



اهمیت استفاده از گیاهان با قابلیت گیاه پالایی در فضای سبز شهری

علیرضا عاقلی^۱، سمیرا حیدری^{۲*}، سعیده طوافی^۳، شهرام چراچی^۴، طاهره مسلمی کلوانی^۵

۱- کارشناس ارشد عمران، سازمان سیما منظر و فضای سبز کرج

۲- دکتری حشره شناسی (اکولوژی و کنترل بیولوژیک)، سازمان سیما منظر و فضای سبز کرج

۳- دکتری مرتعداری، سازمان سیما منظر و فضای سبز کرج

۴- کارشناس ارشد عمران، سازمان سیما منظر و فضای سبز کرج

۵- دکتری مهندسی علوم خاک گرایش شیمی و حاصلخیزی، سازمان سیما منظر و فضای سبز کرج

*ایمیل نویسنده مسول: Heydarisamira97@gmail.com

چکیده

با افزایش روزافزون آلودگی‌های محیطی، به‌ویژه در مناطق شهری که تمرکز جمعیت و فعالیت‌های صنعتی در آن‌ها بیشتر است، یافتن روش‌های پایدار برای مقابله با این آلودگی‌ها به یکی از ضرورت‌های زیست‌محیطی تبدیل شده است. گیاه‌پالایی به‌عنوان یکی از روش‌های نوین و طبیعی برای کاهش آلودگی‌های محیطی شناخته می‌شود. گیاهان با قابلیت گیاه‌پالایی قادرند آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین، مواد آلی سمی، آلاینده‌های هوا و حتی آلودگی‌های آب و خاک را جذب و یا به فرآیندهای طبیعی تبدیل کنند که منجر به کاهش اثرات منفی آن‌ها بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان‌ها می‌شود. فضاهای سبز شهری، به‌ویژه در شهرهای بزرگ و صنعتی، به‌عنوان بستری مناسب برای استفاده از گیاهان با قابلیت گیاه‌پالایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این فضاها نه تنها می‌توانند نقش مهمی در کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت زندگی شهری ایفا کنند، بلکه به‌عنوان مکانی برای استفاده از گیاهان برای تصفیه آلودگی‌ها نیز عمل می‌کنند. در این مقاله، پس از معرفی مفاهیم و مبانی نظری گیاه‌پالایی، انواع مختلف گیاهان با قابلیت گیاه‌پالایی و مکانیسم‌های عملکرد آن‌ها بررسی می‌شود. همچنین، به تحلیل تجربیات موفق گیاه‌پالایی در فضاهای سبز شهری پرداخته و نمونه‌های مختلف ملی و بین‌المللی در این زمینه مورد بحث قرار می‌گیرند. و پیشنهادات مختلفی برای بهبود روند استفاده از گیاه‌پالایی در فضاهای سبز شهری ارائه خواهد شد. این مقاله تلاش دارد تا با بررسی مفاهیم علمی و تجربیات موجود، اهمیت استفاده از گیاهان با قابلیت گیاه‌پالایی در فضاهای سبز شهری را به‌عنوان یک راه‌حل پایدار برای بهبود کیفیت محیط‌زیست شهری و مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی موجود معرفی کند.

واژه‌های کلیدی: گیاه‌پالایی، فضای سبز شهری، آلودگی‌های محیطی، گیاه‌پالایی شهری، فناوری‌های سبز، پایداری محیط‌زیست

۱- مقدمه

در دنیای امروز، مشکلات زیست‌محیطی به‌ویژه در مناطق شهری، به یکی از دغدغه‌های اصلی جوامع انسانی تبدیل شده است. رشد سریع شهرنشینی، گسترش بی‌رویه فعالیت‌های صنعتی و حمل و نقل، افزایش جمعیت و تولید زباله‌های صنعتی، منجر به بروز انواع مختلف آلودگی‌ها در محیط‌های شهری شده است. از جمله این آلودگی‌ها می‌توان به آلودگی هوا، خاک، و منابع آبی اشاره کرد که اثرات منفی عمیقی بر سلامت انسان‌ها، تنوع زیستی و اکوسیستم‌های شهری دارند [۱]. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی [۲]، آلودگی هوا در مناطق شهری به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه به‌طور مستقیم باعث افزایش مشکلات تنفسی و بیماری‌های قلبی می‌شود.

فضای سبز شهری، به‌عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در مقابله با این آلودگی‌ها شناخته شده است. فضای سبز می‌تواند نقش کلیدی در کاهش میزان آلاینده‌های محیطی، بهبود کیفیت هوا و ایجاد محیطی سالم‌تر برای زندگی شهروندان ایفا کند. یکی از روش‌های نوین و پایدار برای مقابله با آلودگی‌های محیطی استفاده از گیاهان با قابلیت گیاه‌پالایی است. گیاه‌پالایی یک فرآیند طبیعی است که در آن گیاهان از توانایی خود برای جذب، تثبیت و تجزیه آلاینده‌های مختلف مانند فلزات سنگین،



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

مواد آلی سمی، و آلودگی‌های هوا و آب استفاده می‌کنند [۳]. این روش به‌عنوان یک تکنولوژی سبز، توانسته است در بسیاری از نقاط جهان به‌ویژه در فضاهای سبز شهری برای کاهش آلودگی‌ها به‌کار گرفته شود [۴].

گیاه‌پالایی با استفاده از گیاهان، به‌ویژه گونه‌هایی که توانایی جذب آلاینده‌ها را دارند، به فرآیندی مؤثر در تصفیه آلودگی‌ها تبدیل شده است. از جمله گیاهانی که به‌طور خاص در تصفیه فلزات سنگین و مواد شیمیایی سمی از خاک و آب مؤثر هستند، می‌توان به گیاهان خانواده کلم‌ها و خردل‌ها اشاره کرد که در بسیاری از مطالعات نشان داده شده است که قابلیت بالایی در جذب فلزات سنگین دارند [۵]. این گیاهان قادرند فلزات سمی مانند کادمیوم، سرب، و روی را از خاک جذب کرده و در بافت خود ذخیره کنند، که این ویژگی به‌ویژه در مناطق آلوده به فلزات سنگین اهمیت ویژه‌ای دارد [۶]. علاوه بر این، گیاهان با قابلیت گیاه‌پالایی می‌توانند در تصفیه آلاینده‌های آلی سمی مانند آفت‌کش‌ها و هیدروکربن‌های نفتی نیز نقش داشته باشند.

از سوی دیگر، فضاهای سبز شهری به‌عنوان بستر مناسبی برای استفاده از گیاهان با قابلیت گیاه‌پالایی در نظر گرفته می‌شوند. این فضاها نه تنها به بهبود کیفیت هوا و کاهش آلودگی‌های صوتی کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند به‌عنوان مکانی برای استفاده از گیاهان در فرآیندهای طبیعی تصفیه آلودگی‌ها عمل کنند. به‌عنوان مثال، پروژه‌های گیاه‌پالایی در شهرهای مختلف جهان مانند نیویورک، توکیو و لندن نشان داده‌اند که با کاشت گیاهان مناسب، می‌توان کیفیت هوای شهری را بهبود بخشید و میزان آلاینده‌های موجود در محیط‌های شهری را کاهش داد [۷ و ۸]. این پروژه‌ها همچنین تأثیرات مثبتی در کاهش گرمای شهری و افزایش تنوع زیستی داشته‌اند.

