

بازطراحی منظر پسا صنعتی با تلفیق شبیه سازی اقلیمی و رویکرد گیاه پالایی برای کاهش ریسک آلاینده‌گی و احیای فضاهای شهری عمومی در کارخانه سیمان فارس شیراز^۱

مهشید قربانیان^{۱*}، غزال علیپور^۲، محسن فیضی^۳

استادیار، گروه هنرهای کاربردی (معماری منظر)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران
کارشناس ارشد معماری منظر دانشگاه علم و صنعت ایران
استاد، گروه هنرهای کاربردی (معماری منظر)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بازطراحی منظر کارخانه سیمان فارس در شیراز، بر اساس تلفیق شبیه سازی اقلیمی و گیاه پالایی فازبندی شده انجام شده است. روش شناسی پژوهش شامل برداشت میدانی، شبیه سازی جریان باد با نرم افزار ENVI-met برای شناسایی کانون های بحرانی، و گزینش گونه های گیاهی مبتنی بر چارچوب دوجبهی اثربخشی-زمان است. بر اساس خروجی شبیه سازی، پهنه های غربی و شمال غربی سایت به عنوان نقاط پرخطر انتشار گردوغبار شناسایی شدند. در پاسخ، یک سیستم کاشت چندلایه و سه سطحی تدوین گردید: سطح اول، گونه های ضربتی و یک ساله همچون آفتابگردان و شمعدانی معطر برای استخراج سریع فلزات سنگین؛ سطح دوم، گونه های علفی پایدار مانند خس خس، علف بوریای موئین و خردل هندی برای تثبیت بستر و کنترل فرسایش؛ و سطح سوم، درختان و درختچه های بومی دیرزیست نظیر گنار، بنه و بادام کوهی برای ایجاد اسکلت پایدار منظر، سایه اندازی بهینه و احیای تنوع زیستی. نتایج نشان می دهد که این رویکرد ترکیبی، ضمن مهار ریسک انتشار آلاینده ها در اقلیم خشک شیراز، بستری برای خلق پارکی شهری پایدار، مقاوم به کم آبی و غنی از ارزش های اکولوژیک و فرهنگی فراهم می سازد.

کلیدواژه ها: منظر پسا صنعتی، گیاه پالایی، شبیه سازی اقلیمی، احیای منظر شهری، طراحی پایدار، کارخانه سیمان فارس
نکات برجسته:

تلفیق شبیه سازی اقلیمی (ENVI-met) با گیاه پالایی فازبندی شده: شبیه سازی ENVI-met در چهار بازه زمانی، پهنه های غربی و شمال غربی را به عنوان کانون های بحرانی انتشار گردوغبار شناسایی کرد و تطابق نقشه های سرعت باد با الگوهای پراکنش ذرات، مبنای سازمان دهی فضایی کاشت قرار گرفت.

چارچوب سه سطحی انتخاب گونه: گونه ها در سه سطح عملکردی-زمانی (ضربتی برای استخراج سریع فلزات سنگین، میان مدت برای تثبیت بستر، و بلندمدت برای اسکلت پایدار منظر) طبقه بندی شدند که هم زمان به پالایش آلودگی و آسایش حرارتی در اقلیم خشک پاسخ می دهد.

سیستم کاشت چندلایه بومی: ساختار سه لایه (درختان با سایه اندازی ۳۵-۶۰٪، درختچه های بافر، و پوشش های سطحی به عنوان مالچ زنده)، با به کارگیری گونه های دیم روی نظیر بادام کوهی و بنه (نیاز آبی نزدیک به صفر)، ضمن مهار باد و ریزگردها، تنوع زیستی و فضای عمومی پایدار را احیا کرده است.

^۱ این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده دوم در رشته معماری منظر دانشگاه علم و صنعت ایران، با عنوان "بازطراحی سایت های پسا صنعتی با کاهش ریسک پذیری انتشار آلاینده گی با رویکرد گیاه پالایی (نمونه موردی: کارخانه سیمان فارس)" به راهنمایی دکتر محسن فیضی و دکتر مهشید قربانیان می باشد.

۱- مقدمه

گسترش شتابان شهرنشینی و خروج صنایع از بافت‌های مسکونی، در کنار برجای گذاشتن لکه‌های وسیع و متروک صنعتی، به یکی از چالش‌های کالبدی- فضایی معاصر مدیریت شهری تبدیل شده است. این عرصه‌های پساصنعتی، فارغ از ارزش‌های تاریخی و هویتی خود، به دلیل موقعیت راهبردی در دل شهر، گسست‌هایی جدی در تداوم بافت شهری، کیفیت زیست‌محیطی و خوانایی منظر شهری ایجاد کرده‌اند. کارخانه سیمان فارس در شیراز، با قدمتی چنددهه و قرارگیری در مجاورت محلات مسکونی (با فاصله کمتر از ۲۰۰ متر تا کوره‌ها)، مصداق عینی این معضل است. این کارخانه که تا سال ۱۴۰۵ به محدودای جدید منتقل خواهد شد، با سطحی بالغ بر ۴۵ هکتار، به یک «زمین قهوه‌ای» بزرگ در دل شهر تبدیل می‌شود که نه تنها به دلیل آلودگی‌های انباشته (فلزات سنگین، ذرات معلق و گازهای اسیدی)، بلکه به خاطر انقطاع فضایی و ناپایداری منظر، کیفیت زیست‌پذیری محلات پیرامون را به مخاطره انداخته است. موقعیت اقلیمی خشک و نیمه‌خشک شیراز و وزش بادهای محلی از جبهه‌های غربی و شمال‌غربی، این معضل را به یک چالش فراتر از آلودگی صرف تبدیل کرده و آن را به یک مسئله‌ی طراحی شهری بدل می‌سازد که باید از منظر «ساماندهی جریان‌های محیطی»، «ایجاد قلمروهای امن و قابل زیست» و «بازتعریف هویت منظر» بدان پرداخت.

این پژوهش، با نگاهی طراحانه، در پی بازطراحی پایدار این سایت بر مبنای تلفیق دو ابزار کلیدی است: نخست، شبیه‌سازی اقلیمی (با نرم‌افزار ENVI-met) به منظور نقشه‌برداری از جریان‌های باد و پهنه‌بندی فضایی کانون‌های بحرانی در دو بازه انقلاب تابستانه و زمستانه (ساعات ۶ و ۱۶)؛ و دوم، بهره‌گیری از گیاه‌پالایی به عنوان یک راهبرد منظرین‌فازبندی‌شده. این شبیه‌سازی‌ها، با هدف تطابق نقشه‌های سرعت باد و شناسایی الگوهای پراکنش گردوغبار، مبنای سازمان‌دهی فضایی طرح قرار می‌گیرند. بر این اساس، سوالات کلیدی پژوهش عبارتند از: الگوی کاشت‌چندلایه و فضایی متناسب با جریان‌های باد و آلودگی خاک این سایت چیست؟ چگونه می‌توان از گیاهان بومی و گونه‌های پالایش‌گر، نه صرفاً به عنوان ابزار پاک‌سازی، بلکه به عنوان عناصر ساختاری منظر برای ایجاد سایه‌اندازی، کنترل فرسایش بادی، احیای تنوع زیستی و ارتقای آسایش حرارتی استفاده کرد؟ هدف نهایی، نه حذف میراث صنعتی، بلکه تبدیل این زمین فرسوده و آلوده به یک پارک شهری پویا، تاب‌آور، خاطره‌انگیز و سازگار با اقلیم خشک شیراز است تا ضمن مرمت بوم‌شناختی، بستری برای بازگشت زندگی جمعی و پیوند مجدد محلات مسکونی با این عرصه ارزشمند فراهم آورد. بر این اساس، پژوهش حاضر در پی پاسخ به این سؤالات است که الگوی فضایی انتشار آلاینده‌ها و کانون‌های بحرانی گردوغبار در کارخانه سیمان فارس، بر اساس شبیه‌سازی اقلیمی ENVI-met، چگونه قابل شناسایی و پهنه‌بندی است؟ کدام ترکیب از گونه‌های گیاهی، با توجه به توان گیاه‌پالایی، سازگاری با اقلیم خشک شیراز و الزامات طراحی منظر، بیشترین کارایی را در احیای این سایت پساصنعتی دارد؟

۲- پیشینه تحقیق و مبانی نظری

۲-۱- منظر پساصنعتی: تحول مفهومی و پارادایم‌های طراحی

منظر پساصنعتی به عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین عرصه‌های طراحی شهری معاصر، در دو دهه اخیر مورد توجه نظریه‌پردازان قرار گرفته است. این مناظر که بقایای عصر صنعت را در خود جای داده‌اند، نه تنها دارای ارزش‌های تاریخی و هویتی هستند، بلکه به دلیل انباشت آلاینده‌ها و موقعیت راهبردی در بافت شهری، نیازمند رویکردهای نوآورانه در بازطراحی می‌باشند (Loures, 2015; Braae, 2015). تحول رویکردها به منظر پساصنعتی را می‌توان در قالب چهار پارادایم اصلی تبیین کرد:

- پارادایم نخست: بازیافت و حفاظت میراث صنعتی (دهه‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ در اروپا و آمریکای شمالی) بر تبدیل مناطق صنعتی متروکه به فضاهای عمومی غنی از نظر فرهنگی تأکید دارد. در این رویکرد، ویرانه‌ها و سازه‌های صنعتی به‌عنوان عناصر کلیدی طراحی حفظ شده و با پوشش گیاهی وحشی، ویژگی‌های آبی و برنامه‌های عمومی چندمنظوره تلفیق می‌شوند (Biddau et al., ۲۰۲۰; Loures et al., ۲۰۱۱; Panagopoulos, ۲۰۰۷). مطالعات موردی در منطقه رور آلمان، الگویی از ۳۷ اصل طراحی تکرارشونده را برای احیای این مناظر ارائه داده‌اند که بر حفظ حافظه جمعی و خلق تجربیات فضایی متوالی تأکید دارند (Braae, ۲۰۱۵).
 - پارادایم دوم: توسعه مجدد چندمنظوره و اتصال شهری (دهه‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ در مقیاس جهانی) که در فراتحلیل ۳۴۶ مورد تدوین شد (Loures, ۲۰۱۵; Loures et al., ۲۰۱۱)، بر اصول چندمنظوره بودن، اتصال‌پذیری، مرمت اکولوژیکی و ادغام میراث فرهنگی به‌عنوان اصول کلیدی در برنامه‌ریزی و طراحی زمین‌های پساصنعتی تأکید دارد. این رویکرد، منظر پساصنعتی را نه به‌عنوان اشیاء منفرد، بلکه به‌عنوان «سطوح شهری» بزرگ و یکپارچه در نظر می‌گیرد که می‌توانند به شبکه‌های سبز کلان‌شهری متصل شوند (Loures, ۲۰۱۵).
 - پارادایم سوم: تحول مبتنی بر منظر و رویکردهای فرآیندی (دهه‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در اروپا) با معرفی مفهوم «تحول مبتنی بر منظر در مناظر صنعتی جوان» ارائه شد (Heesche et al., ۲۰۲۲). این رویکرد، چشم‌اندازهای صنعتی موجود را به‌عنوان «منابع» می‌نگرد، نه لوح‌های سفید، و چهار استراتژی کلیدی شامل تداخل، استفاده مجدد، بازسازی طبیعت و پایان‌باز (با تأکید بر دیدگاه‌های اجتماعی- فرهنگی، میراثی، بوم‌شناختی و فرآیندی) را شناسایی می‌کند. به‌طور هم‌زمان، پژوهشگران دیگری روش‌های کاربردی‌سازی مجدد را با تأکید بر توانبخشی اکولوژیکی توأم با کارکردهای تفریحی جدید ارائه داده و چهار مفهوم راهنما یعنی آب، زمین، پوشش گیاهی و اشکال معماری کوچک را به‌عنوان عناصر ساختاری منظر پساصنعتی معرفی می‌کنند (Shevchenko & Novoselchuk, ۲۰۲۲; Shevchenko and Novoselchuk, ۲۰۲۳).
 - پارادایم چهارم: رویکردهای یکپارچه و مشارکتی (دهه‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در چین و نظریه جهانی) که با ارائه استراتژی شش‌وجهی طراحی شهری پایدار، منظر را به‌عنوان واسطه‌ای پیونددهنده میان میراث، بوم‌شناسی و مردم معرفی می‌کنند (Wu & Liu, ۲۰۲۳; Zhang & Choi, ۲۰۲۲). در همین راستا و در مطالعات دیگری، با بهره‌گیری از نظریه طرحواره شناختی بصری، طراحی منظر میراث پساصنعتی بر پایه چهار عنصر بصری کلیدی (انسان‌ها، اشیاء، مسیرها، رویدادها) بنا نهاده شد (Wang & Hou, ۲۰۲۴). مطالعات در سئول و حومه آن نیز نشان می‌دهند که پارک‌های پساصنعتی به‌عنوان «اشیاء زیبایی‌شناختی، حاملان خاطرات و سیستم‌های اکولوژیک- فرهنگی» عمل کرده و به ایجاد «جزایر خلاق» درون‌شهری کمک می‌کنند (Höfer & Vicenzotti, ۲۰۱۳; Lee, ۲۰۱۹; Gospodini, ۲۰۰۶).
- در رویکردهای موضوعی معاصر، پژوهشگران با ارائه مدل اکولوژیک منظر و پویایی سیستم، اراضی قهوه‌ای را به‌عنوان سیستم‌های فضایی هم‌پیوست تحلیل کردند (Laforteza et al., 2004; BenDor & Metcalf, 2005). در مطالعه دیگری با نظریه‌سازی از مطالعات موردی، بر استخراج اصول از تجارب موفق تأکید شد (Loures et al., 2008). پژوهش‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای بر تاب‌آوری اقلیمی و رویکردهای طبیعت‌محور متمرکز شده‌اند؛ به عنوان مثال، گیاه‌پالایی به‌عنوان استراتژی توسعه مجدد کم‌هزینه ارزیابی شده است (O'Connor et al., 2019). در مطالعه دیگری، چارچوب فنی- اکولوژیکی صریح مکانی برای مناظر صنعتی ارائه شده است (Charles & Bakshi, 2021). پژوهش دیگری با طبقه‌بندی گونه‌شناختی مناظر پساصنعتی، اصلاح را به‌عنوان تاکتیک طراحی معرفی نمود (Erdem Kaya, 2023). همچنین گروه دیگری از پژوهشگران با استفاده از شبیه‌سازی ENVI-met، بر اهمیت آرایش پوشش گیاهی به‌عنوان متغیر طراحی قابل کنترل برای آسایش حرارتی در احیای سایت‌های صنعتی تأکید دارند (Podhajska et al., 2023; Chen, 2024; Ai & Kim, 2025).

۲-۲- گیاه‌پالایی: مبانی، سازوکارها و کاربردهای طراحی

گیاه‌پالایی^۱ به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین در پاک‌سازی محیط‌های آلوده، در سال‌های اخیر از یک ابزار صرفاً مهندسی به یک راهبرد کلیدی در طراحی منظر پایدار تبدیل شده است. این روش که از گیاهان و میکروارگانیسم‌های همزیست آن‌ها برای جذب، تجزیه یا تثبیت آلاینده‌های خاک، آب و هوا بهره می‌برد (Smith, 2015)، به‌طور فزاینده‌ای با طراحی منظر شهری و زیرساخت‌های سبز تلفیق می‌شود. پژوهش‌های معاصر نشان می‌دهند که گیاه‌پالایی قادر است سایت‌های قهوه‌ای و آلوده شهری را به فضاهای سبز بازیافته‌ای تبدیل کند که علاوه بر پشتیبانی از تنوع زیستی و تنظیم هیدرولوژی شهری، سبب تعدیل جزایر حرارتی، کاهش آلودگی صوتی و ترسیب کربن^۲ می‌شوند (Nissim et al., 2023; Di Stasio et al., 2025; Nissim & Cundy et al., 2016; Chowdhury et al., 2024). مرور متون مرتبط با راهکارهای مبتنی بر طبیعت^۳ و بهسازی پایدار، بر تلفیق پاک‌سازی گیاه‌محور با فضاهای سبز عمومی، پارک‌های محله‌ای و کریدورهای سبز تأکید دارد؛ رویکردی که هم‌زمان با مدیریت مخاطرات زیست‌محیطی، موجب ارتقای ارزش زمین و تقویت زیست‌پذیری و شمول اجتماعی می‌شود (Song et al., 2019; Hou et al., 2023; Cundy et al., 2016; Chowdhury et al., 2024). مرور نظام‌مند ادبیات علمی، پنج سازوکار اصلی را برای گیاه‌پالایی شناسایی می‌کند که هر یک کاربردهای طراحی خاصی دارند (Aryal, 2024; Xiang et al., 2022; Wei et al., 2021; Paripuranam et al., 2025; Bawankar, 2024):

۱) فیلتراسیون ریشه‌ای^۴ شامل جذب آلاینده‌ها از آب زیرزمینی توسط ریشه‌های گیاهی که در طراحی تالاب‌های مصنوعی و آب‌روهای زیستی کاربرد دارد؛ ۲) استخراج گیاهی^۵ که طی آن آلاینده‌ها از خاک به بخش‌های هوایی گیاه منتقل می‌شوند و برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مناسب است؛ ۳) تثبیت گیاهی^۶ با کاهش تحرک آلاینده‌ها در خاک، از گسترش آلودگی جلوگیری کرده و در کنترل فرسایش بادی و آبی مؤثر است؛ ۴) تخریب ریشه‌ای^۷ به تجزیه بیولوژیکی آلاینده‌های آلی در ریزوسفر می‌پردازد؛ و ۵) فراریت گیاهی^۸ که طی آن آلاینده‌ها از طریق برگ‌ها به جو آزاد می‌شوند. چارچوب‌های مفهومی معاصر بر ماهیت چندعملکردی گیاه‌پالایی تأکید دارند؛ در مطالعه‌ای گیاه‌پالایی به‌عنوان راهکاری طبیعت‌محور معرفی شده است که با یکپارچه‌سازی فرآیند پالایش، تنوع زیستی و تاب‌آوری اقلیمی، اراضی آلوده را به فضاهای سبز چندعملکردی تبدیل می‌کند (Di Stasio et al., 2025). پژوهشگران دیگری با نگرش خدمات اکوسیستمی، این فرآیند را از یک اقدام صرفاً آلودگی‌زدایی به بستری برای تأمین خدمات اکوسیستمی تنظیمی، تأمین و فرهنگی (هیدرولوژی، تعدیل جزیره حرارتی، تنوع زیستی، زیبایی‌شناسی و انسجام اجتماعی) بازتعریف می‌کنند (Guidi Nissim et al., 2023). مفهوم پالایش هم‌زیستی گیاه-میکروب (Xiang et al., 2022; Raklami et al., 2022; Wei et al., 2021) بر فرآیندهای هم‌افزای میان گیاه و میکروبیوم جهت تقویت جذب و تخریب آلاینده‌ها تأکید دارد و طراحی خاک و بسترهای کاشت را به‌عنوان «فیلترهای زنده» مطرح می‌کند. در حوزه طراحی پیشگیرانه، مفهوم «حائل‌سازی گیاهی»^۹، برای کاشت پیشگیرانه در نقاط مستعد آلودگی معرفی شده است (Kennen & Kirkwood, 2015). همچنین مطالعه دیگری بر استفاده از گیاهان مهاجم خودانگیخته به‌عنوان متریال طراحی در سایت‌های قهوه‌ای تأکید دارند (Shen et al., 2023).

۲-۳- معیارهای انتخاب گونه‌های گیاهی در طراحی منظر شهری

انتخاب گیاهان مناسب، نقشی کلیدی در اثربخشی گیاه‌پالایی و همسویی آن با اهداف منظر شهری ایفا می‌کند. پژوهش‌های معاصر بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی خاص، تطبیق دقیق آلاینده-گیاه و چارچوب‌های انتخاب طراحی محور تأکید دارند (Di Stasio et al., 2025; Kafle et al., 2022; Zhu et al., 2024). شش معیار اصلی در این زمینه قابل شناسایی است:

الف- اختصاصی بودن آلاینده: برخی گونه‌ها آلاینده‌های فلزی یا ترکیبات آلی خاصی را هدف قرار می‌دهند. برای مثال، گیاه *Bidens pilosa* (از خانواده کاسنی) برای کادمیوم و شمع‌دانی عطری برای نیکل و سرب کارایی بالایی دارند (Kafle et al., 2024).

آلاینده‌های هر سایت انتخاب کنند. (al., 2022; Zhu et al., 2024; Aryal, 2024). این ویژگی، طراحان را ملزم می‌سازد تا گروه‌های گیاهی را متناسب با نوع

ب- تاب‌آوری در سطح آلودگی محلی: رفتار دوگانه گیاه بر اساس شدت آلودگی حائز اهمیت است: یک گونه ممکن است در سطوح پایین آلودگی به‌عنوان «استخراج‌کننده» و در سطوح بالا به‌عنوان «تثبیت‌کننده» عمل کند (Fernández-Braña et al., 2023). در سایت‌های با آلودگی بالا، استفاده از گیاهان بومی تاب‌آور توصیه می‌شود (Fernández-Braña et al., 2021; Matanzas et al., 2023).

ج- زیست‌توده و سیستم ریشه‌ای: زیست‌توده بالا و ریشه‌های عمیق یا متراکم، میزان جذب کل آلاینده‌ها را افزایش می‌دهند (Kafle et al., 2022; Paripuram et al., 2025). گونه‌های چوبی مانند صنوبر و بید به‌دلیل رشد سریع و زیست‌توده بالا برای سایت‌های شهری ترجیح داده می‌شوند (Di Stasio et al., 2025; Kafle et al., 2022).

د- سازگاری با اقلیم و خاک‌های محلی: این معیار، میزان بقا را افزایش، هزینه‌های نگهداری را کاهش و از عملکردهای اکوسیستمی پشتیبانی می‌کند (Aryal, 2024; Paripuram et al., 2025). راهنمای گیاه‌پالایی بر استفاده از گونه‌های بومی یا بسیار سازگار در زیرساخت‌های سبز شهری تأکید دارد (Jacklin et al., 2021). استفاده از گیاهان بومی خودرو می‌تواند تاب‌آوری سامانه را افزایش دهد (Shen et al., 2023; Matanzas et al., 2021; Khan et al., 2023).

ه- ارزش زیبایی‌شناختی و پذیرش عمومی: بسیاری از درختان و گیاهان زینتی می‌توانند هم‌زمان در حذف آلاینده‌ها نقش ایفا کنند و خدمات اکوسیستمی نظیر سایه‌اندازی، کاهش دما و فراهم‌سازی زیستگاه را ارائه دهند (Di Stasio et al., 2025; Sawarkar et al., 2023; Capuana, 2020; Rocha et al., 2022). استفاده از گونه‌های زینتی، پتانسیل بالایی در جذب گردشگر و درآمدزایی پایدار ایجاد می‌کند (Rocha et al., 2022; Aryal, 2024).

