

پایش زیستی عناصر با پتانسیل سمیت با استفاده از شیمی نگاری درختی در برخی از مناطق استان اصفهان

علیرضا مرجوی^۱، محسن سلیمانی^{۲*}، نوراله میرغفاری^۳، حمیدرضا کریم زاده^۴ و سیدجمال الدین خواجه الدین^۵

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷)

چکیده

آلودگی محیط زیست یکی از ره‌آوردهای توسعه ناپایدار است که با افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی، صنعت و مصرف بیشتر سوخت‌های فسیلی بر شدت آن افزوده شده است. این پژوهش با هدف پایش عناصر با پتانسیل سمیت در برخی مناطق استان اصفهان، با روش شیمی‌نگاری درختی، با استفاده از حلقه‌های سالیانه تنه درخت کاج تهران (*Pinus eldarica*) انجام گرفت. درختانی با حداقل سن حدود ۵۰ سال در سه منطقه اصفهان، زرین‌شهر و اردستان انتخاب و سپس از سه اصله درخت در هر ایستگاه با استفاده از مته سال سنج نمونه‌برداری صورت گرفت. نمونه‌ها با فاصله زمانی ۱۰ سال جداسازی و برای اندازه‌گیری عناصر با پتانسیل سمیت استفاده شدند. ضخامت حلقه‌های رویشی گیاهان مورد استفاده در دهه‌های اخیر نسبت به دهه‌های قدیمی‌تر کاهش ۳۳، ۲۶ و ۲۲ درصدی را در اردستان، زرین‌شهر و اصفهان نشان داد. در اغلب نمونه‌های مربوط به شهر اصفهان و زرین‌شهر عامل غنی‌شدگی در حلقه‌های درختی بیشتر از یک بود و برای عناصر آهن، روی و کروم روند افزایشی را نسبت به زمان نشان داد. زیاد بودن غلظت آهن و سرب حلقه‌های درختی در زرین‌شهر و اصفهان، به خصوص در جدیدترین دهه زمانی را می‌توان به وجود و افزایش فعالیت‌های صنعتی مانند ذوب فلزات و ریخته‌گری، ارتباط داد.

واژه‌های کلیدی: پایش محیط زیست، آلودگی هوا، درخت کاج تهران، فلزات سنگین

۱. دانش‌آموخته دکتری دانشگاه صنعتی اصفهان و عضو هیات علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان،
۲. دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۳. استاد گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۴. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۵. استاد بازنشسته گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.soleimani@iut.ac.ir

مقدمه

پایش آلودگی‌ها محیط زیستی گزینه بسیار خوبی می‌تواند باشد (۸). سال‌هاست که از گیاهان به‌عنوان پایشگر زیستی واقعی آلودگی و به‌ویژه تجمع عناصر با پتانسیل سمیت در محیط استفاده شده است. گیاهان و از جمله درختان در مقابل گازهای آلوده‌کننده هوا واکنش نشان داده و گاهی منجر به حذف آن‌ها می‌شوند. غلظت عناصر با پتانسیل سمیت در اندام‌های درختان بیانگر غلظت این عناصر در محیط اطراف است (۱۹). بر همین اساس توجه به درختان به‌عنوان پایشگر زیستی می‌تواند اطلاعات جامعی را از وضعیت آلودگی‌های سال‌های گذشته در اختیار بشر قرار دهد (۴).

به‌طور کلی پایش زیستی به استفاده از موجودات زنده یا فراورده‌های زیستی به‌منظور به دست آوردن اطلاعات کمی از برخی از ویژگی‌های محیط‌زیست تعریف می‌شود. پایشگرهای زیستی را به دو گروه فعال و غیرفعال تقسیم می‌کنند. پایشگرهای زیستی فعال (مانند خزها و گل‌سنگ‌ها) به‌صورت ژنتیکی نسبت به آلاینده‌های هوا حساس هستند و از مناطق غیر آلوده به منطقه مطالعه جمع آوری یا کشت شده و مطالعه روی آن‌ها انجام می‌پذیرد. ولی به گیاهانی که به‌طور طبیعی در محدود مطالعاتی رشد می‌کند و یا وجود دارند مثل گیاهان بومی، باغی، زراعی و زینتی به‌عنوان منابع علمی در محدوده مطالعاتی مورد استفاده واقع می‌شوند پایشگر زیستی غیرفعال می‌گویند که می‌توان به برخی از گیاهان عالی نظیر درختان سپیدار (*Populus alba*)، کاج (*Pinus*)، نخل خرما (*Phoenix dactylifera*)، سنجد (*Elaeagnus angustifolia*)، انجیر (*Ficus carica*)، زبان‌گنجشک (*Fraxinus excelsior*)، سیب (*Malus*)، غان (*Betula*)، عرعر (*Ailanthus altissima*)، آقوی (*Sambucus ebulus*)، بلوط (*Quercus*)، تیریزی (*Populus nigra*) و افاقیا (*Robinia*) اشاره کرد. از اندام‌های هوایی این گیاهان مانند برگ، پوست و چوب آن‌ها برای پایش آلاینده‌ها استفاده شده است. اطلاعات حاصل از روش پایش زیستی بر اساس ایجاد هرگونه تغییر در رفتار پایشگر زیستی و یا تغییر در غلظت فاکتور پایشگر در اندام‌های مورد مطالعه آن استنباط

مشکلات آلودگی محیط‌زیست و بهداشت محیط خود را به‌عنوان بخشی از مشکلات جوامع صنعتی که کمتر به توسعه پایدار توجه کرده‌اند، نشان داده است (۱۱ و ۲۱). اگرچه تخریب اکولوژیکی محیط در درجه اول به‌صورت منطقه‌ای ظاهر می‌شود، ولی خود مقدمه‌ای برای چالش‌های گسترده جهانی است (۲۸). لذا برای تمدن‌های در حال پیشرفت، نظارت و ارزیابی ریسک آلاینده‌های محیط‌زیست اجتناب‌ناپذیر است (۱۴ و ۳۵). با توجه به پرهزینه و زمان‌بر روشهای معمول پایش و اندازه‌گیری آلاینده‌های محیط زیست (۲۲)، روش‌های پایش و نظارت غیرفعال مورد استقبال بیشتری واقع شده است، زیرا دارای هزینه کمتر و امکان انجام پایش برای مدت‌زمان طولانی‌تر بدون استفاده از دستگاه‌های گران‌قیمت و خاص را فراهم می‌کند (۹).

مناطق شهری حاوی طیف گسترده‌ای از عناصر با پتانسیل سمیت هستند که به‌اشتباه عموماً فلزات سنگین نام‌برده می‌شوند (۲۹). این آلاینده‌ها از فعالیت‌های مختلف صنعتی، شهری و کشاورزی و احتراق سوخت‌های فسیلی و همچنین فرایندهای طبیعی مانند گردوغبار می‌توانند منشأ گیرند. وجود غلظت زیاد این عناصر در محیط می‌تواند به‌سرعت بر جانوران و گیاهان تأثیرگذار باشد. درختان به‌عنوان بخش مهمی از گیاهان توانایی جذب این عناصر را دارا هستند و استفاده از آن‌ها به‌طور گسترده در مطالعات پایش زیستی مرسوم است (۱۸). از آنجایی که ثبت آلودگی‌های محیط‌زیست توسط بشر در نقاط مختلف دارای محدودیت‌های زمانی است، به‌منظور شناسایی و مطالعه تاریخچه تجمع آلودگی‌ها، روش‌های متعددی توسط دانشمندان مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این روش‌ها استفاده از یخچال‌های طبیعی و یا رسوبات دریا‌های دریاچه‌های به‌جای مانده از سالیان گذشته هستند. ولی این روش‌ها دارای محدودیت جغرافیایی است و در همه‌جا نمی‌توان استفاده نمود. برخلاف بایگانی‌های طبیعی فوق، درختان به‌عنوان گسترده‌ترین موجودات طبیعی در جهان برای

می‌شود. در صورت انتخاب پایشگر زیستی مناسب، مزایای استفاده از این روش در درجه اول مرتبط با حضور دائمی و رایج پایشگر در یک محیط، حتی در مناطق دورافتاده و سپس سهولت نمونه‌برداری و عدم نیاز به هرگونه تجهیزات فنی گران است. گونه‌های پایشگر در آلودگی هوا اغلب بر اساس معیارهایی چون منحصر به فرد بودن، نرخ‌های تجمع و یا نماینده خوب بودن از یک محل نمونه‌گیری انتخاب می‌شوند (۱۰).

