اولین کنفرانس بین‌المللی
مطالعات تطبیقی دانش و نوآوری
در روانشناسی، علوم تربیتی، مدیریت، حقوق و آموزش و پرورش
با رویکرد علوم انسانی

MDOI-01-2026.0078
MNR--1-B45764

بررسی اثر تنش‌های شهری بر بیان ژن‌های استرس در گونه‌های پرتکرار فضای سبز

علی طلایی

کارشناسی ارشد رشته زراعت اصلاح نباتات.

چکیده

درختان و درختچه‌های فضای سبز شهری هم‌زمان با چندین فشار محیطی روبه‌رو هستند. سایه‌اندازی ساختمان‌ها و درختان، آلاینده‌های هوا و فشرده‌شدن خاک می‌توانند دسترسی گیاه به نور، آب و عناصر غذایی را تغییر دهند و تعادل زیستی آن را برهم بزنند. گیاهان در پاسخ به این فشارها، مجموعه‌ای از سازوکارهای فیزیولوژیک و مولکولی را فعال می‌کنند که بخشی از آن‌ها به تغییر فعالیت ژن‌های مرتبط با دریافت پیام تنش، تنظیم رشد، حفاظت از سلول و مقابله با آسیب اکسایشی مربوط است. شدت و الگوی این پاسخ‌ها به گونه گیاهی، مرحله رشد، مدت تنش و هم‌زمانی چند عامل وابسته است. این مقاله با رویکرد مروری ـ تحلیلی، سازوکارهای احتمالی اثر سایه‌اندازی، آلودگی و فشردگی خاک را بر بیان ژن‌های استرس در گونه‌های پرتکرار فضای سبز، از جمله چنار، زبان‌گنجشک، اقاقیا، توت و کاج، بررسی می‌کند. تأکید مقاله بر این است که نشانه‌های ظاهری یا سنجش فعالیت آنزیم‌ها به‌تنهایی برای نتیجه‌گیری درباره بیان ژن کافی نیست و ارزیابی معتبر نیازمند نمونه‌برداری استاندارد، شناخت وضعیت محیطی، بررسی هم‌زمان شاخص‌های فیزیولوژیک و تحلیل مولکولی است. همچنین، چون شواهد مولکولی مستقیم برای همه گونه‌ها و شرایط شهری یکسان نیست، از تعمیم نتایج میان گونه‌ها باید پرهیز کرد. در پایان، چارچوبی برای پژوهش و مدیریت فضای سبز پیشنهاد می‌شود که بر شناخت تنش‌های هم‌زمان، انتخاب گونه‌های سازگار و پیوند میان پایش مولکولی و تصمیم‌های اجرایی استوار است.

واژگان کلیدی: تنش شهری، بیان ژن، سایه‌اندازی، آلودگی هوا، فشردگی خاک، فضای سبز شهری، پاسخ گیاهی.

اولین کنفرانس بین‌المللی
مطالعات تطبیقی دانش و نوآوری
در روانشناسی، علوم تربیتی، مدیریت، حقوق و آموزش و پرورش
با رویکرد علوم انسانی

مقدمه

فضای سبز شهری بخشی از زیرساخت زیستی شهر است و در بهبود کیفیت محیط، تعدیل دما، کاهش گردوغبار و فراهم‌کردن زیستگاه برای جانداران نقش دارد. بااین‌حال، گیاهان شهری در محیطی رشد می‌کنند که با شرایط زیستگاه طبیعی آن‌ها تفاوت دارد. محدودیت سطح خاک، دستکاری بستر، قطع یا تغییر مسیر آب، آلودگی هوا، گرمای موضعی و رفت‌وآمد انسان و خودرو، از عواملی هستند که می‌توانند رشد و سلامت پوشش گیاهی را تحت تأثیر قرار دهند.