و- وضعیت تهاجمی بودن: برخی گیاهان پالایش‌گر قوی، گونه‌های تهاجمی محسوب می‌شوند که نیازمند ایجاد تعادل میان بازدهی پالایش و ریسک اکولوژیکی هستند (Shen et al., 2023; Jacklin et al., 2021; Khan et al., 2023). راهنماها توصیه می‌کنند گیاهان پالایش‌گر اثبات‌شده حداقل ۵۰ درصد ترکیب کاشت را تشکیل دهند (Jacklin et al., 2021). ابزارهای تصمیم‌گیری مانند ماتریس‌های چندمعیاره امکان انتخاب گونه‌هایی را فراهم می‌کنند که مزایای جانبی نظیر تولید انرژی زیستی را نیز تأمین کنند (Amabogha et al., 2023).

در کنار این معیارها، چارچوب‌های نوین بر استانداردسازی سیستم‌های گیاه‌پالایی تأکید دارند؛ برای نمونه در مطالعه‌ای با ارائه چارچوب شاخص‌های قابل‌سنجش، بر لزوم برخورد با تالاب‌های مصنوعی به‌عنوان واحدهای مهندسی‌شده تأکید شده است (Nguyen et al., 2025). پژوهش دیگری با رویکرد «گونه‌های شاخص»، بر استفاده از تحلیل اکولوژیک برای شناسایی گونه‌های بومی کلیدی تأکید می‌کند (Ahmad et al., 2025). در مطالعه دیگری، گیاه‌پالایی به‌عنوان چارچوبی برای پایداری و احیای اکوسیستم معرفی شده است که با یکپارچه‌سازی کاشت‌های پالایش‌کننده در طراحی‌های بلندمدت، فضاهای سبزی خلق می‌کند که از نظر بصری خوانا و از نظر اجتماعی پذیرفته‌شده باشند (Khan et al., 2023; Ghadge et al., 2026; Zaman et al., 2024; Aryal, 2024).

۳- روش‌شناسی و محدوده مورد مطالعه

۳-۱- مراحل انجام پژوهش

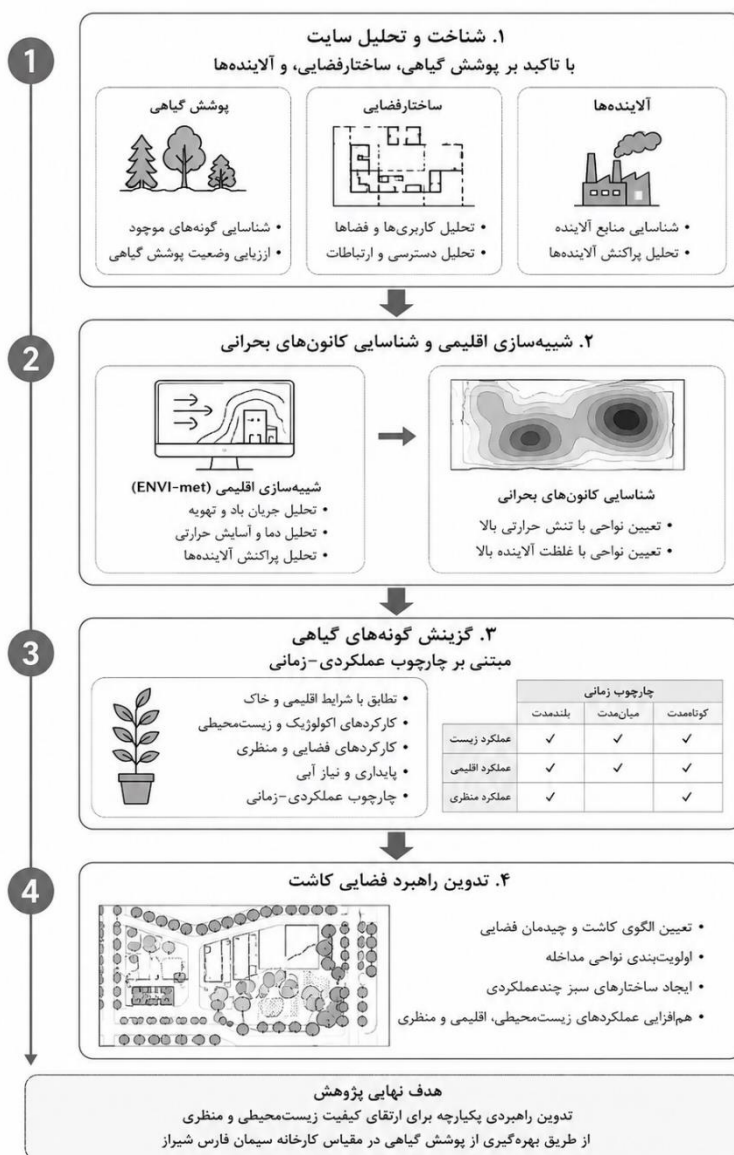
پژوهش حاضر با رویکردی ترکیبی و با هدف تدوین راهبرد بازطراحی منظر کارخانه سیمان فارس شیراز انجام شده است. روش‌شناسی پژوهش در چهار گام اصلی شامل (۱) شناخت و تحلیل سایت با تأکید بر پوشش گیاهی، ساختارفضایی، و آلاینده‌ها، (۲) شبیه‌سازی اقلیمی و شناسایی کانون‌های بحرانی، (۳) گزینش گونه‌های گیاهی مبتنی بر چارچوب عملکردی-زمانی، و (۴) تدوین راهبرد فضایی کاشت، سازماندهی شده است (شکل ۱).

شبیه‌سازی‌های اقلیمی با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met و با تمرکز بر الگوی جریان باد در سایت انجام شد. به‌منظور پوشش شرایط شاخص اقلیمی، دو روز نماینده شامل انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی انتخاب و برای هر یک دو بازه زمانی ساعت ۶ صبح و ۱۶ بعدازظهر مورد تحلیل قرار گرفت تا تغییرات رفتار باد در شرایط حداقل و حداکثر بار حرارتی روزانه بررسی شود. خروجی‌های مدل شامل میدان سرعت و جهت باد، مبنای استخراج پهنه‌های بحرانی انتشار گردوغبار قرار گرفت. سپس این پهنه‌ها به‌عنوان لایه تصمیم‌گیری در طراحی منظر مورد استفاده قرار گرفتند؛ به‌گونه‌ای که محل استقرار کمربندهای سبز، بادشکن‌های گیاهی، بافرهای زیستی و آرایش گونه‌های گیاهی بر اساس الگوی جریان‌های غالب باد تعیین گردید.

شکل ۱- نمودار مراحل انجام پژوهش

چارچوب روش‌شناسی پژوهش

راهبرد بازطراحی منظر کارخانه سیمان فارس شیراز



۳-۲- معرفی کارخانه سیمان فارس و بررسی آلودگی‌های موجود

نمونه موردی پژوهش، کارخانه سیمان فارس واقع در جنوب غرب شیراز (استان فارس، ایران) با مساحت تقریبی ۴۵ هکتار است. این کارخانه در ارتفاع ۱۴۸۶ متری از سطح دریا، در اقلیم نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه ۳۰۷ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه ۱۷.۳ درجه سانتی‌گراد (حداکثر ۴۳.۲ درجه) و حدود ۵۴ روز یخبندان در سال قرار دارد. سایت مورد نظر در مجاورت بافت مسکونی محلات کارخانه سیمان، گلستان و طاووسیه واقع شده و فاصله نزدیک‌ترین خانه‌های مسکونی تا کوره‌های کارخانه کمتر از ۲۰۰ متر است. عمده‌ترین منبع آلودگی کارخانه سیمان فارس مربوط به فرایند تولید سیمان است که شامل استخراج سنگ آهک، آسیاب مواد اولیه، همگن‌سازی مواد اولیه، پیش گرم کردن مواد، پخت مواد در کوره، سرد کردن کلینکر^۱، تولید سیمان و بسته‌بندی سیمان می‌شود. این فرایندها موجب انتشار ذرات معلق، اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد و فلزات سنگین در خاک و هوا می‌گردد. مهم‌ترین اثر سوء کارخانه‌های سیمان بر محیط اطراف انتشار گردوغبار و گازهای آلاینده است. در واقع کارخانه‌های سیمان، ابتدا هوا را آلوده می‌کنند و سپس این آلودگی از طریق هوا رسوب و به خاک منتقل می‌شود و در مراحل بعدی حتی می‌تواند به پیکره گیاهان، جانوران و نهایتاً انسان وارد شود. با بررسی‌های صورت گرفته از این سایت، غلظت گردوغبار در این کارخانه از حد استاندارد بالاتر بوده و وجود دی‌اکسید گوگرد که ناشی از سوخت‌های فسیلی است موجب صدمات متعددی خواهد شد که هم برای تنفس و ریه انسان مضر بوده و هم می‌تواند به صورت باران اسیدی بر خاک و گیاهان آن منطقه بارد و اثرات زیانباری به جای بگذارد (حفظاله، ۱۳۷۰).

۳-۳- چارچوب مفهومی بر اساس رویکرد گیاه‌پالایی و ماتریس عملکرد:

به منظور دستیابی به یک رویکرد عملیاتی و سیستماتیک در گزینش گونه‌های گیاهی برای گیاه‌پالایی، یک چارچوب دوجهی مبتنی بر تلفیق معیارهای زیست‌محیطی و نیازهای طراحی منظر تدوین گردید. این چارچوب با بهره‌گیری از اصول ارائه‌شده در پژوهش‌های پیشین (Kafle et al., 2022; Aryal, 2024; Fernández-Braña et al., 2023; Jacklin et al., 2021) توسعه یافته و دو معیار اصلی را دربرمی‌گیرد:

معیار اول: میزان اثربخشی در جذب آلاینده که بیانگر توانایی گیاه در جذب طیف و حجم معینی از فلزات سنگین یا سایر آلاینده‌های شناسایی‌شده در خاک سایت است؛ چقدر گیاه در جذب فلزات سنگین مؤثر است؟ آیا این گیاه قادر است طیف وسیعی از فلزات را جذب کند یا فقط به یک نوع خاص محدود می‌شود؟

معیار دوم: مدت زمان لازم برای اثرگذاری که مشخص می‌کند گیاه در چه بازه زمانی قادر به کاهش معنادار آلاینده‌های خاک است؛ چقدر طول می‌کشد تا گیاه شروع به کاهش آلاینده‌های خاک کند؟ آیا این گیاه یک راه حل سریع و کوتاه‌مدت است یا یک راه حل بلندمدت؟

بر اساس تلفیق این دو معیار و با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی خاص شیراز (اقلیم نیمه‌خشک با کمبود آب و خاک‌های قلیایی)، گیاهان در سه سطح عملکردی-زمانی طبقه‌بندی و در ادامه، به عنوان معیارهای انتخاب گونه‌های گیاهی بر اساس توانایی جذب فلزات سنگین از خاک مورد استفاده قرار گرفت:

- سطح ۱- اثربخشی بالا، اثرگذاری کوتاه‌مدت: این گیاهان قادر به جذب سریع و قابل توجه فلزات سنگین هستند و برای مواقعی که نیاز به پاک‌سازی سریع یک منطقه آلوده وجود دارد، مناسب هستند.
- سطح ۲- اثربخشی متوسط، اثرگذاری میان‌مدت: این گیاهان به تدریج فلزات سنگین را از خاک جذب می‌کنند و برای مواقعی که زمان بیشتری برای پاک‌سازی آلودگی وجود دارد، مناسب هستند.
- سطح ۳- اثربخشی کم، اثرگذاری بلندمدت: این گیاهان به آرامی فلزات سنگین را از خاک جذب می‌کنند و برای مواقعی که نیاز به پاک‌سازی بلندمدت یک منطقه آلوده وجود دارد، مناسب هستند (جدول ۱).