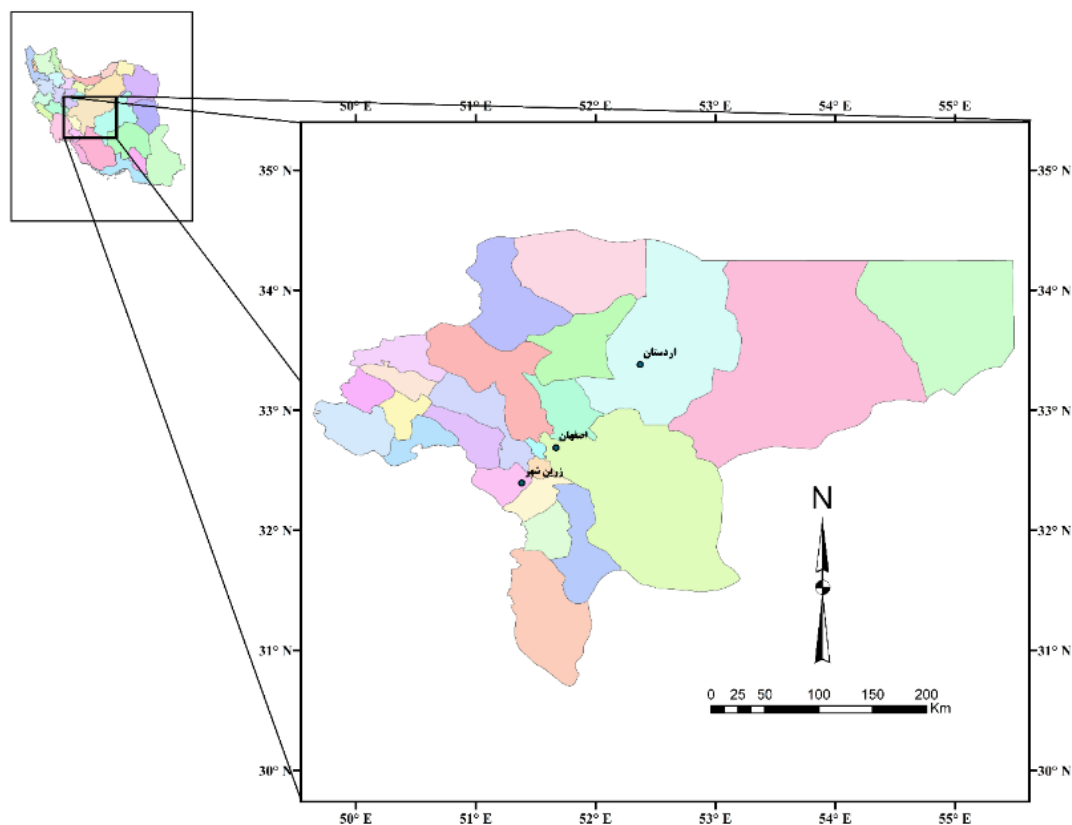
مطالعه و تحلیل حلقه‌های رشد سالانه درختان و استفاده از آن‌ها برای تعیین تغییرات اقلیمی در دوره‌های گذشته و تحقیقات باستان‌شناختی را شیمی نگاری درختی گویند. شیمی نگاری درختی موضوعی است که وقایع شیمیایی واقع شده بر درختان را در حلقه‌های رویش مورد جستجو قرار می‌دهد. حلقه‌های رویشی درختان به منظور بررسی اثر آلودگی حاصل از سوخت اتومبیل‌ها، کارخانه‌ها و سوخت‌های فسیلی مورد توجه محققان قرار گرفته است. گیاهان به دلیل نداشتن تحرک به طور کامل در معرض آلودگی قرار دارند. هرچند در حال حاضر می‌توان با استفاده از برخی از دستگاه‌ها، آلودگی‌های هوا، خاک و آب را اندازه‌گیری کرد، نمی‌توان گفت که چه مقدار از این آلودگی‌ها، جذب درختان شده و برای همیشه در بافت‌های چوبی آن‌ها تجمع یافته و در سال‌های گذشته تغییرات این آلودگی‌ها چگونه بوده است (۲۶). دانش شیمی نگاری درختی به‌ویژه استفاده از درختان رده مخروطیان (Pinophyta) از دهه ۱۹۷۰ میلادی به‌عنوان یک نشانگر زیستی برای تعیین آلودگی‌های محیط زیستی مورد توجه قرار گرفته است (۳۴). نتایج پژوهش‌های گذشته به امکان استفاده از پوست درخت کاج تهران (*Pinus eldarica*) برای تعیین منبع احتمالی تولید ترکیبات آروماتیک چند حلقه‌ای به‌عنوان دسته‌ای از آلاینده‌های آلی در هوا اشاره دارد (۱۳). همچنین پتانسیل استفاده از دوایر سالیانه درخت چنار (*Platanus orientalis*) برای بررسی الگوهای طولانی مدت اقلیمی در محیط‌های آبی بررسی شده است (۲۳). در روش‌های مورد استفاده برای شیمی نگاری درختی، به‌طور معمول نیاز به تهیه مقاطع درختی از طریق برش

و تهیه دیسک از تنه درختان است. در این روش، یا باید از درختانی که قبلاً قطع شده‌اند استفاده شود که ممکن است در منطقه مورد مطالعه در دسترس نباشند، یا نیاز به قطع درخت در منطقه مورد بررسی وجود دارد. این امر مستلزم آسیب به محیط‌زیست است و در بسیاری از موارد، امکان نمونه‌برداری را محدود می‌کند. برای غلبه بر این مشکل، از ابزاری به نام مته سال‌سنج استفاده می‌شود. این روش نمونه‌برداری علاوه بر اینکه یک نمونه‌برداری غیر مخرب به محیط‌زیست است (عدم برش یک درخت زنده)، آسیب به خود درخت نیز وارد نمی‌آورد و درخت قادر است به حیات خود ادامه دهد (۲۴). هر درخت سالیانه یک حلقه رویشی به مجموع حلقه‌های سالیانه خود اضافه می‌کند که با شمارش این حلقه‌ها نه تنها می‌توان سن درخت را تشخیص داد؛ بلکه با اندازه‌گیری پارامترهای هر حلقه رویشی شرایط محیطی تأثیرگذار بر تشکیل آن حلقه سالیانه را می‌توان بازسازی کرد. پهنای دوایر سالیانه به شرایط محیطی بستگی دارد. رطوبت کافی و فصل رشد طولانی به تولید دوایر پهن‌تر می‌انجامد درحالی‌که خشک‌سالی منجر به ایجاد دوایر باریک‌تر می‌شود (۲).

با توجه به مشکلات آلودگی محیط‌زیست در شهرهای صنعتی کشور، به‌ویژه کلان‌شهر اصفهان و نیاز به پایش آلودگی‌ها با روش‌های سازگار با محیط‌زیست و کم‌هزینه، این پژوهش با هدف بررسی آلودگی عناصر دارای پتانسیل سمیت، به‌عنوان بخشی از آلاینده‌های محیطی، با استفاده از حلقه‌های سالیانه درخت کاج تهران تعریف و اجرا شده است. همچنین، این پژوهش به بررسی تغییرات تاریخی آلاینده‌ها در دهه‌های گذشته و ارتباط آن‌ها با فعالیت‌های صنعتی و شهری در منطقه مورد مطالعه می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

کاج تهران یا کاج الدریکا (*P. eldarica*) به علت کشت زیاد آن در منطقه و همچنین به دلیل اینکه به‌عنوان یک‌گونه سوزنی‌برگ، همیشه‌سبز و داشتن برگ‌های ریز، سطح مقطع



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه‌برداری از حلقه‌های درختی کاج تهران در استان اصفهان

حلقه‌ها جز بنیان مطالعه محسوب می‌شود. بنابراین درختان هرچقدر مسن‌تر باشند بیشتر قادرند وضعیت گذشته خود را به نمایش بگذارند. لذا در این پژوهش سعی شد درختانی برای نمونه‌برداری انتخاب گردد که حداقل سن آن‌ها حدود ۵۰ سال باشند. هرچند که افزایش سالیانه قطر درختان و از جمله درخت کاج تهران بستگی به پارامترهای زیادی دارد، ولی بر اساس تحقیقات انجام‌گرفته متوسط رشد سالانه قطر درخت کاج تهران حدود ۵ میلی‌متر است (۱). برای درختی با سن ۵۰ سال، قطر برابر سینه آن ۲۵ سانتی‌متر و یا محیط آن ۷۸/۵ سانتی‌متر است. از طرفی به‌منظور یکسان بودن شرایط اقلیمی با توجه به نقشه طبقه‌بندی اقلیم استان به روش دومارتن (۱۵) و بر اساس نقشه وضعیت آلودگی هوا در استان اصفهان (۳۰) سه منطقه اصفهان، زرین‌شهر و اردستان انتخاب گردید که از لحاظ تقسیم‌بندی جزء مناطق خشک طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۱). در هر محل انتخاب‌شده تعداد سه عدد درخت سالم و دارای تاج و پوشش