سه فشار مهم در این محیط عبارت‌اند از سایه‌اندازی، آلودگی و فشردگی خاک. سایه‌اندازی، نور دریافتی گیاه را کاهش می‌دهد و گاه با تغییر کیفیت نور، شکل رشد و تخصیص منابع در گیاه را دگرگون می‌کند. آلاینده‌های هوا می‌توانند از راه روزنه‌ها وارد برگ شوند یا سطح آن را تخریب کنند و به اختلال در فتوسنتز و تولید گونه‌های فعال اکسیژن بینجامند. فشردگی خاک نیز با محدودکردن فضای منفذی، نفوذ آب و هوا و گسترش ریشه را دشوار می‌کند. هر یک از این فشارها می‌تواند به‌تنهایی آسیب‌زا باشد؛ اما در شهر، معمولاً چند عامل هم‌زمان حضور دارند.

گیاه در برابر این فشارها فقط با تغییرات ظاهری پاسخ نمی‌دهد. دریافت پیام تنش، انتقال آن درون سلول و تغییر فعالیت ژن‌ها از بخش‌های بنیادی پاسخ گیاه است. برخی ژن‌ها در تنظیم رشد، حفاظت از غشاها، ساخت پروتئین‌های محافظ و مهار آسیب اکسایشی نقش دارند. تغییر در بیان این ژن‌ها می‌تواند به سازگاری موقت یا پایدار گیاه کمک کند؛ اما این پاسخ همواره به معنای تحمل موفق نیست. گاهی افزایش بیان یک ژن نشانه آن است که گیاه زیر فشار شدید قرار گرفته و ناچار به فعال‌کردن سازوکارهای دفاعی شده است.

این مقاله با تکیه بر مبانی فیزیولوژی گیاهی، ژنتیک و محیط‌زیست، پیوند میان سه تنش یادشده و پاسخ‌های مولکولی گیاهان فضای سبز را بررسی می‌کند. هدف، ارائه جمع‌بندی مفهومی و چارچوبی برای پژوهش است، نه گزارش نتیجه آزمایشی تازه. ازاین‌رو، درباره گونه‌های نام‌برده، سازوکارهای شناخته‌شده گیاهی به‌عنوان مبنای تفسیر به کار می‌روند و

هرجا شواهد مستقیم گونه‌محور محدود باشد، از نتیجه‌گیری قطعی پرهیز می‌شود.

روش بررسی

این مقاله به شیوه مروری ـ تحلیلی تدوین شده است. مبانی فیزیولوژی گیاهی، ژنتیک، خاک‌شناسی، ارزیابی محیطی و منابع مربوط به پوشش گیاهی ایران بررسی و در قالب چارچوبی برای تحلیل تنش‌های شهری جمع‌بندی شده‌اند. مقاله بر داده‌های میدانی یا آزمایشگاهی اختصاصی تکیه ندارد؛ بنابراین، مطالب آن نباید به‌عنوان اثبات مستقیم پاسخ مولکولی یک گونه در یک شهر خاص تلقی شود. ارزیابی نهایی هر گونه نیازمند پژوهش میدانی و آزمایشگاهی در شرایط همان محل است.

بیان ژن و پاسخ گیاه به تنش

ژن‌ها حامل اطلاعات وراثتی‌اند، اما همه ژن‌ها در همه بافت‌ها و در همه زمان‌ها به یک اندازه فعال نیستند. «بیان ژن» به فرایندهایی گفته می‌شود که در آن اطلاعات یک ژن برای ساخت مولکول‌های کارکردی، از جمله پروتئین‌ها، به کار گرفته می‌شود. شدت بیان ژن می‌تواند بر اثر نور، دما، کم‌آبی، شوری، آلاینده‌ها و اختلال در وضعیت ریشه تغییر کند. این تغییرات معمولاً بخشی از شبکه‌ای بزرگ‌تر از دریافت پیام، تنظیم فعالیت ژن‌ها و پاسخ فیزیولوژیک گیاه هستند (ابراهیم‌زاده، ۱۳۸۴؛ مظاهری و همکاران، ۱۳۸۱).