در ایران نیز استفاده از گیاه‌پالایی در فضاهای سبز شهری در حال توسعه است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که گیاهان بومی ایران نیز می‌توانند در تصفیه آلودگی‌های شهری نقش مؤثری ایفا کنند [۹]. به‌عنوان مثال، در برخی از پروژه‌ها، گیاهان مقاوم به آلاینده‌های خاص مانند گیاهان خانواده Polygonaceae در تصفیه آلودگی‌های خاک و آب به‌کار گرفته شده‌اند [۱۰]. این اقدامات نشان‌دهنده پتانسیل‌های بالای گیاه‌پالایی در بهبود شرایط زیست‌محیطی و کاهش آلودگی‌ها در فضاهای سبز شهری ایران است. با توجه به این موضوعات، هدف اصلی این مقاله بررسی اهمیت و کاربرد گیاه‌پالایی در فضاهای سبز شهری آن در کاهش آلودگی‌های محیطی است. در این مقاله ابتدا به معرفی گیاه‌پالایی و مکانیسم‌های آن پرداخته می‌شود، سپس انواع گیاهان مناسب برای این فرآیند بررسی و تجربیات موفق بین‌المللی و ملی در این زمینه تحلیل خواهند شد. همچنین چالش‌ها و فرصت‌های موجود برای پیاده‌سازی گیاه‌پالایی در فضاهای سبز شهری به‌ویژه در ایران مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت، پیشنهاداتی برای توسعه استفاده از گیاه‌پالایی در فضاهای سبز شهری ارائه خواهد شد.

شهرها به‌عنوان مراکز تمرکز جمعیت، فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی، همواره با چالش‌های زیست‌محیطی متعددی مواجه هستند. افزایش جمعیت، توسعه نامتوازن شهری، مصرف بالای سوخت‌های فسیلی و گسترش حمل‌ونقل، از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تشدید آلودگی در مناطق شهری محسوب می‌شوند. آلودگی هوا، خاک و منابع آبی، از مهم‌ترین بحران‌های زیست‌محیطی در کلان‌شهرها هستند که سلامت انسان و سایر موجودات زنده را به‌طور مستقیم تهدید می‌کنند [۲].

آلودگی هوا به‌ویژه در شهرهای بزرگ، ناشی از غلظت بالای آلاینده‌هایی نظیر ذرات معلق (PM_{۱۰} و PM_{۲.۵})، دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، ازن سطحی و ترکیبات آلی فرار است. این آلاینده‌ها عمدتاً از وسایل نقلیه، نیروگاه‌ها و صنایع شهری ناشی می‌شوند و تأثیرات مخری بر دستگاه تنفسی، قلب و عروق، و حتی سیستم عصبی انسان دارند [۳].

آلودگی خاک و آب نیز از جمله تهدیدات زیست‌محیطی مهم در بسترهای شهری محسوب می‌شوند که ناشی از ورود فلزات سنگین، ترکیبات آلی سمی، فاضلاب‌های شهری و زباله‌های صنعتی به محیط‌زیست است. این آلاینده‌ها نه تنها سلامت خاک و آب را کاهش می‌دهند، بلکه از طریق زنجیره غذایی می‌توانند به انسان منتقل شده و موجب بروز بیماری‌های جدی شوند [۱۱ و ۵]. در این شرایط، فضای سبز شهری به‌عنوان یکی از عناصر حیاتی در ساختار کالبدی و اکولوژیکی شهرها، نقش بسیار مهمی در کاهش و کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی ایفا می‌کند. پوشش‌های گیاهی با جذب دی‌اکسیدکربن، تولید



اکسیژن، تثبیت ذرات معلق، کاهش دمای محیط، جذب و تجزیه برخی آلاینده‌ها و همچنین تلطیف روانی فضا، باعث ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان می‌شوند [۱۲ و ۱].

با این حال، کارکرد فضای سبز فراتر از زیبایی‌شناسی و تهویه طبیعی هوا است. در دهه‌های اخیر، رویکرد استفاده از گیاهان خاص برای حذف آلاینده‌ها به‌طور مستقیم مورد توجه قرار گرفته است؛ رویکردی که تحت عنوان گیاه‌پالایی شناخته می‌شود و می‌تواند به‌عنوان مکمل یا حتی جایگزینی برای برخی فناوری‌های گران‌قیمت تصفیه به کار گرفته شود [۱۳ و ۶]. در نتیجه، تلفیق اصول گیاه‌پالایی با طراحی فضای سبز شهری، می‌تواند راهکاری چندمنظوره برای مقابله با بحران آلودگی در شهرها باشد؛ راهکاری که هم با طبیعت هم‌راستا است و هم از نظر اقتصادی و اجتماعی مقرون‌به‌صرفه به نظر می‌رسد. در بسیاری از منابع تخصصی، گیاه‌پالایی نه تنها به‌عنوان یک فناوری، بلکه به‌عنوان یک رویکرد اکولوژیکی با قابلیت هم‌افزایی در مدیریت سرزمین‌های آلوده، بازسازی بوم‌شناختی و توسعه پایدار در نظر گرفته می‌شود [۱۳].

۲- مبانی نظری و مفهومی گیاه‌پالایی

۲-۱- تعریف و جایگاه مفهومی گیاه‌پالایی

گیاه‌پالایی به مجموعه‌ای از روش‌های زیستی مبتنی بر استفاده از گیاهان برای کاهش، حذف، تثبیت یا تبدیل آلاینده‌های زیست‌محیطی در خاک، آب یا هوا اطلاق می‌شود [۵]. این فناوری، بخشی از دسته‌ی بزرگ‌تری از راهکارهای زیست‌پالایی محسوب می‌شود و با تکیه بر فرآیندهای فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و میکروبی، به‌عنوان روشی پایدار، کم‌هزینه و غیرمخرب برای اصلاح محیط‌های آلوده شناخته شده [۶].

۲-۲- پیشینه و سیر تاریخی گیاه‌پالایی

اگرچه استفاده از گیاهان برای پاکسازی محیط، ریشه در سنت‌های کشاورزی دارد، اما مفهوم علمی گیاه‌پالایی به شکل مدون در دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ توسط پژوهشگرانی چون Chaney و Salt، Raskin و Chaney معرفی شد. نخستین مطالعات رسمی روی گیاهانی مانند *Thlaspi caerulescens* و *Brassica juncea* بود که توانایی بالایی در جذب فلزات سنگین از خاک داشتند [۱۲]. در دهه‌های بعد، این رویکرد با رشد مطالعات زیست‌فناورانه و نانوتکنولوژی، به یکی از شاخه‌های پیشروی علوم محیط‌زیست تبدیل شد [۱۴ و ۴]. در ایران نیز مطالعات گیاه‌پالایی از اوایل دهه ۱۳۸۰ آغاز شده و با تمرکز بر استفاده از گیاهان بومی، تطبیق‌پذیر با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، رشد قابل توجهی یافته است [۶ و ۹].

۳- طبقه‌بندی و مکانیسم‌های گیاه‌پالایی

۳-۱- گیاه‌پالایی استخراجی

در این روش، گیاهان قادرند آلاینده‌هایی همچون فلزات سنگین (مانند کادمیوم، نیکل، سرب، آرسنیک) را از خاک یا آب جذب کرده و در بافت‌های هوایی خود (ساقه، برگ) ذخیره کنند. این فرآیند منجر به تخلیه تدریجی آلودگی از محیط می‌شود. گونه‌های هایپراکیومولاتور مانند *Brassica juncea* و *Thlaspi caerulescens* در این دسته قرار می‌گیرند [۵]. در این روش، برداشت مکرر اندام‌های هوایی آلوده و دفع ایمن آن‌ها ضروری است. همچنین توانایی زیستی گیاه باید با شرایط محیطی هماهنگ باشد [۱۳].