بیشتری را در برابر آلاینده‌های هوا ایجاد می‌کند و حساسیت بیشتری نسبت به آلودگی هوا دارد، به‌عنوان گونه مناسب انتخاب شد. برای انجام کار باید کلیه عوامل مثل جنس و گونه درخت، سن درخت، شرایط اقلیمی محل زندگی درخت و شرایط دیگر مثل آبیاری و غیره یکسان باشند (۳۳). به عبارتی برای انتخاب نقاط نمونه‌برداری، محل‌های رشد مختلف باید از شدت آلودگی متفاوت اما از آب‌وهوای یکسان برخوردار باشند. پیدا کردن خاک‌های کاملاً یکسان از لحاظ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی حتی در یک منطقه و بافاصله کم، تقریباً کاری غیرممکن است. اقلیم یکسان عاملی است که به‌طور عمده باعث یکسان شدن رژیم حرارتی و رطوبتی خاک می‌شود. درعین‌حال سعی شد خاک محل نمونه‌برداری از لحاظ سری طبقه‌بندی خاک نیز یکسان انتخاب گردند. در مطالعات شیمی‌نگاری درختی به‌منظور درک تغییرات شیمیایی که در طول زندگی درخت اتفاق افتاده است برگشت به عقب روی

جدول ۱. نقاط نمونه برداری حلقه‌های درخت کاج تهران

شهرستان محل نمونه برداری	محل نمونه برداری	تاریخ نمونه برداری	محیط درخت (سانتیمتر)	موقعیت جغرافیایی محل نمونه برداری					
				عرض جغرافیایی (شمالی)		طول جغرافیایی (شرقی)			
				درجه	دقیقه	ثانیه			
	بیشه حبیب	۱۳۹۶/۷/۳۰	۱۴۷	۳۲	۳۸	۳۲/۴	۵۱	۳۸	۴۲
اصفهان	پارک مشتاق	۱۳۹۶/۸/۴	۱۶۸	۳۲	۳۸	۱۷/۵	۵۱	۴۱	۷/۱
	پارک شهید رجایی	۱۳۹۶/۸/۴	۱۶۱	۳۲	۳۹	۱۲/۴	۵۱	۴۰	۱۱/۷
			۱۵۳	۳۳	۲۲	۱۹/۱	۵۲	۲۲	۷/۸
اردستان	پارک کودک	۱۳۹۶/۸/۸	۱۶۳	۳۳	۲۲	۱۸/۳	۵۲	۲۲	۹/۴
			۱۵۱	۳۳	۲۲	۱۸/۳	۵۲	۲۲	۹/۴
			۱۶۰	۳۲	۲۳	۵۵/۸	۵۱	۲۲	۵۵/۶
زرین شهر	پارک لاله	۱۳۹۶/۸/۱۵	۱۵۲	۳۲	۲۳	۵۵/۸	۵۱	۲۲	۵۵/۶
			۱۸۰	۳۲	۲۳	۵۵/۸	۵۱	۲۲	۵۵/۶

متقارن و قطور از نوع درخت کاج تهران انتخاب شد. حلقه‌ها به وسیله مته سال سنج با سر فولادی ضدزنگ به قطر ۵ میلی‌متر و از ارتفاع ۱۳۰ سانتیمتری سطح زمین (سطح استاندارد برابرسینه) از تنه درختان خارج گردید. از هر درخت، دو نمونه به صورت عمود بر هم، یکی از جهت جنوب و دیگری از جهت شرق و در ارتفاع برابر با ارتفاع سینه (حدود ۱۳۰ سانتی‌متر) گرفته شد. نمونه‌ها از داخل مته به بیرون کشیده شد و در داخل محفظه‌های پلاستیکی قرار گرفت و کدگذاری گردید. قبل از نمونه برداری سطح خارجی تنه درختان برای اجتناب از آلودگی سطحی عناصر با پتانسیل سمیت روی مته سال سنج کاملاً با آب مقطر شستشو داده و بعد از خارج نمودن نمونه از تنه درختان، فضای خالی ایجادشده با پنبه و چسب باغبانی پر شد (۳، ۶). نمونه‌ها در مهر و آبان ۱۳۹۶ برداشت شدند. مشخصات نمونه برداری از حلقه‌های درختی در جدول ۱ ارائه شده است.

سطح خارجی همه نمونه‌های خارج شده به ترتیب با سمباده‌های زبر ۱۰۰ و نرم ۴۰۰ (تعداد ذرات خورنده در اینچ مربع) به منظور وضوح بیشتر حد بین چوب بهاره و تابستانه سائیده شد و با آب مقطر شسته شد و عملیات تاریخ گذاری زیر

بینوکولر و اندازه‌گیری ضخامت هر ده سال با استفاده از کولیس انجام گرفت (۳۱). با توجه به تاریخ گذاری‌های صورت گرفته نمونه‌های سونداژ در فاصله زمانی ۱۰ ساله با تیغ برش داده شد و در داخل محفظه‌های پلاستیکی قرار گرفت و کدگذاری گردید. قبل از آن، بافت آبکش یا کامبیوم (لایه زاینده بعد از پوست) و پوست (لایه رویی تنه درخت) از انتهای نمونه‌های سونداژ با تیغ برش، جدا گردید. دلیل این کار حضور چندین برابری فلزات سنگین در بافت آبکش نسبت به بافت چوب است (۷). نمونه‌ها تا حد امکان با استفاده از آسیاب برقی (جنس تیغه از فولاد ضدزنگ) پودر شد و برای تجزیه‌های شیمیایی مورد استفاده واقع شد. به منظور جلوگیری از انتقال هرگونه آلودگی در بین هر مرحله آماده‌سازی نمونه‌ها، تمامی وسایل نمونه برداری از قبیل مته سال سنج، تیغ برش، و محفظه آسیاب برقی با آب معمولی و آب مقطر شسته و پس از خشک شدن مجدداً مورد استفاده قرار گرفت.

برای هضم نمونه‌ها، از هر نمونه ۰/۲۵ گرم به ظروف پلاستیکی منتقل و با ۱۰ میلی‌لیتر محلول آکوارجیا (نسبت ۱ به ۳ اسید نیتریک غلیظ (۶۵٪ مرک) و اسید هیدروکلریک (۳۷٪ مرک)) روی هات‌پلیت در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به

مدت ۳ ساعت هضم شد.

تجزیه و تحلیل آماری

پس از خنک شدن، محتویات ظروف از فیلتر واتمن ۴۲ ساخته شده از الیاف سلولز ۹۸ درصد با قطر منافذ ۲/۵ میکرومتر عبور داده و استاندارد داخلی حاوی عنصر ایتريوم (Y) اضافه و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی لیتر رسانده شد. غلظت استاندارد داخلی هر نمونه برابر با ۱۰ میکروگرم بر لیتر بود. غلظت عناصر Pb, Cd, Ni, Cr, Al, Zn, Cu, Fe, Mn, As, Hg, Be, Ca, Mg با استفاده از طیف‌سنجی جرمی پلاسما جفت شده القایی (ICP-MS, Agilent 7700) اندازه‌گیری شد. هم‌زمان از نمونه‌های مرجع خاک در دسترس GSB-11 (GBW10020) و GSB-11 (GBW10021) برای ارزیابی صحت داده‌های اندازه‌گیری استفاده شد.

به منظور بررسی تغییرات و انجام تجزیه واریانس داده‌ها، نیاز بود که داده‌ها نرمال باشند. بدین منظور از آزمون کولموگراف - اسمیرنوف به تفکیک هر عنصر استفاده شد. برای مشخص کردن داده‌های پرت از مجموعه داده‌ها چارک اول و سوم و ۵۰ درصد داده‌ها، حد زیاد و کم برای هر عنصر مشخص شد. سپس داده‌هایی که بیشتر از حد زیاد و یا کوچک‌تر از حد کم بودند به عنوان داده پرت از مجموعه داده‌ها خارج شدند. از روش تبدیل جانسون برای نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شد. به منظور تجزیه واریانس و مقایسه میانگین تمامی داده‌ها نسبت به یکدیگر غلظت عناصر اندازه‌گیری شده مربوط به حلقه‌های درختی از آزمون فاکتوریل به صورت کاملاً تصادفی استفاده شد. در این آزمون دو فاکتور یکی موقعیت نمونه‌برداری که در سه سطح تعریف شده بودند و فاکتور دوم زمان (دهک‌های تفکیک شده طی ۵۰ سال گذشته) در پنج سطح مورداستفاده قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها در سطوح ۵، ۱ و ۰/۱ درصد به روش دانکن صورت پذیرفت. نرم‌افزارهای مورداستفاده جهت تجزیه‌های آماری عبارت بودند از Excel 2016 (تعیین نقاط پرت)، SPSS 18 (تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها) و Minitab 19 (تبدیل داده‌های غیر نرمال به نرمال با استفاده از تبدیل جانسون).