هنگام مواجهه با تنش، گیاه ابتدا تغییر محیطی را از راه سازوکارهای سلولی دریافت می‌کند. سپس پیام‌هایی درون سلول جابه‌جا می‌شوند و فعالیت عوامل تنظیم‌کننده ژن‌ها را تغییر می‌دهند. پیامد این فرایند می‌تواند افزایش یا کاهش بیان ژن‌های مرتبط با رشد، حفاظت از سلول، تنظیم تعادل آب یا مقابله با ترکیبات آسیب‌رسان باشد. این پاسخ‌ها به گونه گیاهی، اندام مورد بررسی، سن برگ، فصل، شدت و مدت تنش وابسته‌اند.

ژن‌های مرتبط با تنش را می‌توان، به‌طور کلی، در چند گروه کارکردی بررسی کرد:

- ژن‌های دریافت و انتقال پیام تنش؛

- ژن‌های تنظیم‌کننده فعالیت ژن‌های دیگر؛
- ژن‌های دخیل در ساخت پروتئین‌های محافظ و پایداری ساختارهای سلولی؛
- ژن‌های مرتبط با سامانه‌های مهار آسیب اکسایشی؛
- ژن‌های مؤثر بر رشد ریشه، برگ، ساقه و تنظیم روزنه‌ها.

این دسته‌بندی کلی است و مرزهای کاملاً جداگانه‌ای میان گروه‌ها وجود ندارد. یک ژن ممکن است در بیش از یک فرایند نقش داشته باشد و پاسخ نهایی گیاه حاصل برهم‌کنش چندین مسیر مولکولی باشد. همچنین، افزایش بیان ژن همیشه به افزایش کارکرد سودمند منجر نمی‌شود؛ زیرا ساخت پروتئین، پایداری آن و فعالیت نهایی آن نیز به عوامل دیگری بستگی دارد.

ازاین‌رو، سنجش بیان ژن باید در کنار سنجش‌های فیزیولوژیک و زیست‌شیمیایی انجام شود. مشاهده زردی برگ، کاهش رشد یا تغییر رنگ، به‌تنهایی نشان نمی‌دهد که کدام ژن تغییر کرده است. به همین ترتیب، فعالیت بیشتر یک آنزیم دفاعی نیز به‌تنهایی برای اثبات افزایش بیان ژن سازنده آن آنزیم کافی نیست. تمایز میان تغییر در فعالیت ژن، مقدار فرآورده ژنی و کارکرد نهایی آن، برای تفسیر درست نتایج ضروری است.

سایه‌اندازی و تغییر پاسخ‌های گیاه

اثر سایه بر دریافت نور و رشد

سایه‌اندازی در شهر می‌تواند از سوی ساختمان‌ها، پل‌ها، درختان بزرگ یا سازه‌های شهری ایجاد شود. کاهش نور دریافتی، توازن میان جذب انرژی و مصرف آن را تغییر می‌دهد. بسیاری از گیاهان در نور کم، برگ‌هایی با ویژگی‌های متفاوت می‌سازند یا منابع خود را به رشد طولی ساقه و گسترش سطح برگ اختصاص می‌دهند. این تغییرات ممکن است به استفاده بهتر از نور محدود کمک کند، اما در صورت تداوم سایه شدید می‌تواند به کاهش فتوسنتز، ضعف رشد و کاهش ذخیره مواد کربوهیدراتی بینجامد.

نور فقط از نظر شدت اهمیت ندارد؛ کیفیت آن نیز می‌تواند بر پاسخ گیاه اثر بگذارد. سایه درختان و سازه‌ها ممکن است ترکیب نور رسیده

به برگ را تغییر دهد. گیاهان از راه سامانه‌های دریافت نور، تغییرهای محیطی را تشخیص می‌دهند و مسیرهای رشد و سازگاری خود را تنظیم می‌کنند. در نتیجه، سایه می‌تواند بر فعالیت ژن‌های مرتبط با رشد، شکل‌گیری اندام‌ها، فتوسنتز و ساعت زیستی اثر بگذارد.