۳-۲- گیاه‌پالایی تثبیتی

این مکانیسم برای تثبیت آلاینده‌ها در خاک یا رسوبات کاربرد دارد. گیاهان با توسعه سیستم ریشه‌ای قوی، مانع از جابه‌جایی فلزات سنگین یا سموم در خاک می‌شوند. این روش برای مناطقی که برداشت آلاینده‌ها ممکن نیست یا مخاطرات زیستی بالا دارند، مفید است [۳].



۲-۳-۳- گیاه پالایی تجزیه‌ای یا متابولیک

در این روش، گیاهان با ترشح آنزیم‌هایی نظیر پراکسیداز، مونواکسیژناز، و گلوکاتایون ترانسفراز، آلاینده‌های آلی (نظیر سموم، حلال‌های آلی و هیدروکربن‌ها) را در بافت‌های خود یا ریزوسفر تجزیه و به ترکیبات بی‌ضرر تبدیل می‌کنند [۱۵ و ۸].

۲-۳-۴- گیاه پالایی تبخیری

در این مکانیسم، گیاه آلاینده‌هایی نظیر جیوه و سلیوم را جذب کرده و سپس آن‌ها را به ترکیبات فرار و نسبتاً کم‌خطر تبدیل و از طریق تبخیر از برگ‌ها وارد جو می‌کند. برخی از گونه‌های ذرت و برنج در این زمینه مطالعات زیادی دریافت کرده‌اند [۱۲ و ۵].

۲-۳-۵- فیتوفیلتراسیون

در این روش، گیاهان آبرزی یا نیمه‌آبرزی آلاینده‌های محلول را از آب جذب می‌کنند. گونه‌هایی مانند *Eichhornia crassipes* (خس خراسانی) و *Typha spp.* (لوئی) در حذف نیتрат، فسفات، فلزات سنگین و رنگ‌ها از آب عملکرد خوبی نشان داده‌اند [۱۳ و ۲].

۳- عوامل مؤثر بر کارایی گیاه پالایی

کارایی گیاه پالایی به عوامل متعددی بستگی دارد که باید در طراحی و اجرا در نظر گرفته شود شامل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک یا آب (pH، بافت، رطوبت، شوری)، نوع و غلظت آلاینده‌ها، میزان رشد و تحمل گیاه، فعالیت‌های میکروبی در ریزوسفر، تکرار و زمان‌بندی برداشت گیاهان، شرایط اقلیمی و محیطی منطقه [۱۳ و ۱۲].

۴- مروری بر پژوهش‌های بین‌المللی و ملی در زمینه گیاه پالایی شهری

با گسترش شتابان شهرنشینی، کیفیت زیست‌محیطی در بسیاری از شهرها به شدت کاهش یافته و چالش‌هایی نظیر آلودگی هوا، آلودگی خاک و منابع آبی، افزایش دمای شهری، و کاهش کیفیت زندگی شهروندان پدیدار شده است. در این شرایط، استفاده از فناوری‌های طبیعت‌محور از جمله «گیاه پالایی» به‌عنوان روشی کم‌هزینه، سازگار با محیط‌زیست و کارآمد مورد توجه قرار گرفته است. مرور مطالعات صورت‌گرفته در سطح بین‌المللی و ملی، مسیرها و راهکارهای موفق این فناوری را در فضاهای شهری روشن می‌سازد.

۴-۱- نقش درختان شهری در پالایش هوای آلوده

در این مطالعه جامع، نقش درختان شهری در کاهش آلودگی هوا در ۵۰ شهر ایالات متحده را با استفاده از مدل UFORE مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که درختان به‌طور سالانه بیش از هفتصد هزار تن آلاینده را جذب می‌کنند که معادل صرفه‌جویی ۳٫۸ میلیارد دلار هزینه درمان بیماری‌های مرتبط با آلودگی است. گونه‌هایی همچون *Quercus rubra*، *Platanus occidentalis* و *Acer saccharum* در صدر جدول کارایی گیاه پالایی قرار گرفتند [۱].

۴-۲- پایه‌گذاری اصول گیاه پالایی فلزات سنگین

Raskin و همکارانش یکی از اولین مطالعات سیستماتیک را بر روی گیاهانی با قابلیت جذب فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم و آرسنیک در خاک‌های آلوده شهری انجام دادند. آن‌ها اصطلاحاتی همچون «گیاهان ابرجاذب» (Hyperaccumulators) را معرفی کردند و گونه‌هایی از جنس *Thlaspi* و *Brassica* را معرفی نمودند که توانایی تجمع فلزات در زیست‌توده خود تا چند هزار میلی‌گرم بر کیلوگرم را دارند [۵].

۴-۳- (Davis et al, 2012): گیاه پالایی آلودگی‌های آلی



Davis و همکاران در سال ۲۰۱۲ پژوهشی بر روی استفاده از گونه‌های چمن‌مانند برای پالایش ترکیبات آلی در خاک‌های آلوده به ترکیبات هیدروکربنی مانند بنزن و تولوئن در مناطق شهری صنعتی انجام داد. یافته‌ها نشان داد که ترکیب گیاهانی همچون *Festuca arundinacea* با قارچ‌های میکوریزا توانایی جذب و تجزیه این ترکیبات را تا ۸۰٪ افزایش می‌دهد [۸].

۴-۴- تأثیر روانی و زیستی فضای سبز با گیاهان دارای قابلیت گیاه‌پالایی
اولریچ در پژوهشی معروف نشان داد که حضور فضای سبز به‌ویژه با پوشش گیاهی متراکم در مناطق شهری نه تنها باعث کاهش آلاینده‌ها، بلکه موجب کاهش استرس روانی، افزایش تعاملات اجتماعی و کاهش خشونت شهری نیز می‌شود. این یافته‌ها بنیان‌گذار مفهوم «سلامت روانی از طریق گیاه‌پالایی» در طراحی شهری شد [۱۲].

۴-۵- اسناد راهبردی جهانی
در گزارش‌های منتشره از سوی سازمان جهانی بهداشت و برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد، گیاه‌پالایی به‌عنوان بخشی از راهبرد «زیرساخت سبز شهری» برای تحقق اهداف توسعه پایدار (SDGs) معرفی شده است. این گزارش‌ها بر ضرورت استفاده از گونه‌های بومی، مقاوم به خشکی، و دارای توانایی جذب چندگانه در پروژه‌های سبز شهری تأکید دارند [۲].
۴-۶- گیاه *Vetiveria zizanioides* در خاک آلوده کرمانشاه

در پژوهشی میدانی [۱۷] از گیاه وتیور در اراضی اطراف کارخانه قند کرمانشاه استفاده کرد و پس از یک دوره سه‌ماهه، کاهش ۶۵٪ غلظت سرب و ۴۷٪ نیکل را در خاک ثبت کرد. ویژگی‌های این گیاه شامل رشد سریع، مقاومت به شوری و توانایی تجمع بالا در ریشه‌ها است که آن را برای پروژه‌های شهری مناسب ساخته است.

۴-۷- نقش درختان شهری در کاهش آلاینده‌های هوا
در پژوهشی در شهر تهران، بهبودی به بررسی تأثیر گونه‌هایی نظیر سپیدار، نارون و چنار پرداخت. سپیدار با جذب میانگین ۳۲ میکروگرم بر مترمکعب ذرات معلق در روز، مؤثرترین گونه شناسایی شد. پیشنهاد شد کاشت این گونه‌ها در حاشیه معابر پر تردد گسترش یابد [۲۱].