جدول ۱- سطوح عملکردی-زمانی منتخب برای اتخاذ رویکرد گیاه‌پالایی

سطح	عنوان	اثربخشی	بازه زمانی	مکانیسم غالب
-----	-------	---------	------------	--------------

سطح ۱	ضربتی	بالا	کوتاه مدت (۳-۶ ماه)	استخراج گیاهی
سطح ۲	میان مدت	متوسط	میان مدت (۱-۳ سال)	تشبیت گیاهی / تخریب ریشه ای
سطح ۳	بلند مدت پایدار	تدریجی	بلند مدت (۳-۱۰ سال)	تشبیت گیاهی عمیق / فیلتراسیون ریشه

۳-۴- فرآیند غربالگری و گزینش نهایی گونه‌ها

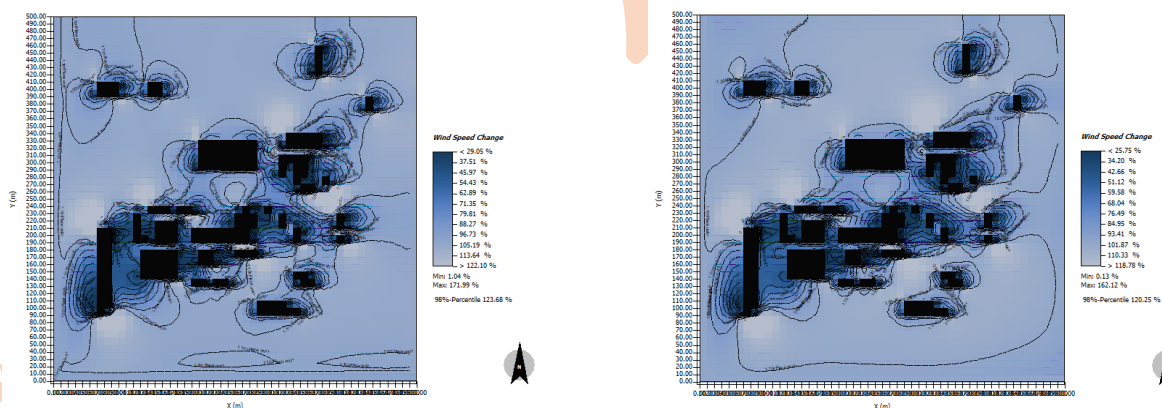
فرآیند غربالگری و گزینش نهایی گونه‌ها به صورت زیر انجام شد: (۱) استخراج فهرست اولیه از گیاهان بومی و سازگار با اقلیم شیراز بر اساس منابع معتبر (فلور ایران و پایگاه داده گیاهان بومی)، (۲) پالایش فهرست بر اساس توانایی گیاه پالایی مستند شده در ادبیات علمی برای آلاینده‌های هدف، (۳) تطبیق گونه‌های باقیمانده با سه سطح عملکردی-زمانی بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی پیشین، و (۴) بررسی نهایی سازگاری با شرایط اقلیمی و خاکی منطقه. در پایان، برای هر سطح، ۲ تا ۳ گونه اولویت‌داری انتخاب شد که ضمن تأمین اهداف پالایش، از نظر زیبایی‌شناختی و خدمات اکوسیستمی (سایه‌اندازی، جذب گرده‌افشان و ...) نیز واجد ارزش باشند.

۴- یافته‌ها

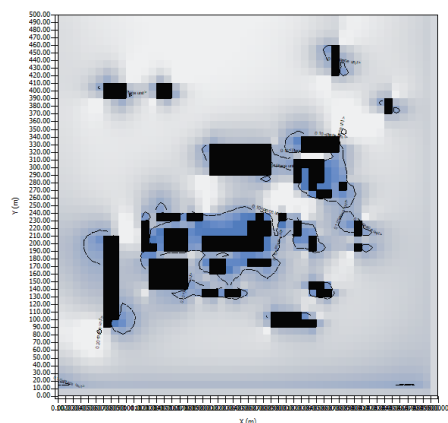
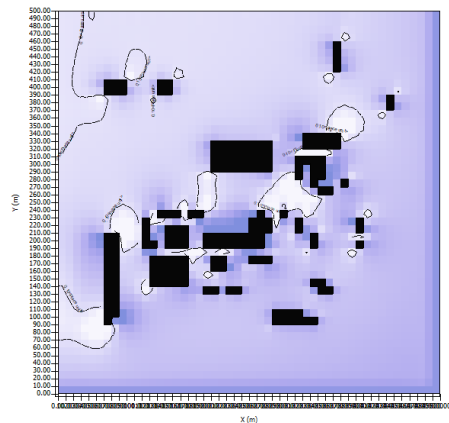
۴-۱- نتایج شبیه‌سازی باد و راهکارهای کالبدی مدیریت مناطق بادخیز

برای شناسایی کانون‌های بحرانی انتشار گردوغبار، شبیه‌سازی جریان باد با نرم‌افزار ENVI-met در چهار بازه زمانی کلیدی (انقلاب تابستانه (شکل ۲) و زمستانه (شکل ۳) در ساعات ۶ و ۱۶) انجام شد. این بازه‌ها نماینده شرایط دمایی و الگوی وزش باد در اقلیم شیراز هستند و تحلیل خروجی‌های سرعت باد، امکان شناسایی پهنه‌های پرخطر و ارائه راهکارهای متناسب را فراهم می‌آورد:

شکل ۲- سمت راست: بررسی سرعت باد در ساعت ۱۶ بعد از ظهر اول تیرماه (انقلاب تابستانه)؛ سمت چپ: بررسی سرعت باد در ساعت ۶ صبح اول تیرماه (انقلاب تابستانه)

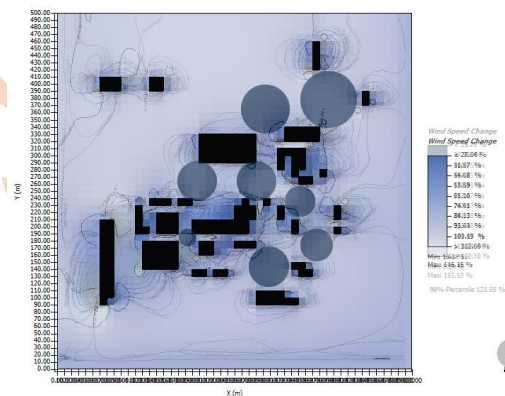


شکل ۳- سمت راست: بررسی سرعت باد در ساعت ۱۶ بعد از ظهر اول دی‌ماه (انقلاب زمستانه)؛ سمت چپ: بررسی سرعت باد در ساعت ۶ صبح اول دی‌ماه (انقلاب زمستانه)



تحلیل خروجی‌های سرعت و جهت جریان باد در نرم‌افزار ENVI-met نشان می‌دهد که پهنه‌های مشخصی از سایت، به‌ویژه در جبهه‌های غربی و شمال غربی، به دلیل انطباق با جهت وزش بادهای غالب اقلیم شیراز، بالاترین پتانسیل و ریسک را در راستای انتشار آلاینده‌های پسا صنعتی و برخاستن گردوغبار دارا هستند (شکل ۴). این مناطق به‌عنوان «زون‌های بحرانی و پرخطر» فیلتر شده و در فرآیند بازطراحی منظر کارخانه سیمان به عنوان اولویت‌های مداخله کالبدی در نظر گرفته شدند. بنابراین، نتایج شبیه‌سازی تنها به شناسایی الگوی جریان باد محدود نشد، بلکه به‌عنوان مبنای اولویت‌بندی مداخلات طراحی مورد استفاده قرار گرفت. به بیان دیگر، شدت و جهت جریان باد به شاخصی برای تعیین مکان استقرار عناصر منظر تبدیل شد؛ به‌گونه‌ای که مداخلات گیاه‌پالایی، کمربندهای سبز، بادشکن‌های زیستی و بافرهای گیاهی ابتدا در پهنه‌های دارای بیشترین ریسک انتشار آلاینده‌ها پیش‌بینی شدند و سپس سایر بخش‌های سایت بر اساس نقش اکولوژیکی و عملکردی سازماندهی گردیدند. در این راستا، به‌منظور مهار این کانون‌های بادخیز، تعدیل سرعت جریان باد در مجاورت سازه‌های باقی‌مانده کارخانه و پیشگیری از انتشار ریزگردها، راهکارهای منظرین و فضایی زیر اتخاذ گردید:

شکل ۴- تطابق خروجی‌های سرعت باد و علامت‌گذاری نقاطی که سرعت باد در آن‌ها بیشتر است.



۱. توسعه لایه‌ای دیوارهای سبز: پیاده‌سازی دیوارهای سبز عمودی بر روی جداره‌ها و سازه‌های صنعتی موجود در زون‌های پرخطر، جهت شکستن ساختار جریان باد و فیلتراسیون ذرات معلق.

۲. توپوگرافی کاهنده و تغییر تراز زمین^{۱۱}: به کارگیری تکنیک پایین بردن تراز زمین (ایجاد گودال باغچه‌ها و پهنه‌های فرورفته لنداسکیپی) در مسیر بادهای غالب غربی، با هدف هدایت جریان باد به لایه‌های پایینی، ایجاد محرمیت اقلیمی و کاهش مکانیکی قدرت و سرعت وزش باد سطحی.

۳. کاشت خطی درختان همیشه‌سبز مرتفع^{۱۲}: استفاده از گونه‌های درختی بومی مرتفع و همیشه‌سبز به صورت متراکم و خطی در مرزهای غربی سایت، جهت ایجاد بادشکن‌های بیولوژیکی اکولوژیک.

۴. شکل‌دهی بافرهای سبز متراکم: خلق دیوارهای طبیعی و توده‌های گیاهی انبوه چندلایه (ترکیب درخت، درختچه و پوشش زمین) در پیرامون کوره‌ها و بناهای اصلی کارخانه، جهت حبس فیزیکی ذرات آهک و سیمان و مانع‌شدن از جابجایی آن‌ها به سمت بافت شهری مجاور.

به‌منظور تبدیل خروجی‌های شبیه‌سازی به تصمیمات طراحی، نتایج مدل ENVI-met صرفاً به‌عنوان داده‌های توصیفی تلقی نشدند، بلکه در قالب شاخص‌های طراحی منظر تفسیر شدند. در این چارچوب، پهنه‌های دارای سرعت بیشتر باد به‌عنوان اولویت نخست استقرار کمرندهای سبز و بادشکن‌های گیاهی، نواحی با تمرکز بالاتر انتشار گردوغبار به‌عنوان زون‌های نیازمند گیاه‌پالایی ضربتی، و بخش‌های برخوردار از شرایط پایدارتر جریان هوا به‌عنوان عرصه توسعه ساختار بلندمدت منظر و استقرار گونه‌های بومی در نظر گرفته شدند. بدین ترتیب، خروجی‌های شبیه‌سازی اقلیمی مستقیماً به معیارهای مکان‌یابی، انتخاب گونه‌های گیاهی و سازماندهی فضایی پالت کاشت تبدیل شدند و مبنای تدوین سناریوهای طراحی منظر قرار گرفتند.

۴-۲- ماتریس زمان‌بندی، اثربخشی و سناریوهای چیدمان منظرین گیاهان پالایش‌کننده

به‌منظور دستیابی به یک مدل عملیاتی در بازطراحی منظر کارخانه سیمان فارس شیراز، فرآیند انتخاب گونه‌های گیاهی بر اساس یک فیلتراسیون سه‌مرحله‌ای شامل: (۱) سنجش پتانسیل پاک‌سازی نوع آلاینده سیمان (فلزات سنگین و ذرات معلق)، (۲) انطباق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک شیراز (مقاومت به خشکی و کم‌آبی)، و (۳) نرخ رشد و میزان سایه‌اندازی (بهبود میکروکلیماتیک سایت) انجام گرفت. بر این اساس، گونه‌های منتخب در سه سطح زمانی و اثربخشی طبقه‌بندی شده (جدول ۲) و سپس در قالب سه سناریوی چیدمان فضایی (لنداسکیپی) سازماندهی شده‌اند.