اندازه‌گیری عامل غنی‌شدگی

عامل غنی‌شدگی (Enrichment Factor, EF) جهت مشخص کردن طبیعی و یا انسانی بودن منشأ عناصر استفاده می‌شود. در محاسبه این ضریب از یک عنصر به عنوان مرجع (در این مطالعه عنصر Al بود) استفاده می‌گردد که دارای منشأ طبیعی باشد (۳۲). برای محاسبه این ضریب از معادله (۱) استفاده شد. در اکثر مطالعات فرض می‌گردد که منشأ Al به طور کامل از پوسته زمین است غلظت سایر عناصر نسبت به عنصر Al محاسبه می‌شود (۱۶).

$$EF = ([X] / [Ref]) / ([X] \text{ source} / [Ref] \text{ source})$$

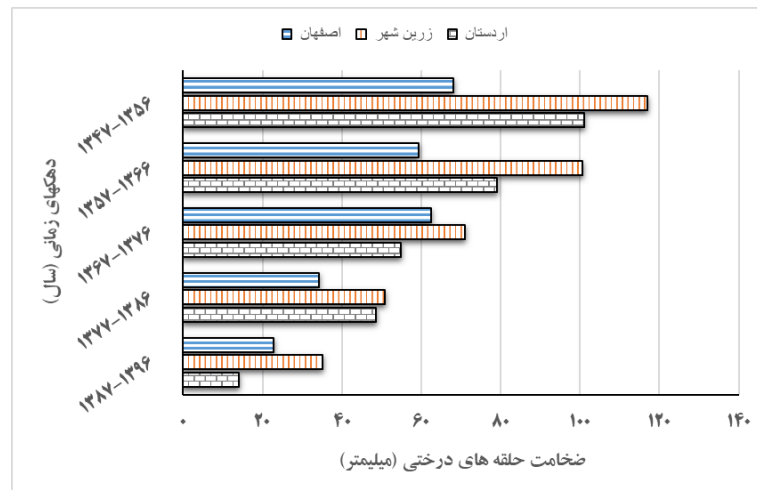
معادله (۱)

[X] غلظت عنصر موردنظر در نمونه، [Ref] غلظت عنصر رفرنس (Al) در نمونه، [X] source غلظت عنصر موردنظر در زمینه، [Ref] source غلظت عنصر رفرنس (Al) در زمینه

غلظت هر عنصر اندازه‌گیری شده در حلقه‌های درختی نسبت به غلظت همان عنصر در حلقه‌های پیش‌زمینه که در این مطالعه اردستان است در محاسبه این عامل استفاده شد. حد مجاز جهت میزان غنی‌شدگی در این مورد ۱ است که با افزایش از این میزان تأثیر فعالیت‌های انسانی مشخص می‌شود (۵).

نتایج و بحث

بر اساس محاسبات انجام گرفته در این مطالعه میانگین درصد کاهش ضخامت حلقه‌های درختان در مناطق مورد آزمایش اصفهان، زرین‌شهر و اردستان به ترتیب ۲۱/۶، ۲۵/۷ و ۳۳/۷ درصد برآورد شد. بیشترین و کمترین کاهش به ترتیب برای اردستان و اصفهان مشاهده شد. در تمام دهه‌های نمونه‌برداری از حلقه‌های درخت، سایت مطالعه زرین‌شهر دارای بیشترین ضخامت حلقه‌های درختی بود (شکل ۲). از آنجایی که درختان کاج تهران به عنوان درختان غیر مثمر در فضاهای پارک کشت می‌شوند، لذا میزان و دوره آبیاری آن‌ها را انسان مدیریت



شکل ۲. ضخامت دهک‌های حلقه‌های درختی تولیدشده در سه منطقه مورد مطالعه

جدول ۲. اثر متقابل مقدار غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در حلقه‌های درختی برای موقعیت و زمان

عنصر	موقعیت* زمان	عنصر	موقعیت* زمان
Fe	۰/۰۰۱**	Ni	۰/۰۰۹*
Cd	۰/۳۲۲	Al	۰/۰۰۱**
Pb	۰/۰۰۰۱***	Mg	۰/۰۰۲**
Cr	۰/۴۴۴	Ca	۰/۰۰۰۱***
Mn	۰/۰۰۱**	Be	۰/۰۰۰۱***
Zn	۰/۸۴۶	Hg	۰/۰۰۵*
Cu	۰/۰۰۰۱***	As	۰/۶۸۴

*، **، *** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح ۵، ۱ و ۰/۱ درصد

به طوری که بر اساس تجزیه‌های صورت گرفته از خاک سه موقعیت شوری خاک در منطقه اردستان حدود ۲ برابر بیشتر شوری خاک در اصفهان و زرین‌شهر است که این احتمالاً دلیل کاهش بیشتر شیب حلقه‌های درختی در اردستان نسبت به اصفهان، موارد فوق‌الذکر است.

مقایسه میانگین بین غلظت عناصر اندازه‌گیری شده از دو طرف هر درخت در هر منطقه نمونه‌برداری شده مشخص کرد هیچ اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشت؛ لذا برای محاسبات بعدی از میانگین آن‌ها استفاده شد.

جدول ۲ اثر متقابل غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در موقعیت‌های مختلف (اردستان، اصفهان و زرین‌شهر) و زمان

می‌کند. متأسفانه، با تداوم خشک‌سالی در دهه‌های اخیر، روند افزایش شوری خاک و آب در بسیاری از مناطق کشور شدت یافته است. این وضعیت نه تنها منجر به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن کاهش توان آبیاری فضای سبز در نقاط مختلف استان اصفهان شد، بلکه در نتیجه کف کنی چاه‌ها به منظور دسترسی بیشتر به آب، در اغلب موارد شوری و میزان املاح آب و به تبع آن شوری خاک افزایش یافت. این شرایط علاوه بر تنش خشکی که به دلیل کاهش بارش‌ها و افت سطح آب‌های زیرزمینی بر درختان وارد می‌شود، تنش شوری را نیز به آن‌ها تحمیل می‌کند. از طرفی اردستان در منطقه‌ای خشک‌تر و با طبیعت شورتری نسبت به شهر اصفهان واقع شده است

درختی تجمع بیشتری را از خود نشان دهد. طی تحقیقی در شهر آلیاگا در کشور ترکیه افزایش Fe و بعضی از عناصر با پتانسیل سمیت در هوای شهر و به تبع آن در حلقه‌های درختی به فعالیت صنعتی ذوب فلزات و پالایشگاه در این شهر ارتباط داده شد (۲۷).