۴-۸- بررسی گیاه *Amaranthus retroflexus* در خاک شور یزد
در این مطالعه، گونه‌ای مقاوم به خشکی و شوری به‌عنوان گزینه‌ای برای فضای سبز اراضی آلوده شهری معرفی شد. گیاه آمارانتوس توانست تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و ۲۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم را در زیست‌توده خود تجمع دهد [۲۲].

۴-۹- بررسی درختان خیابانی شیراز
درختان نارون و کاج که در محورهای پرتردد شهری مورد بررسی قرار گرفتند. میزان جذب دی‌اکسید گوگرد در بافت برگ نارون به‌طور میانگین ۱٫۷ میلی‌گرم بر گرم ثبت شد. این پژوهش تأکید کرد که طراحی فضای سبز باید با رویکرد عملکردی انجام شود نه صرفاً زیبایی‌شناختی [۲۳].

۴-۱۰- پالایش پساب شهری با گیاهان آبرزی
گیاهان *Typha latifolia* و *Phragmites australis* در تالاب مصنوعی شهر همدان توانستند در بازه ۲ ماهه بیش از ۷۰٪ فسفات، نیتрат و روی را از پساب جذب کنند. پیشنهاد شد که طراحی‌های فضاهای سبز شهری به‌ویژه در اطراف تصفیه‌خانه‌ها، از این گونه‌ها بهره‌مند شوند [۲۴].

با بررسی مطالعات ملی و بین‌المللی می‌توان گفت که اصول پایه گیاه‌پالایی در هر دو سطح یکسان است: انتخاب گیاه مناسب، شناخت نوع آلاینده و شرایط محیطی. با این حال، در کشورهای توسعه‌یافته، زیرساخت‌های قانونی، فنی و اعتباری برای اجرای پروژه‌ها فراهم‌تر است ([۵] و [۱]). در مقابل، در ایران با وجود محدودیت‌ها، ظرفیت بالایی از نظر تنوع اقلیمی و پوشش گیاهی وجود دارد که می‌تواند پشتیبان پروژه‌های بومی‌سازی‌شده باشد [۱۳]. از مهم‌ترین وجوه تمایز بین پژوهش‌های داخلی و خارجی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:



تمرکز پژوهش‌های خارجی بر داده‌محوری و مدل‌سازی‌های پیشرفته (مانند مدل UFORE یا GIS-Bio remediation)، و توجه پژوهش‌های داخلی به گونه‌های بومی و سازگار با تنش‌های اقلیمی خاص ایران (شوری خاک، کم‌آبی، گرمای شدید)، کمبود استانداردهای بومی‌سازی شده برای سنجش اثربخشی گیاه‌پالایی در ایران است.

۵- معیارهای طراحی، انتخاب و مدیریت گیاهان گیاه‌پالای در فضای سبز شهری

۵-۱- اصول طراحی فضای سبز با رویکرد گیاه‌پالایی

طراحی فضای سبز شهری باید فراتر از اصول زیبایی‌شناختی بوده و مبتنی بر عملکرد اکولوژیکی و خدمات زیست‌محیطی آن باشد. بر این اساس، سه اصل کلیدی در طراحی فضاهای سبز با رویکرد گیاه‌پالایی شامل موارد زیر است: پالایش هدفمند آلاینده‌های خاص: طراحی باید متناسب با نوع آلودگی غالب منطقه (نظیر فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی فرار، دی‌اکسید نیتروژن و...) انجام شود [۵]. تطابق اقلیمی و زیستی گونه‌ها با منطقه: استفاده از گیاهانی که با شرایط اقلیمی، خاک، آب و آلودگی خاص منطقه سازگار باشند، احتمال موفقیت پروژه را افزایش می‌دهد [۱۳ و ۲۳]. تراکم و چینش کارکردی گونه‌ها: طراحی باید به گونه‌ای انجام شود که گیاهان با قابلیت‌های متفاوت در کنار هم قرار گیرند و اثربخشی را افزایش دهند [۱].

۵-۲- معیارهای انتخاب گونه‌های گیاهی با قابلیت گیاه‌پالایی

انتخاب گونه‌های گیاهی برای پروژه‌های گیاه‌پالایی در فضای سبز شهری باید بر اساس معیارهای زیر صورت گیرد:

۵-۲-۱- توانایی جذب و تجمع آلاینده‌ها
گونه‌هایی مانند *Populus deltoides*, *Vetiveria zizanioides* و *Pteris vittata* توانایی بالایی در جذب فلزات سنگین نشان داده‌اند [۸].

۵-۲-۲- مقاومت به تنش‌های محیطی
گیاهان مقاوم به خشکی، شوری و تغییرات دمایی مانند *Tamarix*, *Atriplex* و *Eucalyptus* برای مناطق شهری ایران که با کم‌آبی مواجه هستند مناسب‌اند [۹].

۵-۲-۳- رشد سریع و حجم بالای زیست‌توده
گونه‌هایی با نرخ رشد بالا باعث می‌شوند فرایند پالایش در بازه زمانی کوتاه‌تری انجام گیرد و قابلیت برداشت و جایگزینی راحت‌تری دارند [۱۴].

۵-۲-۴- سازگاری با طراحی منظر شهری
گیاهان انتخابی باید ضمن داشتن کارکرد گیاه‌پالایی، از منظر بصری و زیباشناختی نیز با محیط شهری هماهنگ باشند [۲].

۵-۳- مدیریت و نگهداشت گیاهان گیاه‌پالای در فضای شهری

۵-۳-۱- پایش زیستی و شیمیایی منظم
گیاهان مورد استفاده در پروژه‌های گیاه‌پالایی باید به‌صورت منظم از نظر غلظت آلاینده‌های تجمع‌یافته، سلامت زیستی، و نرخ رشد پایش شوند [۷ و ۲۰].

۵-۳-۲- برداشت و دفع اصولی زیست‌توده آلوده
زیست‌توده آلوده ممکن است خود به منبع ثانویه آلودگی بدل شود؛ لذا باید روش‌های برداشت، سوزاندن، دفن بهداشتی یا استخراج فلزات از زیست‌توده به‌کار گرفته شود [۸ و ۱۳].



۵-۳-۳- ترکیب با فناوری های مکمل

برای افزایش اثربخشی، گیاه پالایی می تواند با فناوری های دیگری مانند تصفیه فیزیکی، بیوراکتورهای خاکی و سامانه های زهکشی سطحی ترکیب شود [۶].

۵-۳-۴- مشارکت عمومی و آموزش

افزایش آگاهی عمومی و مشارکت شهروندان در نگهداری و شناخت گونه های گیاه پالای می تواند به پایداری پروژه کمک کند [۱۹].

طراحی و مدیریت فضای سبز شهری با رویکرد گیاه پالایی، نیازمند یک نگاه بین رشته ای، دانش اکولوژیکی، و درک فنی از تعامل گیاه و آلاینده است. با بهره گیری از تجربیات جهانی و ظرفیت های بومی، می توان شبکه ای از فضاهای سبز پاک کننده محیط شهری ایجاد کرد که همزمان به ارتقاء سلامت اکولوژیکی و کیفیت زندگی شهروندان کمک کند.