پیوند سایه و بیان ژن

در نور کم، گیاه ممکن است فعالیت برخی ژن‌های مرتبط با گسترش سطح برگ، کشیدگی ساقه و سازگاری با کاهش نور را تغییر دهد. اگر سایه ناگهانی یا شدید باشد، کاهش دریافت انرژی می‌تواند میان تولید و مصرف مواد در سلول ناهماهنگی ایجاد کند. چنین وضعی بر تنظیم سوخت‌وساز و فعالیت ژن‌های وابسته به رشد و حفاظت اثر می‌گذارد.

با این‌حال، نمی‌توان یک الگوی واحد برای همه گونه‌ها در نظر گرفت. گونه‌ای که در زیستگاه طبیعی خود زیر تاج درختان رشد می‌کند، ممکن است با سایه سازگاری بیشتری داشته باشد؛ درحالی‌که گونه‌ای نورپسند، در همان شرایط دچار افت رشد شود. حتی میان افراد یک گونه نیز تفاوت‌های وراثتی می‌تواند بر شدت پاسخ اثر بگذارد. مبانی فیزیولوژی گیاهی نشان می‌دهد که پاسخ به نور تابع ویژگی‌های ذاتی گیاه و شرایط محیطی هم‌زمان است (ابراهیم‌زاده، ۱۳۸۴).

گونه‌های فضای سبز و پاسخ به سایه

چنار، زبان‌گنجشک، اقاقیا، توت، نارون و برخی کاج‌ها در بسیاری از شهرها دیده می‌شوند؛ اما فراوانی این گونه‌ها به معنای یکسان‌بودن تحمل آن‌ها به سایه نیست. نهال جوان و درخت بالغ نیز ممکن است در برابر سایه یکسان پاسخ ندهند. سایه در سال‌های نخست استقرار می‌تواند بر شکل تاج، رشد ریشه و توان رقابت اثر متفاوتی نسبت به سایه درخت بالغ داشته باشد.

برای شناخت پاسخ هر گونه، باید محل برگ در تاج، شدت و دوام سایه، سن گیاه و وضعیت آب و خاک ثبت شود. اگر برگ‌های سایه‌دار و آفتاب‌گیر یک درخت با هم مقایسه شوند، تفاوت‌های بیان ژن ممکن است ناشی از موقعیت برگ در تاج باشد، نه فقط اثر سایه‌اندازی شهری. بنابراین، نمونه‌برداری باید از اندام‌ها و جایگاه‌های قابل مقایسه انجام شود.

آلودگی هوا و پاسخ‌های مولکولی گیاه

مسیرهای اثر آلاینده‌ها

آلودگی هوا مجموعه‌ای از عوامل گوناگون است و یک ماده واحد را شامل نمی‌شود. برخی آلاینده‌ها از راه روزنه‌ها وارد برگ می‌شوند، برخی بر سطح برگ می‌نشینند و بعضی دیگر می‌توانند از راه تغییر دما، ترکیب شیمیایی هوا یا وضعیت خاک بر گیاه اثر بگذارند. اثر آلودگی به نوع آلاینده، شکل شیمیایی آن، مدت تماس، وضعیت آب گیاه و حساسیت گونه وابسته است.

ورود آلاینده یا تماس برگ با آن می‌تواند ساختار غشاها، رنگیزه‌های فتوسنتزی و کارکرد دستگاه فتوسنتز را مختل کند. در برخی شرایط، این اختلال با افزایش تولید ترکیبات واکنش‌پذیر اکسیژن همراه می‌شود. اگر تولید این ترکیبات از ظرفیت دفاعی گیاه فراتر رود، آسیب به پروتئین‌ها، غشاها و ماده وراثتی سلول محتمل است. گیاه برای محدودکردن این آسیب، شبکه‌ای از سازوکارهای دفاعی را فعال می‌کند.