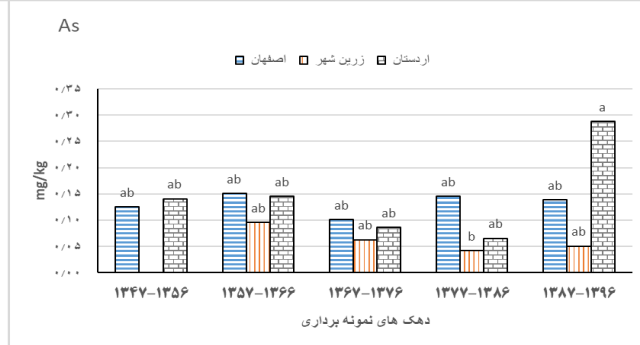
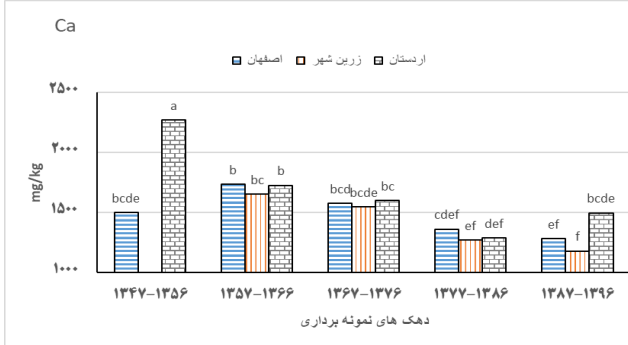
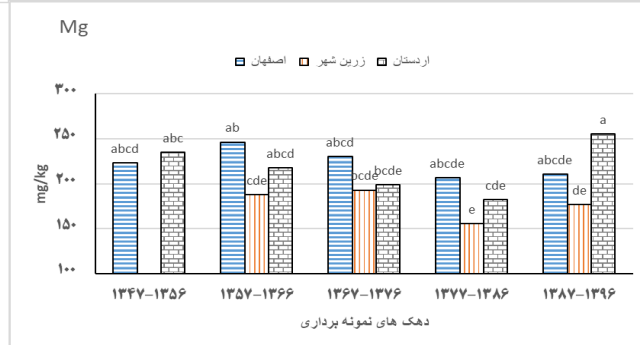
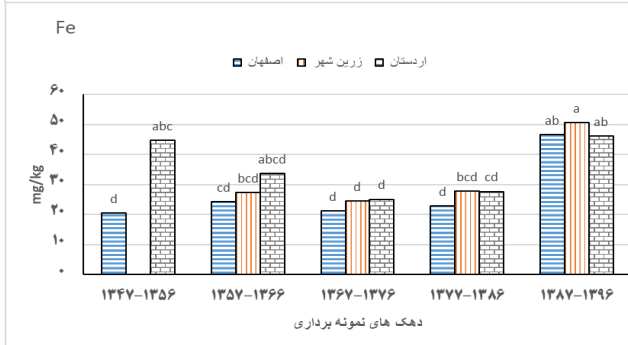
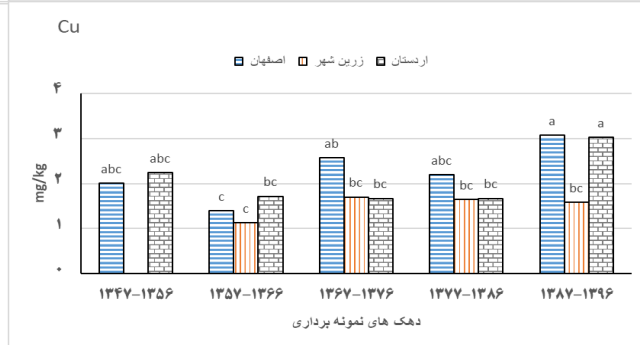
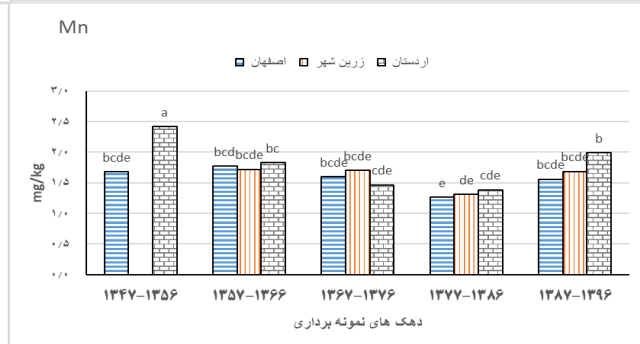
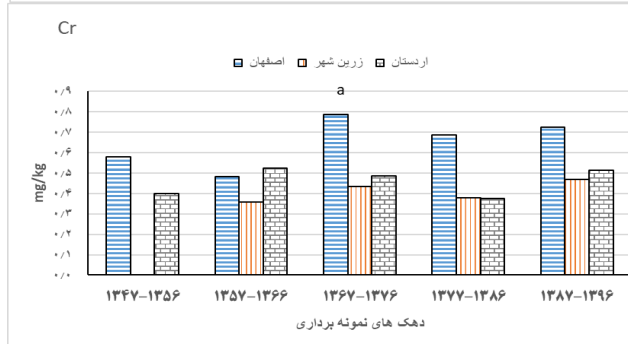
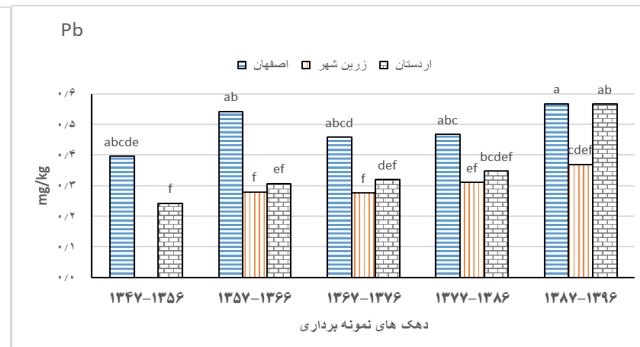
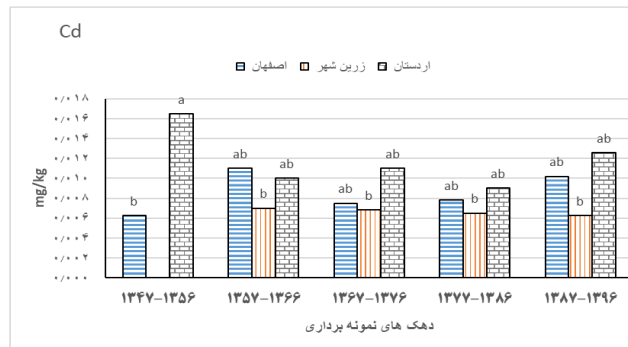
بررسی غلظت سرب در حلقه‌های درختی (شکل ۳، سرب) نشان داد که موقعیت اصفهان از همان دهه‌های گذشته بیشترین میزان غلظت سرب را به خود اختصاص داده بود و این روند، تغییر قابل ملاحظه‌ای در دهه‌های بعدی نداشته است. علی‌رغم اینکه در سال ۱۳۷۹ برنامه حذف سرب از بنزین در کشور رقم خورد و انتظار می‌رفت که در سال‌های بعدی غلظت سرب در حلقه‌های درختی کاهش یابد ولی شاید به دلیل افزایش تردد خودرو و رهاسازی سرب در اثر ساییش لاستیک و افزایش استفاده از خودروهای دیزلی برای حمل بار و نیز انتشار سرب از سایر منابع صنعتی به محیط، غلظت این عنصر در سال‌های بعد تغییر چندانی را نشان نداده است. حتی بیشترین غلظت سرب به‌طور مطلق در موقعیت اصفهان مربوط به دهه زمانی ۱۳۹۶-۱۳۸۷ که منتهی به آخرین دهه نمونه‌برداری بود. همین موضوع در مورد موقعیت زرین‌شهر و اردستان می‌تواند درست باشد. در دیگر عناصر روند خاصی مشاهده نشد. محققان در شهر سزیگد کشور مجارستان در یک مطالعه موردی روی حلقه‌های درختی درختان نمودار برگ درشت (*Tilia platyphyllos*) و شالک ایتالیایی (*Populus nigra ssp. Italica*) به این نتیجه رسیدند که برخی از آلودگی عناصر با پتانسیل سمیت مثل Pb و Cd بدون شک منشأ ترافیکی دارند، درحالی‌که برخی دیگر از آن‌ها مانند Cu و Zn از منابع دیگری سرچشمه می‌گیرند. درختان می‌توانند این عناصر را از طریق سیستم ریشه (حضور عنصر در آب‌های زیرزمینی) و یا برگ‌ها از طریق هوا جذب نمایند. با حذف سرب از بنزین در این شهر از سال ۱۹۹۹ میلادی و انحراف مسیر بین‌المللی وسایل حمل‌ونقل سنگین از سال ۲۰۱۱ میلادی به اطراف شهر، میزان Pb ناشی از بنزین و Cd ناشی از ساییش لنت‌های ترمز وسایل

(پنج دهک نمونه‌برداری شده) را نشان می‌دهد. از میان ۱۴ عنصر اندازه‌گیری شده، عناصر As, Zn, Cr, Cd اثر معنی‌داری از خود نشان نداده‌اند. فاصله اطمینان عناصری که معنی‌دار شده‌اند از ۹۵ تا ۹۹/۹ درصد متفاوت است. غلظت عناصر اندازه‌گیری شده Fe, Cd, Pb, Cr, Mn, Zn, Cu, As, Ni, Al, Mg, Ca, Be, Hg در دهک‌های نمونه‌برداری شده حلقه‌های درختی در سه موقعیت اصفهان، زرین‌شهر و اردستان با نمایش تفاوت آماری هر ستون نسبت به دیگر ستون‌ها در شکل ۳ ارائه شده است.