تحلیل ساختاری این پالت گیاهی نشان می‌دهد که سطوح سه‌گانه عملکردی-زمانی با طیفی از نرخ سایه‌اندازی همراه هستند که بر کاربری کالبدی آن‌ها در سایت دلالت دارد. گونه‌های سطح اول (ضربتی) با نرخ سایه‌اندازی غالباً کم تا متوسط (۲۰-۳۰٪) - به‌جز صنوبر با ۳۰-۴۰٪ - عمدتاً می‌توانند در زون‌های بحرانی و کریدورهای خطی حاشیه آلودگی و برای پالایش اولیه مستقر می‌شوند. گونه‌های سطح دوم (میان‌مدت) با نرخ بسیار کم تا کم (۲۰-۵٪) برای کمرندهای مهار باد، تثبیت بستر، پوشش سطحی وسیع، و پیچ‌های تصفیه متمرکز مناسب هستند. در مقابل، گونه‌های سطح سوم (بلندمدت) با دارا بودن نرخ سایه‌اندازی بالا تا عالی (۶۰-۳۰٪) نقش اصلی را در ایجاد سایه‌اندازی فعال، اسکلت پایدار منظر، کریدورهای سبز، و بافرهای بصری-صوتی ایفا خواهند کرد.

جدول ۲- ماتریس جامع گونه‌های گیاهی با توجه به شرایط اقلیمی در سه سطح زمانی و اثربخشی طبقه‌بندی شده

سطح ۱: اثربخشی بالا، اثرگذاری کوتاه‌مدت (با توجه به شرایط اقلیمی برای پالایش ضربتی بار آلودگی اولیه)	
صنوبر (Populus)	مکانیسم اصلی پالایش: استخراج گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: جذب و انتقال فلزات سنگین از خاک به اندام‌های هوایی؛ مناسب به عنوان یک راه حل سریع برای پاکسازی سریع و اولیه مناطق فوق‌العاده آلوده. انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: رشد سریع؛ مقاوم به خشکی اما نیازمند مدیریت آب در فازهای اولیه رشد.
آفتابگردان (Helianthus annuus)	مکانیسم اصلی پالایش: استخراج گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: جذب فلزات سنگین از جمله سرب و کادمیوم از طریق ریشه و ذخیره در بافت‌های هوایی. انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: قابلیت رشد در شرایط نسبتاً خشک؛ تولید دانه برای زنجیره غذایی پرندگان
شمعدانی معطر (Pelargonium)	مکانیسم اصلی پالایش: استخراج گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: استخراج شدید سرب از بستر خاک و انباشت در بافت‌های گیاهی. انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: مقاومت بالا در برابر شرایط خشک شهری شیراز
سطح ۲: اثربخشی متوسط، اثرگذاری میان‌مدت (با توجه به شرایط اقلیمی برای تثبیت بستر و کنترل فرسایش)	
علف بوریای موئین (Agrostis tenuis)	مکانیسم اصلی پالایش: تثبیت گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: پاکسازی تدریجی خاک، کاهش و تثبیت فلزات سنگین مانند سرب، روی و مس. انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: بسیار مقاوم به خشکی؛ مناسب برای پوشش وسیع مناطق خشک و نیمه‌خشک.
خس خس (Vetiver)	مکانیسم اصلی پالایش: تثبیت گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: جذب سرب از طریق ریشه؛ ریشه‌های بسیار عمیق و متراکم. انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: فوق‌العاده مقاوم به خشکی و شرایط سخت؛ ابزار اصلی کنترل فرسایش خاک
تاج خروس (Amaranthus spinosus)	مکانیسم اصلی پالایش: استخراج گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: جذب فلزات و تجمع در برگ‌ها؛ جذب و رهاسازی متیل‌جیوه از طریق برگ (فرانهاشتگر^{۱۳}). انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: سازگار با خاک‌های فقیر پسا صنعتی.
	مکانیسم اصلی پالایش: استخراج گیاهی

قدومه / گل عسل (Alyssum)	توضیحات تعامل با فلزات سنگین: استخراج گیاهی نیکل، سرب و کادمیوم؛ تحمل غلظت‌های بسیار بالایی از سمیت خاک بدون آسیب دیدن (فراانباشتگر). انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: بسیار بالا (بومی مناطق خشک و مقاوم به خاک‌های قلیایی و آهکی سیمان)؛ گیاه پوششی با سایه‌اندازی کم (حدود ۵ درصد) جهت تثبیت ریزگردهای سطحی بستر به عنوان مانع برخاستن گرد و غبار.
خردل هندی (Brassica juncea)	مکانیسم اصلی پالایش: استخراج گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: استخراج، جذب، انتقال و ذخیره‌سازی فلزات سنگین نظیر مس، کادمیوم و روی از خاک پسا صنعتی از طریق سیستم ریشه‌ای به اندام‌های هوایی (فراانباشتگر). انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: دارای مقاومت نسبی به کم‌آبی و خشکی اقلیم شیراز است و نیازمند پایش دوره‌ای و مدیریت آبیاری بهینه در فازهای میانی برای بازدهی حداکثری پالایش؛ با نرخ سایه‌اندازی بسیار کم (حدود ۵ درصد)، به عنوان یک لایه پوششی متمرکز در برای تصفیه خاک.
سطح ۳: اثربخشی کم، اثرگذاری بلندمدت (با توجه به شرایط اقلیمی برای پایداری اکولوژیک بستر) ^{۱۴}	
درخت کُناَر (سدر) Ziziphus – (spina-christi)	مکانیسم اصلی پالایش: فیلتراسیون ریشه و تثبیت گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: دارای مقاومت بیولوژیکی فوق‌العاده‌ای در برابر سمیت خاک‌های پسا صنعتی و پتانسیل بالا در جذب فلزات سنگین بستر (به‌ویژه سرب و کادمیوم) در توده ریشه‌ای عمیق و جلوگیری از شستشو یا انتقال آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی. انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: بومی مناطق جنوبی و کاملاً سازگار با اقلیم گرم و خشک شیراز؛ درختی همیشه‌سبز با تاج پهن و سایه‌اندازی عالی (۴۰ تا ۶۰ درصد).
درخت داغداغان (Celtis australis)	مکانیسم اصلی پالایش: تثبیت گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: توانایی جذب و ذخیره‌سازی عناصر سنگین مانند روی، مس و کروم در بافت‌های چوبی خود بدون اختلال در رشد. انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: بسیار مقاوم به خشکی، بادهای شدید و خاک‌های آهکی و قلیایی (مشابه بستر کارخانجات سیمان شیراز)؛ درختی خزان‌پذیر با تاجی متراکم و گرد با سایه‌اندازی بسیار مناسبی در فصول گرم، و دارای ریشه‌های منشعب و قوی به عنوان یک مهارکننده عالی برای فرسایش خاک در زون‌های شیب‌دار یا دست‌خورده.
درختچه بادام کوهی (Prunus scoparia) (Amygdalus scoparia)	مکانیسم اصلی پالایش: تثبیت گیاهی توضیحات تعامل با فلزات سنگین: دارای مکانیسم تثبیت در ریشه‌های افشان و مقاوم خود برای محدود کردن تحرک فلزات سنگین را در خاک از طریق ترشح ترکیبات آلی در اطراف خود، پسا صنعتی محدود کرده و کاهش ریسک انتشار آلودگی. انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: گونه‌ای کاملاً بومی با نیاز آبی نزدیک به صفر پس از استقرارهای اولیه (دیم مطلق)؛ دارای اسکلت‌بندی سبز توده‌ای به عنوان بادشکن سطحی کم‌ارتفاع.
	مکانیسم اصلی پالایش: تثبیت گیاهی

درخت بنه (پسته وحشی) – (Pistacia atlantica)	توضیحات تعامل با فلزات سنگین: توانایی بیولوژیکی بالا در تحمل غلظت‌های زیاد فلزات سنگین و تثبیت زیستی آلاینده‌های پودری سیمان در بستر خاک. این گونه به دلیل طول عمر زیاد، پایداری بلندمدت زون‌های تصفیه را تضمین می‌کند.
درختچه خرزهره بومی (Nerium oleander)	انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: پایداری مفرط در برابر خشکسالی‌های طولانی‌مدت و گرما و بومی دامنه‌های زاگرس و شیراز؛ درختی خزان‌پذیر با ایجاد سایه‌اندازی لکه‌ای و نیمه‌متراکم.
	مکانیسم اصلی پالایش: تثبیت گیاهی
	توضیحات تعامل با فلزات سنگین: جذب فوق‌العاده قوی برای سرب و کادمیوم خاک و همچنین جذب ذرات معلق و گرد و غبار سیمان از طریق کرک‌های مومی برگ‌ها؛ این گیاه مکانیسم موازی تصفیه خاک و تصفیه فیلتراسیون هوا را همزمان پیش می‌برد.
	انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: سازگاری مطلق با آب و هوای گرم و خشک شیراز، مقاوم به کم‌آبی شدید و خاک‌های فقیر پسا صنعتی؛ درختچه‌ای همیشه‌سبز، سریع‌الرشد و متراکم با قابلیت کاربرد به عنوان دیوار سبز صوتی و بصری پیرامون سایت سیمان جهت مهار بادهای آلوده.
	مکانیسم اصلی پالایش: تثبیت گیاهی
اسطوخودوس (Lavandula)	توضیحات تعامل با فلزات سنگین: جذب و کنترل عناصر سنگین در خاک از طریق پالایش سطحی و تثبیت در ریشه‌گاه و ممانعت از انتشار و جابجایی ذرات آلوده به دلیل ماهیت درختچه‌ای خود.
	انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: سازگاری بسیار بالا با اقلیم گرم و خشک شیراز و مقاومت فوق‌العاده در برابر تنش‌های کم‌آبی و خاک‌های فقیر؛ درختچه‌ای پایدار، همیشه‌سبز و معطر با نرخ سایه‌اندازی کم (حدود ۲۰ درصد).
	مکانیسم اصلی پالایش: تخریب ریشه‌ای
بومادران (Achillea)	توضیحات تعامل با فلزات سنگین: اصلاح بیولوژیک خاک از طریق تقویت میکروارگانیسم‌های ریشه‌گاه و تعدیل سمیت فلزات سنگین بستر کارخانه با تثبیت زیستی.
	انطباق اقلیمی (شیراز) و ویژگی لنداسکیپ: گونه‌ای کاملاً بومی، مقاوم و منطبق با شرایط اکولوژیک دشت شیراز و مقاوم به کم‌آبی شدید و خاک‌های قلیایی آهکی حساسیت؛ یک گیاه پوششی چندساله با نرخ سایه‌اندازی متوسط (حدود ۳۰ درصد) و مناسب برای کنترل فرسایش خاک.

تحلیل ماتریس جامع گونه‌ها نشان می‌دهد که سطوح سه‌گانه با طیفی از سازوکارهای پالایش همراه هستند: سطح اول (ضربتی) عمدتاً مبتنی بر استخراج گیاهی است. سطح دوم (میان‌مدت) اگرچه غالباً بر تثبیت گیاهی و تخریب ریشه‌ای استوار است، اما گونه‌هایی نظیر خردل هندی، تاج‌خروس و قدومه با مکانیسم استخراج گیاهی، تنوع عملکردی این سطح را افزایش می‌دهند. سطح سوم (بلندمدت) نیز اگرچه با تثبیت عمیق و فیلتراسیون ریشه مشخص می‌شود، اما داغداغان با فراانباشتگری (بیش‌اندوزی) در بافت چوبی، نمونه‌ای از استخراج گیاهی در این سطح است. این تنوع در سازوکارها، انعطاف‌پذیری پالت گیاهی را در مواجهه با آلاینده‌های گوناگون و شرایط متفاوت سایت تضمین می‌کند. بنابراین ترکیبی از گیاهان بومی از این سطوح سه‌گانه می‌تواند بهترین گزینه برای گیاه پالایی خاک در کارخانه سیمان فارس شیراز باشد تا ضمن تأمین هدف پژوهش، منجر به خلق منظری با پوشش گیاهی بومی و مطلوب از نگاه آسایش حرارتی و سایه‌اندازی گردد.