پاسخ دفاعی و بیان ژن

بخشی از پاسخ مولکولی گیاه به آلودگی، تغییر فعالیت ژن‌های مرتبط با مقابله با آسیب اکسایشی، نگهداری از غشاها و تنظیم سوخت‌وساز است. ژن‌های سازنده آنزیم‌های دفاعی و پروتئین‌های محافظ ممکن است تحت تأثیر شدت و مدت آلودگی قرار گیرند. افزایش بیان برخی از این ژن‌ها می‌تواند بخشی از پاسخ سازشی باشد؛ اما اگر فشار از توان دفاعی گیاه بیشتر شود، فعال‌شدن مسیرهای دفاعی الزاماً از کاهش رشد یا آسیب برگ جلوگیری نمی‌کند.

تفسیر این پاسخ‌ها بدون شناخت ترکیب آلودگی دشوار است. علائمی مانند لکه‌دارشدن برگ، سوختگی حاشیه یا ریزش زودرس می‌توانند با آلودگی مرتبط باشند، اما کم‌آبی، شوری، آفت، بیماری یا کمبود عناصر غذایی نیز ممکن است نشانه‌های مشابهی پدید آورند. ارزیابی اثر آلودگی باید با ثبت شرایط محیطی و کنارگذاشتن توضیح‌های جایگزین همراه باشد (مخدوم، ۱۳۸۰؛ قانون هوای پاک، ۱۳۹۶).

گونه‌های درختی و پایش آلودگی

درختان شهری می‌توانند به کاهش بخشی از آلاینده‌های معلق کمک کنند، اما همین تماس، آن‌ها را در معرض تنش قرار می‌دهد. ویژگی برگ، زمان

ماندگاری آن، میزان روزنه‌ها، ساختمان سطح برگ و توان دفاعی گونه در میزان اثرپذیری اهمیت دارند. چنار و زبان‌گنجشک، مانند دیگر درختان شهری، ممکن است در شرایط گوناگون پاسخ‌های متفاوتی نشان دهند؛ اما از نام گونه به‌تنهایی نمی‌توان درباره میزان تحمل آن نتیجه قطعی گرفت. شرایط محلی و ویژگی جمعیت گیاهی باید در نظر گرفته شود.

برای پایش پاسخ به آلودگی، لازم است نمونه‌های برگ از بخش‌هایی با شرایط مشابه برداشت شوند و آلودگی محیط نیز هم‌زمان ثبت شود. سنجش علائم ظاهری، رنگیزه‌ها، وضعیت آب برگ و شاخص‌های آسیب اکسایشی می‌تواند در کنار بررسی بیان ژن‌ها تصویر کامل‌تری فراهم آورد. اگر تنها برگ‌های آسیب‌دیده از یک محل نمونه‌برداری شوند، نمی‌توان تفاوت‌ها را با اطمینان به آلودگی نسبت داد؛ زیرا احتمال دارد تفاوت مکانی یا سن برگ نیز مؤثر باشد.

فشردگی خاک و پاسخ گیاه

دگرگونی‌های خاک بر اثر فشردگی

فشردگی خاک در پارک‌ها و حاشیه خیابان‌ها اغلب در پی رفت‌وآمد پیاده، تردد خودرو، عبور ماشین‌آلات یا انباشت مصالح رخ می‌دهد. فشردگی، فضای خالی میان ذرات خاک را کاهش می‌دهد و ممکن است حرکت آب و هوا را مختل کند. در چنین شرایطی، ریشه با مقاومت بیشتری روبه‌رو می‌شود و گسترش آن در خاک دشوارتر می‌گردد. نفوذ آب نیز می‌تواند کاهش یابد یا به شکل ناموازن انجام شود و دسترسی ریشه به اکسیژن و عناصر غذایی محدود شود (سالاردینی، ۱۳۸۲).

آسیب ناشی از فشردگی معمولاً از ریشه آغاز می‌شود، اما آثار آن در برگ و ساقه نیز دیده می‌شود. کاهش رشد ریشه، محدودشدن جذب آب و عناصر و افت توان استقرار، می‌توانند به کاهش رشد اندام هوایی بینجامند. در خاک بسیار فشرده، حتی آبیاری نیز ممکن است مشکل را برطرف نکند، زیرا آب به‌درستی در بستر نفوذ نمی‌کند یا ریشه توان استفاده از آن را ندارد.