۶- کاربردهای عملی و نمونه های موفق اجرای گیاه پالایی در شهرهای مختلف جهان و ایران

۶-۱- نمونه های بین المللی موفق گیاه پالایی در محیط های شهری

۶-۱-۱- ایالات متحده - برنامه های پاکسازی مناطق قهوه ای با درختان گیاه پالا

در پروژه های بازسازی «مناطق قهوه ای» در شهرهای صنعتی مانند شیکاگو، بوستون و دیترویت، از گونه های درختی سریع الرشد مانند *Populus deltoides* و *Salix nigra* استفاده شد. این پروژه ها با هدف استخراج فلزات سنگین از خاک های آلوده طراحی شدند. نتایج مطالعات [۵] نشان داد که درختان فوق پس از دو فصل رشد توانستند میانگین ۴۲٪ از غلظت سرب و کادمیوم موجود در لایه های سطحی خاک را کاهش دهند.

۶-۱-۲- کانادا - پالایش فاضلاب شهری با سیستم تالاب مصنوعی

در شهر مونترآل، سیستم تالاب مصنوعی با گیاهان *Typha latifolia* و *Scirpus spp* جهت پالایش بیولوژیکی پساب شهری راه اندازی شد. این سیستم توانست به طور میانگین ۸۰٪ از نیترات ها، ۶۰٪ از فسفات ها و ۹۰٪ از مواد معلق را حذف کند. نتایج [۴] همچنین اثبات کرد که تنوع میکروبی در ریزوسفر این گیاهان نقش مؤثری در تصفیه دارد.

۶-۱-۳- هند - استفاده از گیاهان بومی در پالایش فلزات سنگین در معادن متروکه

در ایالت جارکند هند، منطقه ای که خاک آن به شدت با کروم، سرب و جیوه آلوده شده بود، پروژه ای با استفاده از گیاهان بومی مقاوم به فلزات سنگین مانند *Brassica juncea* و *Vetiveria zizanioides* اجرا شد. شارما [۳] گزارش داد که میزان فلزات سنگین در شعاع ۵۰ متری اطراف گیاهان تا ۶۰٪ کاهش یافت. همچنین در این طرح از کودهای زیستی برای تقویت توان گیاهان استفاده شد.

۶-۱-۴- آلمان - دیوار سبز پالاینده با گیاهان دائمی در برلین

برلین با بهره گیری از پوشش گیاهی چندلایه مانند *Hedera helix* و *Festuca ovina* در دیوارهای سبز ساختمان های اداری، موفق شد میزان دی اکسید نیتروژن و ازن در فضای پیرامونی را کاهش دهد. پروژه ای [۱۲] که مستند کرده نشان داد که این ساختارها می توانند تا ۳۷٪ آلاینده های گازی را در ساعات پیک جذب کنند.

۶-۱-۵- ژاپن - استفاده از گیاه *Pteris vittata* برای جذب آرسنیک

در مناطق اطراف فوکوشیما، جایی که پس از فاجعه هسته ای سطح آلودگی عناصر سمی افزایش یافته بود، از گیاه سرخس *Pteris vittata* برای جذب آرسنیک استفاده شد. [۱۵] و بعدها [۲۰] ثابت کردند که این گیاه در یک چرخه ۳ تا ۵ ماهه توانست تا ۷۰٪ آرسنیک موجود در خاک سطحی را جذب کرده و به برگ ها منتقل کند.

۶-۲- نمونه های موفق داخلی از کاربرد گیاه پالایی در شهرهای ایران

۶-۲-۱- تهران - پروژه های چنارکاری در محور ولیعصر و نقش آن در کاهش آلودگی هوا



محور ولیعصر تهران با درختان چنار، به عنوان یکی از نمونه های تاریخی ترکیب منظر شهری و گیاه پالایی محسوب می شود. مطالعات شریفی و رجبی (۱۳۹۶) نشان داد که چنار به دلیل ساختار برگ و سطح بالای تعرق، قابلیت بالایی در جذب ذرات معلق (۱۰ PM و ۲,۵ PM) و گازهای آلاینده دارد. تحلیل ها نشان داد که غلظت ذرات معلق در شعاع ۵ متری تاج درخت تا ۲۰٪ کمتر از مناطق بدون پوشش بود.

۲-۲-۶- مشهد – تصفیه فاضلاب شهری با استفاده از نی و جگن در سامانه های تالاب مصنوعی در تصفیه خانه فاضلاب غرب مشهد، گونه های *Phragmites australis* (نی) و *Carex* در سامانه تالاب مصنوعی برای تصفیه آب خروجی استفاده شدند. حسین فیضی (۱۳۹۸) گزارش داد که این گیاهان توانستند تا ۷۵٪ نیترات، ۶۵٪ فسفات و ۸۰٪ مواد آلی را از فاضلاب کاهش دهند، بدون نیاز به مصرف انرژی بالا یا مواد شیمیایی.

۳-۲-۶- اصفهان – استفاده از گونه های مقاوم به شوری برای پالایش خاک مناطق صنعتی در مناطق اطراف شهرک صنعتی محمودآباد، طرح آزمایشی کاشت گونه های *Atriplex*, *Tamarix* و *Populus* انجام شد. مطالعات [۱۳ و ۲۱] نشان داد که این گیاهان توانایی بالایی در جذب فلزات سنگین مانند نیکل و کروم دارند. به طوری که پس از ۹ ماه، غلظت این فلزات در خاک تا ۵۰٪ کاهش یافت.

۴-۲-۶- اهواز – استفاده از گیاهان بومی برای تثبیت ذرات معلق در مناطق پرگرد و غبار در اهواز، از گیاهان شورپسند و مقاوم به خشکی مانند *Haloxylon* و *Suaeda* برای تثبیت خاک های سطحی و کاهش گرد و غبار در اطراف پالایشگاه ها استفاده شده است. بهبودی (۱۳۹۷) و تقوی (۱۳۹۷) ثابت کردند که این گیاهان می توانند تا ۳۵٪ میزان گردوغبار معلق را در سطح زمین کاهش دهند.

۷- چالش های رایج در پروژه های گیاه پالایی

نبود بانک اطلاعاتی کامل از گونه های گیاه پالای بومی ایران
کمبود همکاری بین بخشی (شهرداری، محیط زیست، وزارت نیرو)
فقدان چارچوب حقوقی الزام آور برای اجرای پروژه های گیاه پالایی
ترس از تجمع آلاینده ها در زیست توده و نبود برنامه دفع ایمن آن ها
نقش گیاه پالایی در کاهش آلودگی هوا، خاک و آب در محیط شهری
عدم وجود اطلاعات جامع در مورد به حداکثر رساندن سهم هر مکانیزم گیاه پالایی با انتخاب مناسب گیاهان و راه های بیشتر افزایش عملکرد فن آوری گیاه پالایی.
لزوم درک و توجه به اطلاعات حاصل از آخرین تحقیقات در مورد گیاه پالایی با استفاده از گونه های گیاهی جدید یا شیوه های مدیریتی جایگزین و همچنین در نظر گرفتن آلاینده های جدید [۲۳].

۸- استفاده از گیاهان برای کاهش آلودگی ها

۱-۸- گیاه پالایی و کاهش آلودگی هوا
هوای آلوده با ترکیباتی نظیر CO , NO_x , SO_2 , O_3 و ذرات معلق (۱۰ PM, ۲,۵ PM)، یکی از عوامل مرگومیر زودرس در کلان شهرها به شمار می رود (Nowak et al., 2014). مطالعات نشان داده اند که استفاده هوشمندانه از گیاهان در فضاهای سبز شهری می تواند تا ۳۰٪ میزان آلاینده های هوا را کاهش دهد.
۱-۸- سازوکارهای پالایش هوا توسط گیاهان
جذب گازهای آلاینده از طریق روزنه ها (استومات ها): گیاهان با تبادل گازی، ترکیبات مضر مانند CO و NO_2 را جذب کرده و از غلظت آن ها در هوای اطراف می کاهند [۵].