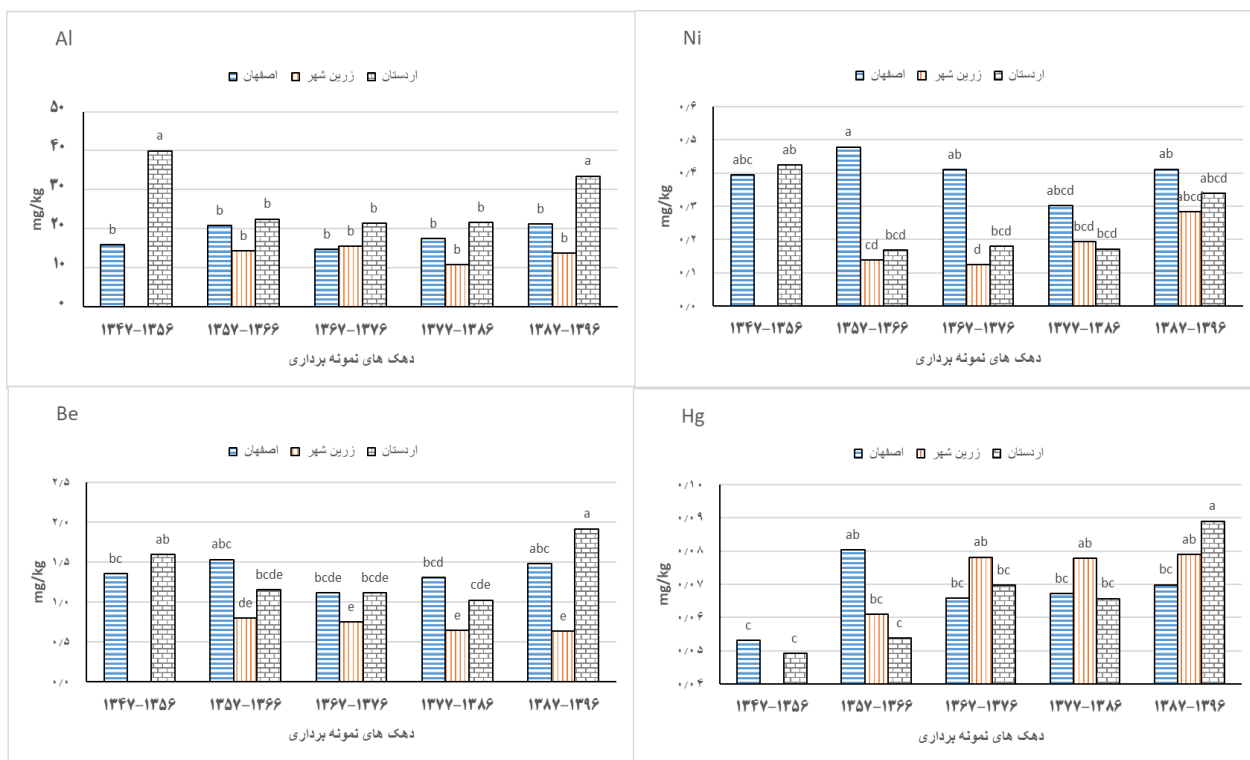
لازم به ذکر است به دلیل وجود تنها یک تکرار برای موقعیت زرین‌شهر و در دهک ۱۳۵۶-۱۳۴۷ و عدم امکان مقایسه میانگین این ستون با دیگر ستون‌های موجود که بیانگر میانگین تکرارهای متعددی هستند، ستون مربوطه برای تمامی عناصر در شکل حذف شد.

بررسی نمودار غلظت عنصر آهن (شکل ۳، آهن) نشان داد که در موقعیت، به‌استثنای دهه ۱۳۵۶-۱۳۴۷ که بین اردستان و اصفهان اختلاف معنی‌داری مشاهده شد که شاید دلیل آن نیز در ذرات اولیه خاک این دو موقعیت بوده، در بقیه موارد اختلاف معنی‌داری بین موقعیت‌ها در هر دهک زمانی وجود نداشت.

روند جذب عنصر آهن در حلقه‌های درختی از دهه‌های قدیمی‌تر به‌طرف دهه‌های جدیدتر روندی افزایشی را نشان داد. به‌طوری‌که در آخرین دهه زمانی ۱۳۹۶-۱۳۸۷ بیشترین غلظت آهن در حلقه‌های درختی در هر سه موقعیت ثبت شد و موقعیت زرین‌شهر علی‌رغم معنی‌دار نشدن غلظت آهن در آن با دیگر موقعیت‌ها، در آخرین دهه، بیشترین غلظت آهن را به خود اختصاص داد (شکل ۳). شاید یکی از دلایل آن وجود کارخانه‌های ذوب فلزی و فولادسازی در این موقعیت باشد که با فعالیت‌های صنعتی و انتشار این فلز در فضا و نهایتاً افزایش غلظت آن در خاک توسط بارندگی و فرونشست ذرات ریزشی باعث جذب توسط حلقه‌های درختی شده است. و یا احتمالاً به خاطر افزایش غلظت این عنصر در هوای این منطقه و جذب آن به‌صورت برگی اتفاق افتاده است و توانسته است در حلقه‌های



ادامه شکل ۳



شکل ۳ تغییرات غلظت عناصر مختلف در سه منطقه نمونه‌برداری حلقه‌های درختی از کاج تهران طی زمان. حروف مشترک روی ستون‌ها عدم تفاوت آماری معنی‌دار ($p > 0.05$) را نشان می‌دهد.

عناصر گوناگون حالت‌های مختلفی را از خود نشان می‌دهند. بعضی از آنها یک‌روند افزایشی را نسبت به زمان در دو موقعیت اصفهان و زرین‌شهر دارند که می‌توان به عناصر آهن (Fe)، روی (Zn) و کرم (Cr) اشاره کرد. همچنین عناصر کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg) و منگنز (Mn) فقط در موقعیت زرین‌شهر این روند افزایشی را نشان دادند. این روند افزایشی به‌استثنای دهه ۱۳۵۶-۱۳۴۷ بود. در موقعیت زرین‌شهر کارخانه ذوب‌آهن در سال ۱۳۴۶ تأسیس شده است که احتمالاً در دهه اول آن یکی از عوامل احتمالی است که می‌توانسته است نسبت عامل غنی‌شدگی را در این دهه افزایش دهد. سرب تنها عنصری است که یک‌روند کاهشی در موقعیت اصفهان را نشان می‌دهد که احتمالاً به دلیل عدم استفاده از سرب در بنزین تولیدی می‌تواند باشد.

شکل ۳ تغییرات غلظت عناصر مختلف در سه منطقه

نقلیه در حلقه‌های درختی به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرده است (۱۷). انتشار Cd در هوای شهرهای پرجمعیت به خاطر سایش و تعدد استفاده از ترمزهای وسایل نقلیه بسیار زیادتر از بزرگراه‌ها است (۱۲).

عامل غنی‌شدگی در حلقه‌های درختی

از آنجایی که موقعیت اردستان به‌عنوان محلی با آلودگی کم جهت مقایسه با دیگر نقاط اصفهان و زرین‌شهر در نظر گرفته شد از غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در حلقه‌های درختی این نقطه در محاسبات عامل غنی‌شدگی نقاط دیگر استفاده شد. حد نهایی عامل غنی‌شدگی در این حالت عدد یک است (۵). تقریباً در همه نمونه‌ها نسبت عامل غنی‌شدگی محاسبه‌شده در حلقه‌های درختی در دو موقعیت اصفهان و زرین‌شهر بیشتر از یک بود. روند تغییرات عامل غنی‌شدگی حلقه‌های درختی در

جدول ۳. ضریب همبستگی بین غلظت عناصر در دو موقعیت اصفهان و زرین شهر

زرین شهر												
As	Al	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Ni	Mn	Cr	Pb	Cd	
۰/۲۱۳	-۰/۱۴۷	-۰/۴۸۶**	-۰/۱۸۷	۰/۵۶۹**	۰/۰۷۵	۰/۰۰۱	۰/۱۹۷	-۰/۳۴۵	۰/۰۲۱	-۰/۲۹۳	۰/۱۴۲	Cd
-۰/۳۴۷	۰/۰۳۱	-۰/۲۹۴	-۰/۱۹۰	۰/۶۵۱**	۰/۰۲۳	۰/۰۰۷	۰/۳۸۴	-۰/۰۹۳	-۰/۰۰۷	۰/۰۴۶	۰/۲۷۷	Pb
-۰/۲۴۶	-۰/۰۹۷	-۰/۰۸۸	۰/۰۰۱	۰/۲۱۶	-۰/۱۶۶	۰/۰۴۰	۰/۲۳۴	-۰/۰۶۵	-۰/۲۶۵	۰/۰۰۴	-۰/۰۸۱	Cr
-۰/۲۶۹	-۰/۱۴۷	-۰/۲۹۶	-۰/۲۱۲	-۰/۰۴۰	-۰/۱۶۱	-۰/۳۶۲	-۰/۴۱۳	-۰/۱۴۴	-۰/۱۴۶	-۰/۴۰۶	-۰/۳۸۱	Mn
۰/۲۰۵	-۰/۰۴۹	-۰/۰۴۶	-۰/۴۴۷**	۰/۳۴۳	۰/۱۰۵	-۰/۳۴۷	-۰/۰۵۵	-۰/۰۵۰	۰/۱۴۱	۰/۳۲۴	-۰/۳۵۲	Ni
-۰/۱۹۹	-۰/۰۵۳	-۰/۲۷۵	-۰/۳۲۱	۰/۳۶۰	۰/۰۰۸	-۰/۰۹۵	۰/۱۰۰	-۰/۲۹۷	-۰/۰۰۱	-۰/۲۵۰	-۰/۱۰۲	Zn
-۰/۳۳۰	-۰/۲۳۶	-۰/۲۱۲	۰/۰۷۸	۰/۳۰۵	-۰/۳۵۶	۰/۱۵۰	۰/۲۲۲	-۰/۰۰۸	-۰/۲۸۲	-۰/۰۸۶	۰/۰۳۱	Cu
-۰/۱۹۷	۰/۰۱۲	-۰/۳۱۰	-۰/۲۶۳	۰/۶۴۷**	۰/۰۹۸	-۰/۲۸۵	۰/۳۱۹	-۰/۰۷۹	-۰/۱۳۴	-۰/۰۶۹	۰/۱۳۳	Fe
-۰/۱۰۴	-۰/۰۵۰	-۰/۰۰۲	-۰/۳۸۹	۰/۰۶۳	۰/۰۹۲	-۰/۳۴۵	-۰/۲۶۲	-۰/۱۶۰	۰/۰۱۷	۰/۰۸۸	-۰/۲۶۷	Mg
۰/۳۹۸	-۰/۰۴۴	۰/۲۵۵	۰/۰۹۶	-۰/۱۷۹	-۰/۱۰۰	-۰/۰۰۲	-۰/۴۴۴*	-۰/۱۳۶	-۰/۱۱۹	-۰/۱۴۹	-۰/۱۷۱	Ca
۰/۷۶۶**	-۰/۱۳۵	-۰/۳۰۹	-۰/۲۳۹	۰/۵۵۰**	۰/۱۲۵	-۰/۱۷۵	۰/۲۶۲	-۰/۳۴۵	-۰/۰۸۵	-۰/۲۱۹	۰/۱۱۳	Al
۰/۷۵۷**	-۰/۱۱۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۸۶	-۰/۰۵۳	-۰/۲۸۶	-۰/۰۶۳	-۰/۱۸۵	-۰/۰۷۵	-۰/۲۹۳	۰/۱۱۷	۰/۰۲۹	As