پیوند فشردگی خاک و بیان ژن

اختلال در جذب آب و کاهش اکسیژن پیرامون ریشه می‌توانند پیام‌هایی را فعال کنند که در تنظیم رشد، سازگاری با کم‌آبی و حفظ عملکرد سلولی

نقش دارند. فشردگی ممکن است بیان ژن‌های مرتبط با گسترش ریشه، پاسخ به کمبود اکسیژن، تنظیم تعادل آب و سازوکارهای دفاعی را تغییر دهد. جهت و شدت این تغییرها به مدت فشردگی، رطوبت خاک، بافت خاک و ویژگی گونه بستگی دارد.

باید توجه داشت که «فشردگی خاک» و «غرقابی‌شدن» یکسان نیستند، هرچند هر دو می‌توانند به کمبود اکسیژن در ناحیه ریشه بینجامند. همچنین، محدودیت رشد ریشه ممکن است از کمبود حجم خاک یا برخورد با مانع فیزیکی ناشی شود، نه فقط از فشردگی. تشخیص سازوکار اصلی برای تفسیر تغییرهای مولکولی ضروری است.

اهمیت گونه و بستر کشت

توان ریشه‌دوانی گونه‌ها یکسان نیست. برخی درختان ریشه‌هایی دارند که در خاک محدود رشد کمتری می‌کنند و برخی می‌توانند در شرایط نامساعدتر بخشی از رشد خود را حفظ کنند. با این‌حال، هیچ گونه‌ای نمی‌تواند بدون محدودیت در خاک فشرده رشد کند. درختان پرتکرار فضای سبز نیز بسته به شرایط خاک، سن، اندازه فضای ریشه و میزان آبیاری، واکنش‌های متفاوتی بروز می‌دهند.

در پروژه‌های شهری، بهبود شرایط فیزیکی خاک، حفظ بستر نفوذپذیر و جلوگیری از رفت‌وآمد بر روی ناحیه ریشه، اغلب از تلاش برای جبران پیامدهای فشردگی پس از آسیب مؤثرتر است. مدیریت خاک باید با شناخت ویژگی‌های آن انجام شود و از زیرورو‌کردن بی‌برنامه که ممکن است به ریشه یا ساختار خاک آسیب بزند، پرهیز شود.

تنش‌های هم‌زمان و پیچیدگی پاسخ

در محیط شهری، سایه‌اندازی، آلودگی و فشردگی خاک معمولاً جدا از یکدیگر رخ نمی‌دهند. درختی در کنار خیابان ممکن است هم‌زمان با خاک فشرده، آلودگی هوا، کمبود آب و سایه ساختمان روبه‌رو باشد. اثر هم‌زمان این عوامل لزوماً برابر با جمع ساده اثر هر کدام نیست. یک تنش می‌تواند اثر تنش دیگر را تشدید یا تعدیل کند.

برای نمونه، کمبود نور ممکن است تولید مواد حاصل از فتوسنتز را محدود کند و توان گیاه برای جبران آسیب‌های ناشی از آلودگی را کاهش دهد. از سوی دیگر، سایه می‌تواند بار گرمایی برگ را کم کند و در

شرایط خاص بخشی از فشار محیطی را تعدیل کند. فشردگی خاک نیز ممکن است جذب آب را مختل کند و پاسخ گیاه به گرما و آلاینده‌ها را تغییر دهد. بنابراین، پژوهش تک‌عاملی که تنها یک تنش را بررسی می‌کند، همیشه شرایط واقعی شهر را بازنمایی نمی‌کند.

تحلیل تنش‌های هم‌زمان به طراحی پژوهش دقیق نیاز دارد. باید روشن باشد که کدام عامل‌ها سنجیده شده‌اند، کدام عوامل ممکن است پاسخ را تغییر دهند و چه چیزی به‌عنوان وضعیت مقایسه در نظر گرفته شده است. همچنین، بررسی یک نشانگر مولکولی به‌تنهایی برای توضیح پاسخ کل گیاه کافی نیست. بهتر است مجموعه‌ای از نشانگرهای مرتبط با مسیرهای مختلف بررسی شود و نتایج آن‌ها با وضعیت رشد، خاک و محیط پیوند داده شود.