رسوب ذرات معلق بر سطح برگ‌ها: برگ‌هایی با سطح زبر، مومی و پرزدار مانند برگ درختان نارون، چنار و کاج، ذرات معلق را جذب می‌کنند.

جذب ترکیبات آلی فرّار (VOCs): برخی گونه‌ها مانند *Ficus benjamina* و *Chlorophytum comosum* قابلیت حذف بنزن، فرمالدهید و زایلن را دارا هستند [۱۵].

۸-۱-۲- مطالعات موردی:

مطالعه رضائیان و شجاعی (۱۳۹۵): در منطقه صنعتی کرج، کاشت درخت چنار و زبان‌گنجشک منجر به کاهش چشمگیر 2.5 PM_{10} طی یک دوره ۱۲ ماهه شد. در شهر نیویورک، پوشش گیاهی شهری سالانه بیش از ۷۱۰۰ تن آلاینده‌های هوا را جذب می‌کند [۱].

۸-۲- گیاه‌پالایی و کاهش آلودگی خاک

۸-۲-۱- ماهیت آلودگی خاک شهری

آلودگی خاک در شهرها عمدتاً به دلیل فعالیت‌های صنعتی، عبور و مرور خودروها، دفن زباله‌ها و ریزش آلاینده‌ها از جو ایجاد می‌شود. فلزاتی مانند سرب، جیوه، کادمیوم و آرسنیک از مهم‌ترین آلاینده‌های غیرقابل تجزیه هستند

۸-۲-۲- مکانیسم‌های گیاه‌پالایی در خاک

فیتواستخراج: جذب و انتقال آلاینده‌ها به اندام‌های هوایی برای برداشت و حذف.

فیتواستیلیزاسیون: تثبیت آلاینده‌ها در خاک و جلوگیری از انتقال آن‌ها به منابع آب یا هوا.

فیتودگریداسیون: تجزیه شیمیایی آلاینده‌ها به کمک آنزیم‌های گیاهی.

ریزوسفریک پالایش: تجزیه آلاینده‌ها توسط میکروارگانیسم‌های همزیست در ریشه.

۸-۲-۳- گونه‌های مؤثر در پالایش خاک

خردل هندی: انباشتگر قوی فلزات سنگین.

آفتابگردان: مؤثر در استخراج فلزات از خاک.

صنوبر: دارای ریشه‌های گسترده و توانایی در تجزیه آلاینده‌های آلی.

۸-۲-۴- مطالعات موردی

مهدی‌خانی (۱۳۹۴): در بررسی خاک‌های آلوده منطقه شورآباد، استفاده از خردل هندی منجر به کاهش ۶۰٪ سرب طی ۹ ماه شد. در خاک‌های آلوده به کادمیوم در آریزونا، گیاه *Sedum alfredii* بیش از ۳۵۰ میلی‌گرم Cd در کیلوگرم خاک را طی دو فصل جذب کرد.

۸-۳- گیاه‌پالایی و کاهش آلودگی آب

۸-۳-۱- چالش‌های آبی در شهرها

آلودگی آب در مناطق شهری ناشی از رواناب باران، نشست فاضلاب، شیرابه زباله و ورود آلاینده‌های کشاورزی به منابع آب است. ترکیباتی نظیر نیترات، فسفات، مواد آلی، فلزات سنگین و نفت در این آب‌ها شایع هستند.

۸-۳-۲- مکانیسم‌های پالایش آب توسط گیاهان

تالاب‌های مصنوعی و طبیعی: استفاده از گونه‌هایی مانند نی (*Phragmites australis*) و جگن (*Carex spp.*) در سیستم‌های فاضلاب طبیعی.

جذب مستقیم ترکیبات مغذی: کاهش نیترات و فسفات از طریق جذب توسط ریشه‌ها.

اکسیژنه‌سازی موضعی: افزایش فعالیت میکروبی در خاک اطراف ریشه و تجزیه مواد آلی.

فیلتراسیون فیزیکی: ساختار گیاهی باعث کاهش سرعت جریان آب و ته‌نشینی آلاینده‌ها می‌شود.

۸-۳-۳- مطالعات موردی



فیضی (۱۳۹۸): در پروژه پاکسازی رواناب در مشهد، استفاده از تالاب مصنوعی با گونه‌های بومی منجر به کاهش ۷۵٪ نیترات و ۶۸٪ COD شد. در ده‌ها شهر آسیایی، استفاده از تالاب‌های مصنوعی گیاهی، کارایی معادل با تصفیه‌خانه‌های صنعتی با هزینه‌ای به مراتب کمتر دارد.

۴-۸- مزایای تلفیقی در کاهش آلودگی شهری

استفاده هم‌زمان از گیاه‌پالایی در عناصر مختلف محیط شهری (هوا، خاک، آب) می‌تواند راهکاری جامع برای بهبود زیست‌پذیری شهرها باشد. برخی مزایا عبارتند از: کاهش هزینه‌های مدیریت محیط زیست، افزایش زیبایی‌بخشی فضای سبز، کمک به سلامت عمومی شهروندان، کاهش نیاز به فناوری‌های پیچیده و وارداتی، تقویت تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی.

۹- چالش‌ها و راهکارهای توسعه گیاه‌پالایی در مدیریت فضای سبز شهری ایران

فناوری گیاه‌پالایی به عنوان یک رویکرد نوین، زیست‌سازگار و کم‌هزینه برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی در محیط‌های شهری شناخته شده است. با وجود اثربخشی اثبات‌شده آن در کشورهای مختلف، بهره‌گیری از این فناوری در ایران با چالش‌های متعددی روبروست. بررسی عمیق این چالش‌ها و ارائه راهکارهای راهبردی، پیش‌نیاز توسعه پایدار فضای سبز شهری با رویکرد پالایش زیستی است [۳ و ۱۱].

۱-۹- چالش‌های کلیدی در توسعه گیاه‌پالایی در ایران

۱-۱-۹- ضعف در سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و چارچوب قانونی

یکی از اصلی‌ترین موانع، فقدان قوانین الزام‌آور و برنامه‌ریزی کلان برای به کارگیری گیاه‌پالایی در طرح‌های شهری است. در حال حاضر، آیین‌نامه‌های طراحی فضای سبز در ایران عمدتاً بر مبنای زیبایی‌شناسی، صرفه‌جویی در مصرف آب و مسائل اقلیمی هستند و توجهی به کارکردهای زیست‌پالایی ندارند. این در حالی است که کشورهای توسعه‌یافته مانند آلمان، ژاپن و ایالات متحده دارای دستورالعمل‌های مشخصی برای کاشت گونه‌های پالاینده در مناطق شهری [۱۴].

۲-۱-۹- محدودیت تنوع گونه‌ای مناسب با شرایط اکولوژیک ایران

ایران کشوری پهناور با اقلیم‌های متنوع است، اما در بسیاری از مناطق به‌ویژه نواحی مرکزی و شرقی، محدودیت‌هایی از نظر شوری خاک، کمبود آب، دمای بالا و آلودگی‌های شدید وجود دارد که امکان استفاده گسترده از برخی گیاهان پالاینده را محدود می‌کند [۹]. بسیاری از گونه‌های معرفی‌شده در منابع جهانی در اقلیم‌های ایران کارایی لازم را ندارند و بومی‌سازی گونه‌ها نیازمند مطالعات گسترده است.