۵. بحث

۵-۱- سناریوهای سه گانه چیدمان و ساختار فضایی کاشت

پس از تعیین ویژگی‌های زمانی گیاهان و تطابق آن‌ها با خروجی‌های شبیه‌سازی باد در نرم‌افزار ENVI-met، پالت گیاهی نهایی (جدول ۳) به دست آمد. تحلیل ساختاری این پالت گیاهی منتخب (جدول ۳) نشان می‌دهد که چینش گونه‌ها بر اساس یک نظام عملکردی متقاطع (گیاه‌پالایی و میکروکلیماتیک) سازماندهی شده است؛ به طوری که درختان کُنار و داغداغان با تأمین بالاترین نرخ سایه‌اندازی (تا ۶۰٪)، عناصر کلیدی طرح در زون‌های نیازمند ارتقای آسایش حرارتی عابرین پیاده و تعدیل اثرات جزیره حرارتی سایت به شمار می‌روند. در لایه درختچه‌ای، گونه ترخ به دلیل ساختار منعطف و متراکم، علاوه بر سایه‌اندازی متوسط، مأموریت کالبدی یک سد فیزیکی (دیوار سبز) را جهت فیلتراسیون جریان‌های باد آلوده بر عهده دارد، در حالی که درختچه‌های بادام کوهی و بنه با وجود سایه‌اندازی کمتر، به دلیل پتانسیل دیم مطلق، اسکلت‌بندی توده‌ای منظر پسا صنعتی را در فازهای توسعه بلندمدت بدون نیاز به آبیاری پایدار نگه می‌دارند. در نهایت، گیاهان علفی و پوششی نظیر علف بور یابی موئین، قدومه و تاج‌خروس با داشتن کمترین نرخ سایه‌اندازی (۰ تا ۱۵ درصد)، نه با هدف ایجاد سایه، بلکه به عنوان خاک‌پوش‌های^{۱۵} بیولوژیکی در سطح زمین مستقر می‌شوند تا با تثبیت بستر قلیایی کارخانه، مستقیماً جلوی فرسایش بادخیز و انتشار ریزگردهای سمی شناسایی‌شده توسط نرم‌افزار ENVI-met را گرفته و به صورت موازی فرآیند گیاه‌پالایی خاک را تکمیل نمایند.

جدول ۳- پالت گیاهی نهایی: ترکیب گونه‌های گیاهی و انطباق با معیارهای تصفیه و منظر سایت سیمان فارس

سطح	گونه‌های شاخص	سازوکار غالب	نرخ سایه‌اندازی	محدوده پیشنهادی در سایت
ضربتی (کوتاه‌مدت)				
۱	صنوبر	استخراج گیاهی	متوسط (۳۰-۴۰٪)	کاشت خطی حاشیه زون آلوده
	شمعدانی معطر		کم (۱۵-۲۰٪)	کاشت در حاشیه مسیرهای پیاده و مبلمان فضاهای جمعی
	آفتابگردان		متوسط (۳۰٪)	بسترهای کاشت پارک
میان‌مدت				
۲	خس‌خس (وتیور)	تثبیت گیاهی / تخریب ریشه‌ای	کم (۱۰-۱۵٪)	کمربند مهار باد زون غربی
	خردل هندی		بسیار کم (۵٪)	پچ‌های تصفیه متمرکز خاک
	علف بور یابی موئین		بسیار کم (نزدیک به صفر / چمن‌زار)	پوشش وسیع مناطق خشک سطحی جهت مهار ریزگردهای سیمان
	اسطوخودوس		کم (۲۰٪)	زون‌های میانی و مسیرهای پیاده
	بومادران		متوسط (۳۰٪)	کاشت پوششی زون‌های تفریحی
	تاج خروس		کم (۱۵٪)	زون‌های باز اراضی دست‌خورده و پیرامون کوره‌های سیمان
	قدومه (گل عسل)		بسیار کم (حدود ۵٪)	گیاه پوششی (کاور سطحی) جهت مانع پیشگیری از برخاستن غبار
	بلندمدت پایدار			
۳	کُنار (سدر)	تثبیت عمیق / فیلتراسیون ریشه	عالی (۴۰-۶۰٪)	سایه‌اندازی فعال مسیرهای پیاده و زون‌های تجمع
	داغداغان		مناسب و متراکم (۳۵-۵۰٪)	تثبیت بستر شیب‌دار و زون‌های دست‌خورده سایت
	بادام کوهی		بسیار کم (۵-۱۰٪) - ساختار مجرد	کاشت توده‌ای به عنوان بادشکن سطحی کم‌ارتفاع

لکه‌ای و نیمه‌متراکم (۲۰-۳۵٪)	توسعه لکه‌های منظرین پایدار در پارک اکولوژیک	بنه (پسته وحشی)	
متوسط تا بالا (۳۰-) ۴۵٪ به دلیل تراکم	بافر زون سبز (دیوار صوتی-بصری) پیرامون سایت	ترخ (خرزهره بومی)	

این پالت گیاهی (جدول ۳) در قالب سه سناریوی فضایی ساختاردهی شد. این سناریوها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ضمن پاسخگویی به نیازهای پالایشی، الزامات اقلیمی و عملکردی سایت را نیز تأمین نمایند:

- سناریوی اول- تثبیت بستر و مهار کانون‌های بادخیز (کاهش فرسایش باد و انتشار گرد و غبار): این سناریو مستقیماً در زون‌های بحرانی غربی و شمال‌غربی که بر اساس خروجی ENVI-met بالاترین سرعت وزش باد را دارند، پیاده می‌شود. هدف اصلی، کاهش فرسایش بادی، مهار انتشار گردوغبار و تثبیت سطحی خاک‌های آلوده است. پالت این زون با دارا بودن سایه‌اندازی بسیار کم تا کم (۵ تا ۱۵ درصد)، هدف اصلی خود را بر ایجاد یک فرش سبز مهارکننده فرسایش بادی و کنترل انتشار ذرات معلق در سطح زمین متمرکز نموده است (جدول ۴):

جدول ۴- گونه‌های پیشنهادی برای سناریوی اول: ترکیب سه‌لایه از گیاهان مقاوم به خشکی و باد بر اساس پالت گیاهی نهایی

لایه درختان بلند حاشیه‌ای	کاشت خطی صنوبر در حاشیه زون‌های آلوده جهت ایجاد کریدور سبز، جذب اولیه آلاینده‌ها و ایجاد سایه‌اندازی متوسط (۳۰-۴۰٪)
لایه پوششی سطحی (فرش سبز)	ترکیب سه گونه برای پوشش گسترده سطحی: ۱) علف بورای مؤثین با مقاومت بسیار بالا به خشکی مفرط و توان تثبیت سرب، روی و مس در خاک، به‌عنوان پوشش گسترده سطحی جهت مهار ریزگردهای سیمان در مناطق باز و آفتابگیر سایت؛ ۲) تاج‌خروس برای جذب فلزات و متیل‌جیوه، و ۳) قدومه برای استخراج نیکل، سرب و کادمیوم با نرخ سایه‌اندازی ۵٪
لایه میانی (تثبیت‌کننده عمیق)	خس‌خس با دارا بودن ریشه‌های بسیار عمیق و متراکم، ضمن تثبیت مکانیکی و مهار ذرات، به‌عنوان کمربند مهار باد در زون غربی عمل می‌کند.
لایه بادشکن سطحی	بادام کوهی با سازگاری فوق‌العاده به دیم مطلق و اقلیم زاگرس، در قالب کاشت توده‌ای و پراکنده، به‌عنوان بادشکن کم‌ارتفاع در نقاط بحرانی مستقر می‌شود.

- سناریوی دوم- احیای تنوع زیستی و چرخه اکولوژیک: این سناریو در پهنه‌های میانی سایت با هدف جذب حشرات گرده‌افشان، بازگرداندن چرخه حیات، و جذب طیف وسیع‌تری از فلزات سنگین طراحی گردیده است تا ضمن پالایش خاک، غنای بصری و اکولوژیک ایجاد کنند. میزان سایه‌اندازی در این سناریو بین کم تا متوسط (۲۰ تا ۳۰ درصد) برآورد می‌شود که ضمن ایجاد تعاملات اکولوژیک، جذابیت بصری منظر پسا صنعتی را نیز ارتقا می‌دهد (جدول ۵):

جدول ۵- گونه‌های پیشنهادی برای سناریوی دوم: ترکیبی از گیاهان سطح دوم و سوم

لایه علفی و پوششی	آفتابگردان با توان جذب روی و سرب خاک و مقاومت به گرما، در بسترهای کاشت پارک مستقر می‌شود. خردل هندی با قابلیت فرارناباشگری کادمیوم و مس، به‌عنوان پیچ‌های تصفیه متمرکز خاک در این زون به کار می‌رود.
لایه درختچه‌ای	اسطوخودوس با عطر مطبوع، مقاومت بسیار بالا به کم‌آبی و نقش مؤثر در جذب حشرات مفید، در زون‌های میانی و حاشیه مسیرهای پیاده کاشته می‌شود. بومادران به‌عنوان گیاه بومی منطقه با توان اصلاح بیولوژیک خاک و جلب گرده‌افشان‌ها، در کاشت پوششی زون‌های تفریحی به کار می‌رود.

لایه ارتفاعی (ساختاری)	خرزهره بومی با قابلیت پالایش موازی خاک (جذب سرب) و فیلتراسیون هوا، به عنوان بافر سبز و دیوار صوتی- بصری در پیرامون سایت، مرز میان زون های پالایش و فضاهای عمومی را شکل می دهد. بنه نیز به ایجاد لکه های منظرین پایدار، مقاوم به خشکسالی مفرط با شاخص سایه اندازی ۲۰-۳۵٪ منجر می شود.
------------------------	--

- سناریوی سوم- مدیریت میکروکلیماتیک و آسایش حرارتی: این سناریو در زون های تجمع، مسیرهای پیاده و فضاهای عمومی که حضور و تردد شهروندان در آن ها پیش بینی می شود، به کار گرفته می شود. هدف اصلی، کاهش دمای سطحی، افزایش آسایش حرارتی کاربران و کاهش تبخیر از بستر خاک خشک شیراز است. بنابراین لایه بندی از گیاهان سایه انداز با اولویت درختان سطح سوم (کنار و داغداغان) و درختچه های همیشه سبز (خرزهره بومی) به کار گرفته می شود تا ضمن پالایش هوا، دمای محیط را کاهش داده و فضایی دلپذیر و امن برای کاربران فراهم آورد. این چیدمان با ایجاد سایه اندازی متوسط تا بالا (۳۰ تا ۵۰ درصد) و در برخی نقاط عالی (۴۰ تا ۶۰ درصد توسط کنار)، به خنک سازی فعال میکروکلیمات از طریق کاهش تابش مستقیم به سطح خاک، کاهش نرخ تبخیر و حفظ رطوبت بستر کمک شایانی نموده و فضاهای مطبوع و امنی را برای حضور شهروندان فراهم می آورد (جدول ۶).