گونه‌های پرتکرار فضای سبز و حدود تعمیم

گونه‌هایی مانند چنار، زبان‌گنجشک، اقاقیا، توت، نارون و کاج در بخش‌هایی از شهرهای ایران حضور دارند. این گونه‌ها از نظر شکل برگ، ساختار ریشه، زمان ریزش برگ، نیاز نوری و سازگاری اقلیمی تفاوت دارند. ازاین‌رو، انتظار پاسخ مولکولی یکسان به سایه، آلودگی یا فشردگی خاک منطقی نیست. حتی درون یک گونه نیز خاستگاه بذر، تنوع ژنتیکی، سن درخت و شرایط نهال‌کاری می‌توانند بر پاسخ اثر بگذارند (ثابتی، ۱۳۷۵؛ قهرمان، ۱۳۷۲؛ مظفریان، ۱۳۷۵).

در بسیاری از موارد، داده‌های موجود درباره یک گونه ممکن است از شرایط گلخانه‌ای یا محیط کنترل‌شده به دست آمده باشد. چنین یافته‌هایی برای شناخت سازوکارها ارزشمندند، اما نمی‌توان آن‌ها را بی‌واسطه به درخت بالغ شهری تعمیم داد. درخت شهری با تغییرهای فصلی، تفاوت رطوبت خاک، آلودگی متغیر و فشارهای انسانی روبه‌روست. بنابراین، بررسی میدانی در کنار آزمایش‌های کنترل‌شده اهمیت دارد.

گونه‌های بومی یا سازگار با اقلیم محل می‌توانند برای فضای سبز گزینه‌های مناسب‌تری باشند، اما بومی‌بودن به‌تنهایی تضمین‌کننده تحمل همه تنش‌های شهری نیست. انتخاب گونه باید بر پایه هدف کاشت، ویژگی محل، نیاز آبی، کیفیت خاک، ایمنی و امکان نگهداری انجام شود. شناخت فلور و پوشش گیاهی ایران می‌تواند در شناسایی گونه‌ها و پراکنش آن‌ها کمک کند، ولی جایگزین ارزیابی عملکرد در محل کاشت نیست.



چارچوب پیشنهادی برای مطالعه بیان ژن در محیط شهری

تعریف پرسش و انتخاب گونه

پژوهش باید از پرسشی روشن آغاز شود؛ برای نمونه، آیا تفاوت در شدت سایه با تغییر بیان ژن‌های مرتبط با سازگاری نوری همراه است؟ یا آیا خاک فشرده با دگرگونی بیان ژن‌های پاسخ به اختلال ریشه ارتباط دارد؟ پرسش باید محدوده گونه، اندام، نوع تنش و پیامد مورد نظر را مشخص کند.

انتخاب گونه باید بر پایه فراوانی در فضای سبز، اهمیت مدیریتی و امکان نمونه‌برداری انجام شود. اگر هدف مقایسه چند گونه است، باید شرایط رشد آن‌ها تا حد امکان قابل مقایسه باشد. تفاوت میان گونه‌ها نباید با تفاوت محل، سن یا شیوه نگهداری خلط شود.

ثبت شرایط محیطی

در کنار نمونه‌برداری گیاهی، شرایط نور، وضعیت آلاینده‌های محیط، ویژگی‌های خاک، رطوبت، آبیاری، سن تقریبی درخت و نشانه‌های ظاهری باید ثبت شوند. در بررسی سایه، مقدار و دوام سایه و جایگاه برگ در تاج اهمیت دارد. در بررسی فشردگی، ویژگی‌های فیزیکی خاک و وضعیت بستر ریشه باید توصیف شوند. در مطالعه آلودگی نیز دانستن نوع و زمینه تماس آلاینده‌ها برای تفسیر ضروری است.