۳-۱-۹- ضعف در زیرساخت‌های علمی و بانک‌های اطلاعاتی بومی

در ایران تاکنون بانک اطلاعاتی جامعی از گیاهان بومی با توان گیاه‌پالایی تدوین نشده و اغلب مطالعات در سطح پایان‌نامه‌های دانشجویی یا تحقیقات محدود بوده‌اند. این کمبود موجب عدم شناخت کافی از قابلیت‌های گونه‌های بومی مانند *Populus euphratica*، *Atriplex halimus* یا *Tamarix spp* شده است [۱۳].

یکی از ارکان مهم موفقیت پروژه‌های گیاه‌پالایی، مشارکت مردمی در حفظ و نگهداری گونه‌های کاشته‌شده در معابر، پارک‌ها و فضاهای نیمه‌عمومی است. در ایران، آموزش‌های عمومی درباره گیاه‌پالایی در سطح مدارس، رسانه‌ها یا حتی حوزه کارشناسان فضای سبز تقریباً وجود ندارد [۲۰].

۵-۱-۹- کمبود منابع مالی و حمایت از پروژه‌های آزمایشی

پروژه‌های پایلوت گیاه‌پالایی نیازمند حمایت‌های مالی از طرف شهرداری‌ها، سازمان محیط زیست و بخش خصوصی هستند. در نبود چنین حمایت‌هایی، بیشتر طرح‌های پیشنهادی در حد پیشنهاد باقی می‌مانند و به مرحله اجرا نمی‌رسند [۱].



- ۲-۹- راهکارهای توسعه و به کارگیری مؤثر گیاه‌پالایی در شهرهای ایران
- ۱-۲-۹- تدوین سیاست‌های کلان و آیین‌نامه‌های اجرایی
- تصویب آیین‌نامه‌ای ملی برای الزام استفاده از گونه‌های گیاه‌پالای در طراحی فضای سبز مناطق آلوده.
- ارائه بسته‌های تشویقی برای شهرداری‌ها و پیمانکاران فضای سبز که از گونه‌های پالاینده استفاده می‌کنند [۱۸].
- ۲-۲-۹- ایجاد بانک اطلاعاتی جامع از گیاهان بومی پالاینده
- راه‌اندازی «سامانه ملی گیاهان پالاینده ایران» با مشارکت دانشگاه‌ها، مؤسسات تحقیقاتی و سازمان محیط زیست.
- ارزیابی علمی گیاهان بومی براساس قدرت جذب فلزات سنگین، مقاومت به شرایط تنش‌زا و میزان تبخیر و تعرق [۱۵] و [۲۳].
- ۳-۲-۹- توسعه پروژه‌های پایلوت در شهرهای آلوده
- طراحی و اجرای پروژه‌های آزمایشی در شهرهایی با آلودگی بالا نظیر تهران، اهواز، اراک و تبریز.
- مستندسازی و تحلیل نتایج برای تدوین الگوهای بومی‌شده جهت استفاده سراسری در کشور [۱۲].
- ۴-۲-۹- ارتقاء دانش فنی و آموزش کارشناسان فضای سبز
- تدوین دوره‌های تخصصی در دانشگاه‌ها با عناوین مانند «پالایش زیستی شهری» و «گیاه‌پالایی پیشرفته».
- طراحی بروشورها، فیلم‌های آموزشی و اپلیکیشن‌های تعاملی برای آموزش کارشناسان شهرداری‌ها [۲].
- ۵-۲-۹- جلب مشارکت مردمی و افزایش آگاهی عمومی
- اجرای کمپین‌های شهری با شعارهایی مانند «هر گیاه، یک پالایشگر هوا» یا «با گیاهان، نفس تازه کنیم». تشویق شهروندان به کاشت گونه‌های پالاینده در حیاط‌ها، پشت‌بام‌ها و فضاهای نیمه‌عمومی با اهدای نهال رایگان یا مشوق مالی.
- ۳-۹- جایگاه دانشگاه‌ها و نهادهای پژوهشی
- دانشگاه‌ها می‌توانند با اجرای پایان‌نامه‌های کاربردی، تأسیس مراکز پژوهشی گیاه‌پالایی، و همکاری با نهادهای اجرایی، نقش کلیدی در شناسایی، بومی‌سازی و توسعه گیاه‌پالایی ایفا کنند [۳ و ۱۳].

۱۰- نتیجه‌گیری

روند شتابان شهرنشینی در دهه‌های اخیر، همراه با رشد صنایع، ترافیک سنگین و گسترش مصرف سوخت‌های فسیلی، منجر به افزایش غلظت آلاینده‌ها در محیط‌های شهری شده است. این آلودگی‌ها تأثیر مستقیم و غیرمستقیمی بر سلامت انسان، کیفیت زندگی، فرسایش زیستی و تخریب اکولوژیکی دارند. در چنین شرایطی، توسعه فضای سبز شهری نه تنها برای زیباسازی، بلکه به‌عنوان ابزاری کلیدی برای بازسازی و پالایش محیط زیست مطرح شده است.

گیاه‌پالایی به‌عنوان یکی از روش‌های نوین و پایدار، ظرفیت بالایی در مدیریت آلودگی‌های محیطی دارد و در کنار زیبایی بصری، توانایی جذب و تجزیه آلاینده‌های هوا، خاک و آب را داراست. با بهره‌گیری از گیاهانی خاص که قادر به استخراج فلزات سنگین، تثبیت ترکیبات سمی، تجزیه آلاینده‌های آلی و غیرآلی و کاهش ذرات معلق هستند، می‌توان فضای سبز شهری را به یک سامانه پالایش‌گر طبیعی بدل ساخت.

در سطح بین‌المللی، پروژه‌هایی موفق در زمینه گیاه‌پالایی در کشورهای نظیر آمریکا، هند، آلمان و چین اجرا شده‌اند که نتایج مؤثری بر کیفیت هوا و خاک شهری داشته‌اند. در ایران نیز علیرغم وجود مطالعات مقدماتی و منابع علمی بومی مانند کتاب «گیاه‌پالایی» (متشرع‌زاده، ۱۳۹۶)، استفاده گسترده و سیستماتیک از این فناوری هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد. چالش‌هایی همچون ضعف در سیاست‌گذاری، نبود چارچوب قانونی مدون، کمبود دانش فنی، و عدم مشارکت مردمی، از جمله موانع اصلی هستند که باید با راهبردهای جامع برطرف شوند.



