸۲/۰	۵۴/۰-	*۶۱/۰	۲۵/۰-	**۷۳/۰-
	تابستان	۱۰/۰	۱۵/۰-	۰۵/۰	۲۸/۰	۱۱/۰-
	پاییز	۰۵/۰-	۱۱/۰-	۱۱/۰-	۴۴/۰	۰۳/۰
شفافیت تاج	بهار	۳۲/۰	۲۰/۰-	۲۲/۰	۴۵/۰-	۲۵/۰-
	تابستان	۵۴/۰	۴۳/۰-	۳۵/۰	۴۷/۰-	۴۵/۰-
	پاییز	۳۳/۰	۲۸/۰-	۱۷/۰	۲۴/۰-	۲۵/۰-
نسبت مساحت تاج	بهار	۱۴/۰	۵۳/۰-	۲۸/۰-	۱۰/۰-	۰۳/۰
	تابستان	۵۵/۰	۱۲/۰-	*۶۰/۰	۱۶/۰-	۵۵/۰-
	پاییز	۳۱/۰	۱۹/۰-	۲۶/۰	۲۶/۰-	۲۸/۰-

* معنادار در سطح ۰/۰۵؛ ** معنادار در سطح ۰/۰۱

جدول ۶. ماتریس همبستگی بین پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده در چنار

نسبت مساحت تاج	کلروفیل ب	کلروفیل آ	سطح ویژه برگ
		۱	۳۱/۰
	۱	**۹۰/۰	۱۸/۰
۱	۰۶/۰	۱۷/۰	**۵۳/۰
*۴۴/۰-	*۴۲/۰-	**۶۳/۰-	۳۲/۰-

* معنادار در سطح ۰/۰۵؛ ** معنادار در سطح ۰/۰۱

نسبت مساحت تاج در تابستان با افزایش دی‌اکسیدنیترژن افزایش یافت. با اینکه اکسیدهای

۳.۴. شفافیت و نسبت مساحت تاج

شفافیت تاج ارتباطی با آلاینده‌های هوا نشان نداد. اما

2. *Quercus ilex*
3. *Populus tremula L. x P. tremuloides Michx*

1. *Ligustrum lucidum Ait & Ligustrum lucidum Ait. f. tricolor*

می‌گذاشت جای خود را به دی‌اکسیدگوگرد و ازن داده است. با اینکه ازن مهم‌ترین آلاینده تأثیرگذار بر پوشش گیاهی محسوب می‌شود اما تأثیرگذارترین آلاینده بر معیارهای تنش در اصفهان، دی‌اکسیدنیتروژن بود. رنگدانه‌ها اگرچه به‌طور وسیع به‌عنوان معیار تنش آلودگی هوا در مطالعات بی‌شماری به کار رفته است، اما این پژوهش نشان داد در شرایط طبیعی و کنترل‌نشده نمی‌تواند به‌خوبی تنش آلودگی هوا بر درختان را نشان دهد. باین‌حال، این شاخص با آلاینده نیتریک‌اکسید ارتباط معنادار نشان داد. در مقابل، شاخص سطح ویژه برگ معیار مناسبی از تماس گیاه با آلاینده‌های مختلف هوا خصوصاً در فصل بهار بود. علاوه بر آن، نسبت مساحت تاج بهتر از شفافیت تاج به آلودگی پاسخ داد و می‌تواند معیار مناسبی از تأثیر آلاینده دی‌اکسیدنیتروژن بر درخت چنار باشد. این شاخص به‌دلیل آسانی و سرعت اندازه‌گیری آن به‌وسیله دوربین عکاسی دیجیتال معمولی و نرم‌افزارهای پردازش تصویر موجود از پتانسیل بالایی برای کاربرد در مطالعات مربوط به آسیب انواع تنش‌ها بر درختان برخوردار است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه و مطالعات پیشین پیشنهاد می‌شود در تدوین استانداردهای هوای پاک آلاینده مونواکسیدنیتروژن نیز به‌دلیل تأثیر مهم آن بر روی گیاهان، در کنار آلاینده دی‌اکسیدنیتروژن لحاظ شود.

نیتروژن معمولاً یک آلاینده محسوب می‌شوند، مطالعات نشان می‌دهد گاهی دی‌اکسیدنیتروژن در غلظت‌های کم یک منبع مفید نیتروژن برای گیاه است؛ خصوصاً زمانی که خاک از لحاظ نیتروژن فقیر است. Rowland و همکاران (1987) جوی کاشته‌شده به روش هیدروپونیک را در معرض 300 ppb NO_2 برای نه روز قرار دادند و برای تضمین ثابت‌ماندن نیتروژن واردشده به ریشه، از ورود گاز دی‌اکسیدنیتروژن به درون محلول غذایی جلوگیری کردند. آن‌ها دریافتند پاسخ به دی‌اکسیدنیتروژن به وضعیت تغذیه‌ای گیاه بستگی دارد. افزایش معنادار در محتوای نیتروژن گیاه فقط در زمان فقر نیتروژن در محلول غذایی مشاهده شد. سپس آن‌ها با استفاده از 15N نشان دادند نیتروژن حاصل از ورود دی‌اکسیدنیتروژن به برگ از جوانه به ریشه انتقال یافته است. این مشاهده مغذی بودن دی‌اکسیدنیتروژن در شرایط کمبود نیتروژن را تأیید می‌کند.