جدول ۶- گونه های پیشنهادی برای سناریوی سوم: لایه بندی گیاهان سایه انداز و مقاوم به خشکی

لایه فوقانی (درختان سایه انداز)	کنار با تاج پهن و سایه اندازی عالی (۶۰-۴۰ درصد) و مقاومت بسیار بالا به اقلیم گرم و خشک، به عنوان اصلی ترین عنصر سایه انداز در مسیرهای پیاده و زون های تجمع به کار می رود. داغداغان با تاج متراکم و سایه اندازی مناسب (۵۰-۳۵ درصد) و مقاومت به خاک های آهکی سیمن، در تثبیت بسترهای شیب دار و زون های دست خورده نیز نقش دارد.
لایه میانی (درختچه های همیشه سبز)	خرزهره بومی با ساختار متراکم و همیشه سبز، ضمن ایجاد سایه اندازی متوسط تا بالا (۴۵-۳۰ درصد)، به عنوان بافر سبز و دیوار بصری در مرز فضاهای عمومی عمل می کند.
لایه پوششی (زیراشکوب)	بومادران به عنوان پوشش پایینی با سایه اندازی متوسط (۳۰ درصد)، ضمن اصلاح بیولوژیک خاک و جلب گرده افشان ها، به کاهش تبخیر سطحی و حفظ رطوبت بستر کمک می کند. شمعدانی معطر برای استخراج سرب، عطر مطبوع، جذابیت بصری در مبلمان و مسیرهای پیاده به کار گرفته شود.

۵-۲- سازماندهی فضایی- کالبدی پالت گیاهی و ساختار لایه بندی ارتفاعی سیستم کاشت

به منظور بیشینه سازی کارکرد پالت گیاهی، چیدمان کالبدی بر اساس تنوع ارتفاعی و مورفولوژی گونه ها ساختاردهی شده است که سه لایه اصلی را شامل می شود:

- لایه فوقانی (درختان بلند با ارتفاع بیش از ۵ تا ۱۰ متر): شامل گونه های صنوبر، کنار، داغداغان و بنه که علاوه بر استخراج و تثبیت فلزات در عمق خاک، با داشتن نرخ سایه اندازی بالا (۳۵ تا ۶۰ درصد)، وظیفه بهبود میکروکلیمات، کاهش دمای سطحی و ایجاد آسایش حرارتی را بر عهده دارند.
- لایه میانی (درختچه ها و گیاهان ایستاده با ارتفاع ۰.۵ تا ۲ متر): شامل ترخ (خرزهره بومی)، اسطوخودوس، آفتابگردان و تاج خروس که به عنوان بافرهای فیزیکی و دیوارهای سبز متراکم جهت فیلتراسیون ذرات معلق هوا و مهار جریان های بادخیز (خروجی ENVI-met) در لایه میانی سایت عمل می کنند.
- لایه پوششی سطحی (ارتفاع کمتر از ۰.۵ متر): شامل علف بورپای موئین، بومادران، خردل هندی و قدومه که با ایجاد یک فرش سبز متراکم در سطح زمین و نرخ سایه اندازی پایین (نزدیک به ۵ درصد)، نقش مالچ (خاک پوش)^{۱۶} زنده را ایفا کرده و مانع از برخاستن گرد و غبار سیمن و فرسایش بستر اراضی دست خورده می شوند.

نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات اخیر در زمینه بازآفرینی مناظر پسا صنعتی همخوانی قابل توجهی دارد. همان گونه که مطالعات Braae و Loures در سال ۲۰۱۵ بر نقش طراحی منظر در بازتعریف کارکرد اراضی صنعتی متروکه تأکید کرده‌اند، نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که احیای این گونه سایت‌ها صرفاً از طریق پاکسازی محیطی امکان‌پذیر نیست، بلکه نیازمند تلفیق همزمان ملاحظات اکولوژیکی، اقلیمی و طراحی فضایی است. همچنین یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات Ai و Kim در سال ۲۰۲۵ و مطالعات Chen در سال ۲۰۲۴ در زمینه نقش آرایش پوشش گیاهی در بهبود شرایط میکروکلیمایی و کاهش اثرات اقلیمی همسو بوده و نشان می‌دهد که استفاده از خروجی‌های شبیه‌سازی اقلیمی می‌تواند فرآیند تصمیم‌گیری طراحی منظر را از یک رویکرد مبتنی بر تجربه به رویکردی مبتنی بر شواهد تبدیل کند. در عین حال، وجه تمایز پژوهش حاضر، ارائه چارچوبی یکپارچه برای تبدیل نتایج شبیه‌سازی باد به راهبردهای عملی طراحی منظر و انتخاب گونه‌های گیاه‌پالا متناسب با شرایط سایت است.

۵-۳- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بازطراحی منظر کارخانه سیمان فارس در شیراز، بر اساس تلفیق شبیه‌سازی اقلیمی و گیاه‌پالایی فازبندی شده انجام شد. یافته‌ها نشان داد که اراضی پسا صنعتی را نباید به عنوان تهدیدهای رها شده شهری نگریست؛ بلکه با به کارگیری رویکردهای طراحی طبیعت‌محور، می‌توان آن‌ها را به فضاهای عمومی پایدار، امن و پویا تبدیل کرد. تحلیل خروجی‌های شبیه‌سازی-ENVI met، پهنه‌های غربی و شمال غربی سایت را به عنوان کانون‌های بحرانی انتشار گردوغبار شناسایی نمود. در پاسخ، یک سیستم کاشت چندلایه و فازبندی شده تدوین شد که در سه سطح عملکردی-زمانی عمل می‌کند: فاز کوتاه مدت (ضربتی) با گونه‌های سطح اول (آفتابگردان و شمعدانی معطر) جهت استخراج سریع فلزات سنگین؛ فاز میان مدت با گونه‌های سطح دوم (خس خس، علف بورپای موئین و خردل هندی) برای تثبیت بستر و کنترل فرسایش؛ و فاز بلندمدت با گونه‌های درختی و درختچه‌ای بومی سطح سوم (کنار، بنه و بادام کوهی) برای ایجاد اسکلت پایدار منظر و سایه‌اندازی بهینه.

ساختار کاشت پیشنهادی در سه لایه ارتفاعی شامل درختان بلند (با سایه‌اندازی ۶۰-۳۵ درصد)، درختچه‌های میانی (به عنوان بافرهای فیزیکی) و پوشش‌های سطحی (به عنوان مالچ زنده) سازماندهی شده است که ضمن پیشینه‌سازی کارکرد پالایش، به بهبود میکروکلیمات و کنترل فرسایش کمک می‌کند. این سیستم کاشت چندلایه ضمن مدیریت هیدرولوژیک مبتنی بر گونه‌های کم‌نیاز به آبیاری (بادام کوهی و بنه با نیاز آبی نزدیک به صفر پس از استقرار)، به احیای تنوع زیستی از طریق جذب حشرات گرده‌افشان و پرندگان بومی کمک می‌نماید. این الگوی کاشت ترکیبی، نه تنها ریسک فرسایش و انتشار گردوغبار را در اقلیم خشک شیراز مهار می‌کند، بلکه با ایجاد زون‌های تفریحی-فرهنگی و سایه‌اندازی بهینه، استانداردهای زیست‌محیطی و سرزندگی اجتماعی را ارتقا می‌دهد.

نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق سیستماتیک ابزارهای شبیه‌سازی اقلیمی با چارچوب انتخاب گونه مبتنی بر دو معیار «اثر بخشی» و «زمان اثرگذاری» است که امکان تدوین راهبردی فازبندی شده و متناسب با شرایط بومی اقلیم خشک را فراهم آورده است. این رویکرد، برخلاف پژوهش‌های پیشین که عمدتاً بر جنبه‌های مهندسی گیاه‌پالایی متمرکز بودند (مانند Smith, 2015; O'Connor et al., 2019)، به طور هم‌زمان به ابعاد اکولوژیک، اقلیمی و اجتماعی-فضایی طراحی منظر می‌پردازد و چارچوبی عملیاتی برای بازطراحی سایت‌های مشابه در اقلیم‌های نیمه‌خشک ارائه می‌دهد.

با این حال، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز مواجه است. فرآیند گیاه‌پالایی ذاتاً زمان‌بر بوده و دستیابی به نتایج کامل پاک‌سازی، نیازمند پایش طولانی مدت (۳ تا ۱۰ سال) است. همچنین کارایی این روش در حذف کامل فلزات سنگین از خاک‌های با آلودگی بسیار بالا، نیازمند پژوهش‌های تکمیلی در مقیاس پایلوت و ارزیابی هزینه-فایده دقیق‌تر است. از این رو، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی بر اجرای آزمایشی سناریوهای کاشت در بخشی از سایت، پایش مستمر غلظت آلاینده‌ها و ارزیابی عملکرد اکوسیستمی سیستم کاشت پیشنهادی در دوره‌های زمانی مختلف متمرکز شوند. همچنین بررسی امکان استفاده از فناوری‌های مکمل نظیر بیوجار^{۱۷} و

باکتری‌های محرک رشد گیاه^{۱۸} جهت افزایش کارایی پالایش در خاک‌های به‌شدت آلوده، می‌تواند زمینه‌ساز توسعه مدل‌های کارآمدتر در آینده باشد.

پی‌نوشت:

- ¹ Phytoremediation
- ² Carbon Sequestration
- ³ NbS
- ⁴ Rhizofiltration
- ⁵ Phytoextraction
- ⁶ Phytostabilization
- ⁷ Rhizodegradation
- ⁸ Phytovolatilization
- ⁹ Phytobuffering
- ¹⁰ Clinker
- ¹¹ Land Depression
- ¹² Windbreaks
- ¹³ Hyperaccumulator

گیاهی است که می‌تواند در خاک یا آب با غلظت‌های بالایی از فلزات رشد کند. این گیاهان فلزات را از طریق ریشه‌هایشان جذب کرده و سطوح بسیار بالایی از فلزات را در بافت‌هایشان متمرکز می‌کنند.

^{۱۴} این گیاهان به دلیل رشد کندتر در فازهای اولیه، در سطح ۳ (بلندمدت) قرار گرفته‌اند، اما پس از استقرار، به یک سیستم خودپایدار (Self-sustaining) تبدیل می‌شوند که بدون نیاز به هزینه نگهداری و آبیاری مداوم، فرآیند پالایش را به صورت دائمی ادامه می‌دهند.

- ¹⁵ Groundcovers
- ¹⁶ Mulch
- ¹⁷ Biochar: تقویت‌کننده خاک
- ¹⁸ Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB)

منابع

حفظ‌الله، علی. (۱۳۷۰). بررسی انتشار آلودگی از کارخانه سیمان فارس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران، دانشگاه علوم پزشکی تهران دانشکده بهداشت، به راهنمایی دکتر منصور غیاث‌الدین.

Ahmad, Z., Rao, J., Zhang, W., Xu, G., & Yang, J. (2025). Nature-based solution for polluted landscapes: integrating ecological indicators and phytoremediation for sustainable environmental management. *Integrated Environmental Assessment and Management*, vjaf184. <https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf184>

Ai, J., & Kim, M. (2025). Research on plant landscape design of urban industrial site green space based on green infrastructure concept. *Plants*, 14(5), 747. <https://doi.org/10.1109/AIARS63200.2024.00026>

Amabogha, O. N., Garelick, H., Jones, H., & Purchase, D. (2023). Combining phytoremediation with bioenergy production: developing a multi-criteria decision matrix for plant species selection. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(14), 40698-40711. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24944-z>

Aryal, M. (2024). Phytoremediation strategies for mitigating environmental toxicants. *Heliyon*, 10(19). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38683>

Bawankar, D. Y. Phytoremediation: Plants as Natural Cleaners of Polluted Ecosystems. *Reimagining Research*, 1. <https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v5.i6.2024.4814>

BenDor, T. K., & Metcalf, S. (2005, July). Conceptual modeling and dynamic simulation of brownfield redevelopment. In *Proceedings of the 23rd International System Dynamics Conference*.