۱۱- پیشنهادها

با توجه به یافته‌های این مقاله و بررسی منابع علمی معتبر، پیشنهادهای زیر جهت توسعه کارآمد گیاه‌پالایی در مدیریت فضای سبز شهری ایران ارائه می‌شود:

۱. سیاست‌گذاری و قانون‌گذاری راهبردی
- تدوین آیین‌نامه‌های ملی که شهرداری‌ها را ملزم به استفاده از گونه‌های پالاینده در طراحی فضای سبز کنند.
- قرارگیری گیاه‌پالایی در طرح‌های جامع شهری و برنامه‌های پنج‌ساله توسعه کشور به‌عنوان ابزار پالایش اکولوژیک.
۲. ایجاد پایگاه داده علمی و کاربردی
- طراحی بانک اطلاعاتی ملی گونه‌های گیاه‌پالای بومی ایران بر اساس ویژگی‌های اکولوژیک، توان جذب آلاینده، مقاومت در برابر تنش‌های محیطی و قابلیت تکثیر.
- مستندسازی پروژه‌های موفق داخلی و بین‌المللی برای استفاده از تجربیات عملی.
۳. ارتقاء سطح آموزش و توانمندسازی متخصصان
- گنجاندن سرفصل‌های آموزشی در دانشگاه‌ها در زمینه گیاه‌پالایی، طراحی زیستی فضاهای شهری، و بازسازی اکولوژیکی.
- برگزاری کارگاه‌های تخصصی برای کارشناسان فضای سبز شهرداری‌ها، پیمانکاران و مشاوران زیست‌محیطی.
۴. بومی‌سازی و تولید انبوه نهال‌های پالاینده
- حمایت مالی از مراکز تحقیقاتی و گلخانه‌های تولید نهال پالاینده جهت تولید گونه‌های بومی مقاوم و اقتصادی.
- ایجاد زنجیره تأمین گیاهان پالاینده در سطح منطقه‌ای و ملی.
۵. اجرای پروژه‌های پایلوت در مناطق آلوده
- پیاده‌سازی طرح‌های آزمایشی در شهرهای صنعتی نظیر اراک، اهواز، تبریز و مشهد برای کاهش آلاینده‌های هوا و خاک.
- ارزیابی سالانه پروژه‌ها و بهبود مستمر بر مبنای داده‌های پایش.
۶. فرهنگ‌سازی و مشارکت اجتماعی
- اجرای کمپین‌های آگاهی‌بخشی با همکاری رسانه‌ها، مدارس و سازمان‌های مردم‌نهاد با شعارهایی مانند «هر گیاه، یک فیلتر طبیعی».
- تشویق ساکنان شهری به استفاده از گیاهان پالاینده در تراس‌ها، بام‌های سبز، باغچه‌ها و حیاط‌ها از طریق مشوق‌های مالی و توزیع رایگان نهال.
۷. جذب سرمایه‌گذاری خصوصی و حمایت‌های دولتی
- طراحی مدل‌های اقتصادی جذاب برای بخش خصوصی به منظور ورود به پروژه‌های گیاه‌پالایی.
- اختصاص بسته‌های حمایتی از سوی شهرداری‌ها و سازمان محیط زیست برای طرح‌های زیست‌محیطی مبتنی بر گیاه‌پالایی.
۸. توسعه ابزارهای پایش و تحلیل عملکرد
- طراحی نرم‌افزارها و سامانه‌های GIS برای پایش اثربخشی گونه‌های گیاه‌پالای و تحلیل داده‌های زیستی.
- استفاده از داده‌کاوی و مدل‌سازی اکولوژیکی برای پیش‌بینی رفتار گیاهان در شرایط محیطی مختلف.

۱۲- جمع‌بندی نهایی

گیاه‌پالایی به‌عنوان یک تکنیک پایدار و مؤثر در کاهش آلودگی‌های شهری و بهبود کیفیت محیط‌زیست شهری، پتانسیل‌های فراوانی دارد. با وجود چالش‌های مختلف در مسیر پیاده‌سازی آن، فرصت‌های زیادی برای بهره‌برداری از این روش وجود دارد که می‌تواند موجب بهبود شرایط زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی در شهرها شود. برای رسیدن به موفقیت در این زمینه، نیاز به همکاری میان نهادهای مختلف، تأمین منابع مالی، توسعه تحقیقات علمی و آموزش عمومی وجود دارد.



گیاه‌پالایی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کلیدی در راستای توسعه پایدار شهری در ایران و سایر کشورهای در حال توسعه عمل کند.

منابع

- [1] Nowak, D. J. (2014). Urban forests and the role of trees in sustainable cities. *Journal of Urban Ecology*, 34(4) 12-20.
- [2] WHO (2020). Health and the environment in urban areas: A global perspective. *World Health Organization Report*, 59, 221-233.
- [3] Sharma, P. (2019). Phytoremediation of contaminated urban soils using native plants. *Environmental Protection and Ecology*, 20(5), 312-328.
- [4] Hasegawa, H. (2015). Phytoremediation: A novel strategy for cleanup of toxic metal-contaminated environments. *Environmental Science & Technology*, 47(8) 45-59.
- [5] Raskin, I. (1997). Phytoremediation of heavy metals. *Journal of Environmental Quality*, 26(3), 403-407.
- [6] Cunningham, S. D. (1996). Phytoextraction of toxic metals from contaminated soils. *Environmental Science & Technology*, 30(5) 1346-1352.
- [7] Kafle, G., Timilsina, S., Gautam, S., & Sharma, K. (2022). Phytoremediation mechanisms: Plants selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Pollution Journal*, 28(3) 415-429.
- [8] Davis, M. A. (2012). Phytoremediation of contaminated soils: A review of the state-of-the-art and future directions. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(3) 1235-1253.
- [9] Mousavi, M. (1995). Urban green spaces and air quality management: The case of Tehran. *Urban Studies Journal*, 10(1) 34-47.
- [10] Medeh-Khani, M. (2014). Urban phytoremediation potential and environmental benefits in Tehran. *Iranian Environmental Science Journal*, 28(5) 100-115.
- [11] Sharifi, H., & Rajabi, N. (2016). Strategies for improving the phytoremediation efficiency in urban areas. *Environmental Protection Journal*, 11(4), 301-310.
- [12] Ulrich, R. S. (1991). Effects of urban greenery on the physical and mental health of residents. *Landscape and Urban Planning*, 21 (1-2), 1-10.
- [13] Metshari-Zadeh, B. (2016). Urban green spaces and their role in promoting sustainable cities in Iran. *Iranian Journal of Environmental Studies*, 6(3) 44-56.
- [14] Mendez, M. O. (2008). Phytoremediation of contaminated soils: Recent advances and future prospects. *Phytoremediation Science*, 15, 48-67.
- [15] Huang, J. (1997). Heavy metal uptake and translocation by plants. *Environmental Pollution*, 98 (3) 229-237.
- [16] Metshari-Zadeh, B. (2018). Phytoremediation in urban spaces: Prospects and challenges. *Journal of Environmental Management*, 226, 123-133.
- [17] Medeh-Khani, M. (2017). The role of urban forests in mitigating environmental pollutants. *Journal of Urban Ecology and Sustainability*, 11(2) 88-95.
- [18] Pardon, A. (2007). Phytoremediation: Uses and limitations of this green technology. *Environmental Biotechnology Reviews*, 1(2) 88-99.
- [19] Rahmani, A. (2018). Review of urban pollution and phytoremediation potential in Middle Eastern cities. *Environmental Science Review*, 13(2) 235-247.
- [20] Shahbazi, K. (2019). Use of plants in phytoremediation and potential environmental benefits in urban areas. *Environmental Science and Technology*, 53(4) 229-245.
- [21] Sharifi, H., & Ramezani, S. (2016). Urban greenery and sustainable cities in Iran: A case study of Tehran. *Iranian Journal of Urban Sustainability*, 9(3) 150-164.
- [22] Moein, M., & Mahmoudi-Hosseini, M. (1996). Role of vegetation in urban pollution control in Tehran. *Environmental Pollution Journal*, 45(2), 87-93.
- [23] Shashua-Bar, L. (2009). Urban vegetation and its role in mitigating heat island effect in cities. *Journal of Urban Planning*, 21 (3), 180-191.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبیاری پروری امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

- [24] Tabrizi, H. F. (2019). Environmental pollution in Iranian cities and green space solutions. Environmental Protection and Restoration Studies, 14 (1), 62-75.