اصفهان

کشور مکزیک در منطقه سن لوئیس پوتوسی (San Luis Potosi) که یکی از مناطق صنعتی است همخوانی دارد (۵). همچنین همبستگی معنی دار عنصر آهن در نمونه های زرین شهر نسبت به عناصر کادمیم و سرب می تواند به منبع انتشار یکسان این عناصر در موقعیت اصفهان اشاره داشته باشد. نتایج پژوهش های دیگر نشان می دهد که منشأ آلودگی عناصر Pb, Cr, Ni, Cu, Zn در هوا از منابع مختلف صنعتی و ترافیکی می تواند باشد (۵, ۲۰, ۲۵).

نتیجه گیری

برآورد درصد کاهش ضخامت حلقه های درختی طی دهه های مورد مطالعه مشخص کرد که سرعت این کاهش به طور میانگین به ترتیب مربوط به اردستان با ۳۳/۷ درصد، زرین شهر با ۲۵/۷ درصد و اصفهان با ۲۱/۶ درصد بود که نشان از شرایط نامساعد اقلیمی برای این مناطق را دارد. به این معنی که شرایط نامساعد برای رشد حلقه های درختی در اردستان بیشترین سهم و در اصفهان کمترین سهم را به خود اختصاص داده است. تغییر اقلیم در جهان و منطقه مطالعاتی و به تبع آن کاهش نزولات جوی و کاهش منابع آب در دسترس، به احتمال زیاد عاملی برای

نمونه برداری حلقه های درختی از کاج تهران طی زمان. حروف مشترک روی ستون ها عدم تفاوت آماری معنی دار ($p > 0.05$) را نشان می دهد.

در غنی شدگی گروهی دیگر از عناصر روند خاصی دنبال نمی شود، مثل Ni, As, Cd, Cu در هر دو موقعیت یا Mn, Mg, Ca فقط در موقعیت اصفهان و یا Pb فقط در موقعیت زرین شهر. با به دست آوردن ضریب همبستگی پیرسون بین غلظت هر عنصر در حلقه های درختی و در دو موقعیت اصفهان و زرین شهر (جدول ۳) مشخص شد که از بین تمامی عناصر تنها عنصری که دارای ضریب نسبتاً زیادی و معنی داری بود عنصر Fe است ($r = 0.7647$ و $p < 0.001$). این موضوع بیانگر این است که منشأ این عنصر در هر دو موقعیت از یکجا منشأ گرفته است؛ لذا می توان چنین استنباط کرد از آنجایی که موقعیت زرین شهر در جنوب غربی شهر اصفهان واقع شده و باد غالب نیز از همین مسیر می گذرد با تولید و انتشار عنصر آهن در اثر فعالیت تولید کارخانه های ذوب فلزی و تولید آهن و فولاد خصوصاً کارخانه ذوب آهن واقع در زرین شهر عنصر Fe در سطح شهر اصفهان نیز آمده و توانسته طی سالیان جذب درختان موجود در اصفهان نیز شود. این نتیجه با نتایج به دست آمده در

داشت که می‌تواند دلیل منشأ یکسان این عنصر در هر دو موقعیت باشد. با توجه به‌قرار گرفتن زرین‌شهر در جنوب غربی شهر اصفهان و وزش باد غالب در همین مسیر می‌توان نتیجه گرفت که تولید و انتشار این عنصر در هوای شهر زرین‌شهر در اثر فعالیت کارخانه ذوب‌آهن توانسته است هوای شهر اصفهان را نیز متأثر نماید و باعث انتقال و جذب این عنصر در حلقه‌های درختی شهر اصفهان از همین منبع شود. وجود ضریب همبستگی مثبت و معنی‌دار بین زوج عناصر Cu و Cr در دو موقعیت اصفهان و زرین‌شهر بیانگر منشأ انسان‌زاد بودن این عناصر است که بر اساس منابع در اثر فعالیت حمل‌ونقلی تولید می‌شوند. با وجود پتانسیل قابل‌توجه روش شیمی‌نگاری درختی برای پایش عناصر با پتانسیل سمیت در منطقه، استفاده هم‌زمان از روش‌های دقیق‌تر مانند روش‌های ایزوتوپی می‌تواند به بررسی بهتر یافته‌ها کمک نماید که برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

از آقای دکتر لیبینگ فنگ عضو هیئت‌علمی آکادمی علوم گوانگدونگ چین برای کمک در آنالیز شیمیایی عناصر قدردانی می‌شود.

روند کاهشی ضخامت حلقه‌های درختی در دهه‌های اخیر نسبت به دهک‌های قدیمی‌تر شده است. غلظت آهن و سرب در حلقه‌های درختی از دهه‌های گذشته (دهه ۱۳۵۶-۱۳۴۷) تا آخرین دهه نمونه‌برداری شده (دهه ۱۳۹۶-۱۳۸۷) روند افزایشی نشان داد که بیشتر بودن غلظت آهن حلقه‌های درختی در زرین‌شهر و سرب در اصفهان شاید به دلیل وجود فعالیت‌های صنعتی مانند ذوب فلزات، ریخته‌گری، حمل‌ونقل و احتراق سوخت‌های فسیلی باشد. بررسی جذب عناصر در حلقه‌های درختی نشان داد که عنصر Fe در سه موقعیت مورد بررسی به‌ویژه در آخرین دهه نمونه‌برداری شده (دهه ۱۳۹۶-۱۳۸۷) بیشترین مقدار را در موقعیت زرین‌شهر داشته است. احتمالاً فعالیت کارخانه ذوب‌آهن در زرین‌شهر عاملی شده که میزان جذب این عنصر در حلقه‌های درختی در موقعیت زرین‌شهر را نسبت به دو موقعیت دیگر افزایش داده است. محاسبه عامل غنی‌شدگی در حلقه‌های درختی با مبنا قرار گرفتن موقعیت اردستان نشان داد که عنصر Pb تنها عنصری بود که یک‌روند کاهشی در موقعیت اصفهان داشت. این موضوع می‌تواند به علت حذف انتشار سرب از بنزین وسایل نقلیه در سالیان اخیر باشد. عنصر آهن تنها عنصری بود که در دو موقعیت اصفهان و زرین‌شهر ضریب همبستگی نسبتاً زیادی

منابع

1. Abdollah-Zade, B., M. Tabari, K. Sagheb-Talebi and M. Zobeiri. 2003. Response of diameter and height of *Pinus eldarica* Medw. to slope and aspect variations in Lavizan Forest Park. *Pajouhesh & Sazandegi* 16(60): 30-35. (In Persian).
2. Avestakh, E., J. Sosani, L. Porsartip and B. Pilevar. 2014. The impact of drought on reducing forest growth and environmental degradation. In: Proceeding of First National Conference of Geography, Urban Planning and Sustainable Development; Tehran, Iran. (In Persian).
3. Baes III, C. and S. McLaughlin. 1986. Multielemental analysis of tree rings: a survey of coniferous trees in the Great Smoky Mountains National Park. [*Picea rubens*; *Abies fraseri*; *Tsuga canadensis*; *Pinus rigida*; *Pinus strobus*]. Oak Ridge National Lab., TN (USA). Available online at: <https://www.osti.gov/biblio/6039877>. Accessed 01 January 1986.
4. Baldantoni, D., F. De Nicola and A. Alfani. 2014. Air biomonitoring of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons near a cement plant. *Atmospheric Pollution Research* 5(2):262-269.
5. Beramendi-Orosco, L., M. Rodriguez-Estrada, O. Morton-Bermea, F. Romero, G. Gonzalez-Hernandez and E. Hernandez-Alvarez. 2013. Correlations between metals in tree-rings of *Prosopis juliflora* as indicators of sources of heavy metal contamination. *Applied Geochemistry* 39:78-84.
6. Berish, C. and H. Ragsdale. 1985. Chronological sequence of element concentrations in wood of *Carya* spp. in the southern Appalachian Mountains. *Canadian Journal of Forest Research* 15(3):477-483.