Biddau, G. M., Marotta, A., & Sanna, G. (2020). Abandoned landscape project design. *City, Territory and Architecture*, 7(1), 10.

Braae, E. (2015). *Beauty redeemed: Recycling post-industrial landscapes*. Aarhus: Ikaros press.

Capuana, M. (2020). A review of the performance of woody and herbaceous ornamental plants for phytoremediation in urban areas. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 13(2), 139. <https://doi.org/10.3832/ifer3242-013>

Charles, M., & Bakshi, B. R. (2021). Designing industrial landscapes for mitigating air pollution with spatially-explicit techno-ecological synergy. *AIChE Journal*, 67(10), e17347. <https://doi.org/10.1002/aic.17347>

Chen, J. (2024, July). Research on Mine Plant Restoration and Landscape Regeneration System Based on Artificial Intelligence. In *2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Autonomous Robot Systems (AIARS)* (pp. 113-118). IEEE. <https://doi.org/10.3390/plants14050747>

Chowdhury, S., Volchko, Y., & Norrman, J. (2024). A Framework for Upgrading Contaminated Urban Land and Soil by Nature-Based Solutions: Demonstration with a Swedish Case. *Urban Science*, 8(4), 198. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040198>

Cundy, A. B., Bardos, R. P., Puschenreiter, M., Mench, M., Bert, V., Friesl-Hanl, W., Müller, I., Li, X.N., Weyens, N., Witters, N. & Vangronsveld, J. (2016). Brownfields to green fields: Realising wider benefits from practical contaminant phytomanagement strategies. *Journal of Environmental Management*, 184, 67-77. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.028>

Di Stasio, L., Gentile, A., Tangredi, D. N., Piccolo, P., Oliva, G., Vigliotta, G., Cicatelli, A., Guarino, F., Guidi Nissim, W., Labra, M. & Castiglione, S. (2025). Urban Phytoremediation: A Nature-Based Solution for Environmental Reclamation and Sustainability. *Plants*, 14(13), 2057. <https://doi.org/10.3390/plants14132057>

Fernández-Braña, A., Salgado, L., Gallego, J. L. R., Afif, E., Boente, C., & Forján, R. (2023). Phytoremediation potential depends on the degree of soil pollution: a case study in an urban brownfield. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(25), 67708-67719. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26968-5>

Ghadge, S. A., & Trivedi, P. (2026). Evaluation on the Biological Aspect of Plant, Contaminant Types and Application of Phytoremediation for Environmental and Economical Sustainability. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 29(1), 75-95. <https://doi.org/10.9734/jabb/2026/v29i13508>

Gospodini, A. (2006). Portraying, classifying and understanding the emerging landscapes in the post-industrial city. *Cities*, 23(5), 311-330. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2006.06.002>

Guidi Nissim, W., Castiglione, S., Guarino, F., Pastore, M. C., & Labra, M. (2023). Beyond cleansing: Ecosystem services related to phytoremediation. *Plants*, 12(5), 1031. <https://doi.org/10.3390/plants12051031>

Heesche, J., Braae, E. M., & Jørgensen, G. (2022). Landscape-based transformation of young industrial landscapes. *Land*, 11(6), 908. <https://doi.org/10.3390/land11060908>

Höfer, W., & Vicenzotti, V. (2013). Post-industrial landscapes: Evolving concepts. *The Routledge companion to landscape studies*, 423-434.

Hou, D., Al-Tabbaa, A., O'Connor, D., Hu, Q., Zhu, Y. G., Wang, L., Kirkwood, N., Ok, Y.S., Tsang, D.C.W, Bolan, N.S. & Rinklebe, J. (2023). Sustainable remediation and redevelopment of brownfield sites. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 271-286. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00404-1>

Jacklin, D. M., Brink, I. C., & Jacobs, S. M. (2021). A phyto-guide to species selection for optimized South African green infrastructure. *Water SA*, 47(4), 515-522. <https://doi.org/10.17159/wsa/2021.v47.i4.3875>

Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>

Kennen, K., & Kirkwood, N. (2015). *Phyto: principles and resources for site remediation and landscape design*. Routledge.

Khan, I. U., Qi, S. S., Gul, F., Manan, S., Rono, J. K., Naz, M., Shi, X.N., Zhang, H., Dai, Z.C. & Du, D. L. (2023). A green approach used for heavy metals 'phytoremediation' via invasive plant species to mitigate environmental pollution: a review. *Plants*, 12(4), 725. <https://doi.org/10.3390/plants12040725>

Laforteza, R., Sanesi, G., Pace, B., Corry, R. C., & Brown, R. D. (2004). Planning for the rehabilitation of brownfield sites: a landscape ecological perspective. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, <https://doi.org/10.2495/BF040031>

Lee, M. J. (2019). Transforming post-industrial landscapes into urban parks: Design strategies and theory in Seoul, 1998–present. *Habitat International*, 91, 102023. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.102023>

Loures, L. (2015). Post-industrial landscapes as drivers for urban redevelopment: Public versus expert perspectives towards the benefits and barriers of the reuse of post-industrial sites in urban areas. *Habitat international*, 45, 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.06.028>

Loures, L. U. I. S., Panagopoulos, T. H. O. M. A. S., & Burley, J. (2008). Postindustrial land transformation: From theory to practice and vice-versa. *Advances In Urban Rehabilitation And Sustainability*, 153-158.

Loures, L., Burley, J., & Panagopoulos, T. (2011). Postindustrial landscape redevelopment: Addressing the past, envisioning the future. *International Journal of Energy and Environment*, 5(5), 714-724.

Matanzas, N., Afif, E., Díaz, T. E., & Gallego, J. R. (2021). Phytoremediation potential of native herbaceous plant species growing on a paradigmatic brownfield site. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(7), 290. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05234-9>

Mocek-Plóćiniak, A., Mencil, J., Zakrzewski, W., & Roszkowski, S. (2023). Phytoremediation as an effective remedy for removing trace elements from ecosystems. *Plants*, 12(8), 1653. <https://doi.org/10.3390/plants12081653>

Nguyen, T. Q., Nguyen, H. X., Bui, M. Q., Pham, D. H., Truong, H. M., Nguyen, T. N., Hoang, T.M. & Truong, M. N. (2025). Standardized design metrics and policy integration for phytoremediation systems in water contaminant management. *Standards*, 5(4), 25. <https://doi.org/10.3390/standards5040025>

Nissim, W. G., & Labrecque, M. (2021). Reclamation of urban brownfields through phytoremediation: Implications for building sustainable and resilient towns. *Urban Forestry & Urban Greening*, 65, 127364. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127364>

O'Connor, D., Zheng, X., Hou, D., Shen, Z., Li, G., Miao, G., O'Connell, S. & Guo, M. (2019). Phytoremediation: Climate change resilience and sustainability assessment at a coastal brownfield redevelopment. *Environment international*, 130, 104945. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104945>

Panagopoulos, T. (2007). Sustainable reclamation of industrial areas in urban landscapes. *Sustainable Development and Planning III*. <https://doi.org/10.2495/SDP070752>

Paripuram, T. D., Chirumamilla, V., Chahal, K., Khan, T. K. H., Dixit, S., & Rana, B. (2025). Exploring Phytoremediation And Plants As Natural Cleaners Of Polluted Environments. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(10s).

Podhajska, E., Drzeniecka-Osiadacz, A., Halarewicz, A., Grech, D., Podhajski, B., Zienowicz, M., ... & Liszewski, M. (2023). Phytoremediation as an urban paradigm in promoting the health-potential of small green areas. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104684. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104684>

Raklami, A., Meddich, A., Oufdou, K., & Baslam, M. (2022). Plants—Microorganisms-based bioremediation for heavy metal cleanup: Recent developments, phytoremediation techniques, regulation mechanisms, and molecular responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 5031. <https://doi.org/10.3390/ijms23095031>

Rocha, C. S., Rocha, D. C., Kochi, L. Y., Carneiro, D. N. M., Dos Reis, M. V., & Gomes, M. P. (2022). Phytoremediation by ornamental plants: a beautiful and ecological alternative. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 3336-3354. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17307-7>

Sawarkar, R., Shakeel, A., Kumar, T., Ansari, S. A., Agashe, A., & Singh, L. (2023). Evaluation of plant species for air pollution tolerance and phytoremediation potential in proximity to a coal thermal power station: implications for

smart green cities. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(10), 7303-7322. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01667-9>

Shen, X., Ge, M., Handel, S. N., Wang, W., Jin, Z., & Kirkwood, N. G. (2023). Advancing environmental design with phytoremediation of brownfield soils using spontaneous invasive plants. *Science of The Total Environment*, 883, 163635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163635>

Shevchenko, L. and Novoselchuk, n., 2023. Landscape Design Methods Of The Post-Industrial Environment. *Urban development and spatial planning*, 84, 424-434. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.424-434>

Shevchenko, L., & Novoselchuk, N. (2022). World experience of landscape design of post-industrial environment. *Urban Dev. Spat. Plan*, 80, 499-510.

Smith, G. R. (2015). Phytoremediation-by-design: community-scale landscape systems design for healthy communities. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 22(5), 413-419. <http://dx.doi.org/10.1080/13504509.2015.1079276>

Song, Y., Kirkwood, N., Maksimović, Č., Zheng, X., O'Connor, D., Jin, Y., & Hou, D. (2019). Nature based solutions for contaminated land remediation and brownfield redevelopment in cities: A review. *Science of the Total Environment*, 663, 568-579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.347>

Wang, Y., & Hou, B. (2024). Development of post-industrial heritage landscape design based on visual cognitive schema theory: A case study of the shou gang industrial cultural heritage site. *Buildings*, 14(10), 3194. <https://doi.org/10.3390/buildings14103194>

Wei, Z., Van Le, Q., Peng, W., Yang, Y., Yang, H., Gu, H., Lam, S.S. & Sonne, C. (2021). A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *Journal of hazardous materials*, 403, 123658. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123658>

Wu, Y., & Liu, Y. (2023). Transforming industrial waterfronts into inclusive landscapes: A project method and investigation of landscape as a medium for sustainable revitalization. *Sustainability*, 15(6), 5060. <https://doi.org/10.3390/su15065060>

Xiang, L., Harindintwali, J. D., Wang, F., Redmile-Gordon, M., Chang, S. X., Fu, Y., He, C., Muhoza, B., Brahushi, F., Bolan, N., Jiang, X., Ok, Y.S., Rinklebe, J., Schaeffer, A., Zhu, Y.G., Tiedje, J.M., & Xing, B. (2022). Integrating biochar, bacteria, and plants for sustainable remediation of soils contaminated with organic pollutants. *Environmental Science & Technology*, 56(23), 16546-16566. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02976>

Zaman, W., Ali, S., & Akhtar, M. S. (2024). Harnessing the power of plants: innovative approaches to pollution prevention and mitigation. *Sustainability*, 16(23), 10587. <https://doi.org/10.3390/su162310587>

Zhang, X. Y., & Choi, J. M. (2022). A Study on the Landscape Design Strategies for Regeneration of Post-Industrial Sites of the Beijing-Tianjin-Tangshan Region in China. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 50(4), 1-19. <https://doi.org/10.9715/KILA.2022.50.4.001>

Zhu, Y., Gu, H., Li, H., Lam, S. S., Verma, M., Ng, H. S., Sonne, C., Liew, R.K. & Peng, W. (2024). Phytoremediation of contaminants in urban soils: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(1), 355-371. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01663-6P>