۴.۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد آلاینده‌های هوای شهر اصفهان به‌خصوص آلاینده‌های اکسندمانند ازن، مونواکسیدنیتروژن و دی‌اکسیدنیتروژن بر معیارهای نشان‌دهنده سلامت چنار تأثیر می‌گذارد. امروزه به‌دلیل بهبود کیفیت سوخت، آلودگی دی‌اکسیدگوگرد که زمانی بیشترین تأثیر را بر پوشش گیاهی

REFERENCES

1. Agrawal, S.B., and Agrawal, M (2000) Environmental pollution and plant responses. Lewis publishers, 328pp.
2. Ahadi, S., Najafi, M.A. and Roshani, M (2011) Annual air quality report of Teheran in 2011, Technical report of Air Quality Control Co., No QM91/02/06(U)/01.
3. Alves, E.S., Tresmondi, F., and Longui, E.L (2008) Leaf anatomy of *Eugenia uniflora* L. (myrtaceae) in urban and rural environments, Sante Paulo state, Brazil. Análise estrutural de folhas de *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae) coletadas em ambientes rural e urbano, SP, Brasil 22: 241-248.
4. Arnon, D.I (1949) Copper enzyme in isolated chloroplast polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24: 1-15.
5. Badea, O., Tanase, M., Georgeta, J., Anisoara, L., Peiov, A., Uhlirova, H., Pajtik, J., Wawrzoniak, J., and Shparyk, Y (2004) Forest health status in the carpahian mountains over the period 1997-2001. *Environmental Pollution*, 130: 93-98.
6. Balasooriya, B.L.W.K., Samson, R., Mbikwa, F., Vitharana, U.W.A., Boeckx, P., and Van Meirvenne, M (2009) Biomonitoring of urban habitat quality by anatomical and chemical leaf characteristics. *Environmental and Experimental Botany*, 65: 386-394.
7. Bamniya, B.R., Kapoor, C.S., Kapoor, K., and Kapasya, V (2011) Harmful effects of air

- pollution on physiological activities of *Pongamia pinnata* (L.) Pierre. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(1): 115-124.
8. Bell, J.N.B., and treshow, M (2003) Air pollution and plant life. In John Wiley and sons Ltd.
 9. Carreras, H.A., Casias, M.S., and Pignata, M.L (1996) Differences in responses to urban air pollutants by *Ligustrum lucidum* Ait. and *Ligustrum lucidum* Ait. f. *tricolor* (Rehd.) Rehd. *Environmental Pollution*, 93: 211-218.
 10. Chaparro-Suarez, I.G., Meixner, F.X., and Kesselmeier, J. (2011) Nitrogen dioxide (NO₂) uptake by vegetation controlled by atmospheric concentrations and plant stomatal aperture. *Atmospheric Environment*, 45: 5742-5750
 11. Chappelka, A.H., Chevone, B.I., and Seiler, J.R (1988) Growth and physiological responses of yellow-poplar seedlings exposed to ozone and simulated acidic rain. *Environmental Pollution*, 49: 1-18.
 12. Dobbertin, M., Hug, C., and Mizoue, N (2005) Using slides to test for changes in crown defoliation assessment methods part ii: Application of the image analysis system CROCO. *Environmental Monitoring and Assessment*, 102: 167-178.
 13. Farage, P.K., Long , S.P., Lechner, E.G., and Baker, N.R (1991) The sequence of change within the photosynthetic apparatus of wheat following short-term exposure to ozone. *Plant Physiology*, 95: 529-535.
 14. Felzer, B.S., Cronin, T., Reilly, J.M., Melillo, J.M. and Wang, X (2007) Impacts of ozone on trees and crops. *Comptes Rendus Geoscience*, 339: 784-798.
 15. Ferretti, M., Bonini, I., Bussotti, F., Celesti, C., Cenni, E., Chiarucci, A., Cozzi, A., De Dominicis, V., Grossoni, P., and Leonzio, C (1999) Short-term changes of response indicators of ecosystem status in broad leaved forests in Tuscany (central italy). *Water, Air, and Soil Pollution*, 116: 351-356.
 16. Gan, S (2005) Scenecence processes in plants. CRC press, 532pp.
 17. Gratani, L., Crescente, M.F., and Petruzzi, M (2000) Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of *Quercus ilex* in polluted urban areas (Rome). *Environmental Pollution*, 110: 19-28.
 18. Innes, J.L (1993) Methods to estimate forest health. *Silva Fennica*, 27: 145-157.
 19. Kardel, F., Wuyts, K., Babanezhad, M., Vitharana, U.W.A., Wuytack, T., Potters, G., and Samson, R (2010) Assessing urban habitat quality based on specific leaf area and stomatal characteristics of *Plantago lanceolata* L. *Environmental Pollution*, 158: 788-794.
 20. Laakso, K., Paoletti, E., and Huttunen, S (2006) Leaf morphology and gas exchange in holm oak (*Quercus ilex* L.) trees in different environments. *Ekologia Bratislava*, 25: 223-233.
 21. Lee, S.-M., Clark, N.A., and Araman, P.A (2003) Automated methods of tree boundary extraction and foliage transparency estimation from digital imagery. 19th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and Airborne Imaging for Resource Assessment, Logan, Utah.
 22. Leitao, L., Goulas, P., and Biolley, J.P (2003) Time-course of Rubisco oxidation in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) subjected to a long-term ozone stress. *Plant Science*, 165: 613-620.
 23. Lichtenthaler, H (1987) Chlorophyll and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148: 251-282.
 24. Longe, S.P., and Naidu, S.L (2002) Effects of oxidants at the biochemical, cell and physiological levels, with particular reference to ozone. In Air pollution and plant life, J.N. Bell, b., and D.T. Tingey, (eds.), Chichester, Wiley.
 25. Mizoue, N., and Dobbertin, M (2004) Within country accuracy of tree crown transparency estimates using the image analysis system CROCO: A case study from Switzerland. *Environmental Modelling and Software*, 19: 1089-1095.
 26. Mizoue, N., Dobbertin, M., and Sugawara, D (2004) Operator errors in tree crown transparency estimates using the image analysis system CROCO. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44: 247-254.
 27. Modrzyński, J. 2003. Defoliation of older norway spruce (*Picea abies* /L./ Karst.) stands in the polish sudety and carpathian mountains. *Forest Ecology and Management*, 181: 289-299.
 28. Nikula, S., Manninen, S., Vapaavuori, E., and Pulkkinen, P (2011) Growth, leaf traits and litter decomposition of roadside hybrid aspen (*Populus tremula* L.X *P. tremuloides* Michx.) clones. *Environmental Pollution*, 159: 1823-1830.
 29. Ozolincius, R., Stakenas, V., and Serafinavičiute, B (2005) Meteorological factors and air pollution in Lithuanian forests: Possible effects on tree condition. *Environmental Pollution*, 137: 587-595.