7. Cutter, B. E. and R. P. Guyette. 1993. Anatomical, chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies. Wiley Online Library, Report No: 0047-2425. Available online at: <https://www.osti.gov/biblio/283030>. Accessed 01 July 1993.
8. Doucet, A., M. M. Savard, C. Bégin, J. Marion, A. Smirnoff and T. B. Ouarda. 2012. Combining tree-ring metal concentrations and lead, carbon and oxygen isotopes to reconstruct peri-urban atmospheric pollution. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64(1):19005.
9. Dytłow, S. and B. Górka-Kostrubiec. 2019. Effective and universal tool for evaluating heavy metals—passive dust samplers. *Environmental Pollution* 247:188-194.
10. Ghasemi, M. 2016. Biological monitoring of heavy metal pollution in the air of urban areas using tree species (case study: Arak city). MSc thesis. Arak University, Iran. (In Persian).
11. Goossens, J., A. C. Jonckheere, L. J. Dupont and D. M. Bullens. 2021. Air pollution and the airways: lessons from a century of human urbanization. *Atmosphere* 12(7):898.
12. Grigoratos, T. and G. Martini. 2015. Brake wear particle emissions: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 22:2491-2504.
13. Hasheminejad, S., H. Moradi and M. Soleimani. 2024. Potential of *Pinus eldarica* Medw. tree bark for biomonitoring polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. *Scientific Reports* 14(1):6259.
14. Hernández-Gordillo, A., S. Ruiz-Correa, V. Robledo-Valero, C. Hernández-Rosales and S. Arriaga. 2021. Recent advancements in low-cost portable sensors for urban and indoor air quality monitoring. *Air Quality, Atmosphere & Health* 1-21.
15. Kiani, G. and N. Akbari. 2014. The study of land use and the strategic document for the development of Isfahan province -Keshavarzi Isfahan Governorate Planning and Employment Deputy, Isfahan Scientific and Research Town. 706p. (In Persian)
16. Kim, N. K., H. J. Park and Y. P. Kim. 2009. Chemical composition change in TSP due to dust storm at Gosan, Korea: do the concentrations of anthropogenic species increase due to dust storm? *Water, Air, and Soil Pollution* 204: 165-175.
17. Kiss, T., I. Fekete and I. Tápai. 2019. Environmental status of a city based on heavy metal content of the tree-rings of urban trees: case study at Szeged, Hungary. *Journal of Environmental Geography* 12(1-2): 13-22.
18. Kompiš, M. and Z. K. Ballová. 2021. The influence of preferred habitat and daily range of the European hare on its contamination by heavy metals: a case study from the West Carpathians. *Environmental Science and Pollution Research* 28(37): 52093-52105.
19. Kord, B. and B. Kord. 2011. Heavy metal levels in pine (*Pinus eldarica*.) tree barks as indicators of atmospheric pollution. *BioResources* 6(2): 927-935.
20. Li, X., S. L. Lee, S. C. Wong, W. Shi And I. Thornton. 2004. The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach. *Environmental Pollution* 129(1): 113-124.
21. Mifsud, D. V., E. E. Stüeken and R. J. Wilson. 2021. A preliminary study into the use of tree-ring and foliar geochemistry as bio-indicators for vehicular NOx pollution in Malta. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 57(3): 301-315.
22. Miličević, T., M. Aničić Urošević, D. Relić, G. Jovanović, D. Nikolić, K. Vergel and A. Popović. 2021. Environmental pollution influence to soil–plant–air system in organic vineyard: bioavailability, environmental, and health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 3361-3374.
23. Mirzakhani, M., Moradi, H., Therrell, M., Seim, A., Yousefpour, R., Safari, E., Pourtahmasi, K., Tegel, W., Nemati Varnosfaderany, M., Kahle, H. P. 2024. The dendroclimatic and dendrohydrologic potential of riparian plane trees (*Platanus orientalis*) along the Zayandeh-Rud River, Iran. *Dendrochronologia*, 86: 126228.
24. Mohammadpour, M. 2014. Dendrochemical studies for environmental pollution investigation. MSc thesis. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian).
25. Morton-Bermea, O., E. Hernández-Álvarez, G. González-Hernández, F. Romero, R. Lozano and L. E. Beramendi-Orosco. 2009. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City. *Journal of Geochemical Exploration* 101(3): 218-224.
26. Muñoz, A. A., K. Klock-Barría, P. R. Sheppard, I. Aguilera-Betti, I. Toledo-Guerrero, D. A. Christie, T. Gorena, L. Gallardo, Á. González-Reyes, et al. 2019. Multidecadal environmental pollution in a mega-industrial area in central Chile registered by tree rings. *Science of the Total Environment* 696: 133915.
27. Odabasi, M., D. Tolunay, M. Kara, E. O. Falay, G. Tuna, H. Altiok, Y. Dumanoglu, A. Bayram and T. Elbir. 2016. Investigation of spatial and historical variations of air pollution around an industrial region using trace and macro elements in tree components. *Science of the Total Environment* 550: 1010-1021.
28. Rehman, A., H. Ma and I. Ozturk. 2021. Do industrialization, energy importations, and economic progress influence carbon emission in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 45840-45852.

29. Rostami, S., H. Kamani, S. Shahsavani and M. Hoseini. 2021. Environmental monitoring and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 27(2): 392-404.
30. Soffianian, A. and N. Akbari. 2014. The study of land use and the strategic document for the development of Isfahan province: Environment and natural resources. Isfahan Governorate Planning and Employment Deputy, Isfahan Scientific and Research Town. 516p. (In Persian).
31. Saftari, V., D. Parsapajoh and A. Hemasi. 2006. Dendrochemistry study to investigate the effects of Tehran air pollution on *Pinus eldarica*. *Environmental Science and Technology*. 3:48-65. (In Persian).
32. Senaratne, I. and D. Shooter. 2004. Elemental composition in source identification of brown haze in Auckland, New Zealand. *Atmospheric Environment* 38(19): 3049-3059.
33. Sensuła, B. M. 2016. The impact of climate, sulfur dioxide, and industrial dust on δ 18 O and δ 13 C in glucose from pine tree rings growing in an industrialized area in the southern part of Poland. *Water, Air, & Soil Pollution* 227: 1-13.
34. Smith, W. H. 1972. Lead and mercury burden of urban woody plants. *Science* 176(4040): 1237-1239.
35. Yılmaz, D. and Ö. Işınkaralar. 2021. Climate action plans under climate-resilient urban policies. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences* 7(2): 140-147.

Biomonitoring of Potentially Toxic Elements Using Dendrochemistry in Some Areas of Isfahan Province

A. Marjovvi¹, M. Soleimani^{2*}, N. Mirghaffari³, H. Karimzadeh⁴ and S. J. Khajeddin⁵

(Received: September 26-2024; Accepted: November 17-2024)

Abstract

Environmental pollution is one of the consequences of unsustainable development, which has been intensified by population growth, urban expansion, industrialization, and the consumption of fossil fuels. This research aims to monitor potentially toxic elements (PTEs) in some areas of Isfahan province using a dendrochemistry approach, which analyzes the annual core rings of Tehran pine tree (*Pinus elderica*). Trees with a minimum age of about 50 years were selected in three regions including Isfahan, Zarinshahr and Ardestan, and then sampling was conducted on three trees in each station using an increment borer. The samples were separated with a time interval of 10 years and analyzed to measure the elements with potential toxicity. The thickness of the growth core rings of plants in recent decades has decreased by 33, 26 and 22% in Ardestan, Zarinshahr and Isfahan, respectively, compared to earlier decades. In most samples, the enrichment factor calculated from tree rings in the two locations of Isfahan and Zarinshahr was greater than one and an increasing trend over time was observed for Fe, Zn and Cr elements. The higher concentration of Fe and Pb in tree rings of Zarinshahr and Isfahan, especially in the most recent decade, could be related to the existence and expansion of industrial activities such as metal smelting and casting.

Keywords: Environmental monitoring, Air pollution, Tehran pine tree, Heavy metals.

1. PhD Graduate of Isfahan University of Technology. Academic member of Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Isfahan, Iran
 2. Assoc.Prof., Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
 3. Prof., Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
 4. Assoc.Prof., Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
 5. Emeritus Prof., Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- *: Corresponding Author, Email: m.soleimani@iut.ac.ir