30. Pandey, J., and Agrawal, M (1994) Growth responses of tomato plants to low concentrations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide. *Scientia Horticulturae*, 58: 67-76.
31. Procházková, D. and Wilhelmová N (2011) Nitric oxide, reactive nitrogen species and associated enzymes during plant senescence. *Nitric Oxide*, 24: 61-65.
32. Rowland, A.J., Drew, M.C., and Wellburn, A.R (1987) Foliar entry and incorporation of atmospheric nitrogen dioxide into barley plants of different nitrogen status. *New Phytologist*, 107: 357-371.
33. Sakuraba, Y., Kim, Y., Yoo, S.C., Hörteneiner, S. and Paek, N.C (2013) 7-Hydroxymethyl chlorophyll a reductase functions in metabolic channeling of chlorophyll breakdown intermediates during leaf senescence. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 430: 32-37.
34. Sanz, M.J., Calatayud, V., and Calvo, E (2000) Spatial pattern of ozone injury in Aleppo pine related to air pollution dynamics in a coastal-mountain region of eastern Spain. *Environmental Pollution*, 108: 239-247.
35. Sarwat, M., Naqvi, A.R., Ahmad, P., Ashraf, M., and Akram, N.A (2013) Phytohormones and microRNAs as sensors and regulators of leaf senescence: Assigning macro roles to small molecules. *Biotechnology Advances*, 31(8): 1153-1171.
36. Service, U.F (2002) Phase 3 field guide - crowns: Measurements and sampling. USDA forest service. Url: [Http://fia.fs.fed.us/library/htmmanuals/](http://fia.fs.fed.us/library/htmmanuals/), (last date accessed: 3 November 2003).
37. Sharma, A.P., and Tripathi, B.D (2009) Biochemical responses in tree foliage exposed to coal-fired power plant emission in seasonally dry tropical environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 158: 197-212.
38. Thimann, K.V (1983) Senescence in plants. CRC press, 456pp.
39. Wagg, S., Mills, G., Hayes, F., Wilkinson, S., and Davies, W.J (2013) Stomata are less responsive to environmental stimuli in high background ozone in *Dactylis glomerata* and *Ranunculus acris*. *Environmental Pollution*, 175: 82-91.
40. Woo, H.R., Lim, P.O., Nam, H.G., and Noodén, L.D (2004) Genes that Alter Senescence. in Plant Cell Death Processes, Noodén, L.D (eds.), Academic Press, 73-87.
41. Yang, X., Song, J., Campbell-Palmer, L., Fillmore, S., and Zhang, Z (2013) Effect of ethylene and 1-MCP on expression of genes involved in ethylene biosynthesis and perception during ripening of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 78: 55-66.
42. Zierl, B (2004) A simulation study to analyse the relations between crown condition and drought in Switzerland. *Forest Ecology and Management*, 188: 25-38.