نمونه‌برداری و کنترل عوامل مخدوش‌کننده

نمونه‌ها باید از اندام‌هایی با سن و موقعیت مشابه برداشت شوند و پس از برداشت به شیوه‌ای نگهداری شوند که کیفیت ماده وراثتی و فرآورده‌های ژنی حفظ شود. زمان نمونه‌برداری نیز باید ثبت شود، زیرا نور، دما و ساعت روز می‌توانند بر بیان برخی ژن‌ها اثر بگذارند. مقایسه برگ جوان با برگ پیر یا برگ آفتاب‌گیر با برگ سایه‌دار، بدون کنترل این تفاوت‌ها، نتیجه را مبهم می‌کند.

سنجش مولکولی و فیزیولوژیک

بررسی بیان ژن به روش‌های آزمایشگاهی نیاز دارد که مقدار پیام‌های ژنی را با کنترل کیفیت و معیارهای مناسب مقایسه کنند. انتخاب ژن‌های مورد بررسی باید بر پایه فرضیه علمی و پیشینه گونه انجام شود.

ژن‌های مرجع نیز باید در همان شرایط پایداربودن خود را نشان داده باشند؛ زیرا اگر ابزار مقایسه خود دچار تغییر شود، تفسیر نتیجه نامعتبر خواهد بود.

در کنار سنجش مولکولی، بررسی شاخص‌های فیزیولوژیک مانند رشد، وضعیت رنگیزه‌ها، آب برگ و نشانه‌های آسیب می‌تواند تفسیر را تقویت کند. سنجش فعالیت آنزیم‌ها نیز می‌تواند اطلاعات مکمل فراهم آورد، اما نباید به‌عنوان جایگزین سنجش بیان ژن در نظر گرفته شود. مبانی ژنتیک و فیزیولوژی گیاهی بر نیاز به پیوند میان سازوکار مولکولی و کارکرد زیستی تأکید دارند (ابراهیم‌زاده، ۱۳۸۴؛ مظاهری و همکاران، ۱۳۸۱).

تحلیل و گزارش نتایج

گزارش پژوهش باید شرایط نمونه‌برداری، ویژگی‌های محیطی، روش سنجش و محدودیت‌ها را روشن کند. تغییر بیان ژن باید با احتیاط تفسیر شود و میان ارتباط و علت تمایز گذاشته شود. اگر یک ژن در درختان آلوده تغییر کرده باشد، این مشاهده به‌تنهایی ثابت نمی‌کند که آلودگی تنها علت تغییر بوده است؛ ممکن است کمبود آب یا تفاوت سن برگ نیز نقش داشته باشد.

نتایج یک پژوهش شهری بهتر است در چارچوب همان گونه، همان بافت و همان شرایط محیطی گزارش شود. تعمیم یافته‌ها به گونه‌های دیگر یا شهرهای دیگر باید با شواهد مستقل پشتیبانی شود. این احتیاط، به‌ویژه هنگامی اهمیت دارد که منابع درباره پاسخ مولکولی گونه‌های درختی شهری محدود باشند.

پیوند نتایج پژوهش با مدیریت فضای سبز

پژوهش بیان ژن زمانی برای مدیریت شهری ارزش عملی دارد که به تصمیم‌های قابل اجرا پیوند بخورد. اگر بررسی‌ها نشان دهند یک گونه در سایه پایدارتر است، این یافته می‌تواند در جانمایی آن گونه در کنار ساختمان‌ها به کار رود؛ اما باید هم‌زمان نیازهای آبی، ریشه‌ای و نگهداری آن نیز بررسی شود. اگر فشردگی خاک با افت سلامت درخت همراه

باشد، اصلاح بستر و جلوگیری از تردد بر ناحیه ریشه ممکن است از جایگزینی درخت مؤثرتر باشد.

در فضای سبز شهری، کاهش فشار محیطی غالباً راهکار پایدارتری از اتکا به واکنش دفاعی گیاه است. حفظ نفوذپذیری خاک، جلوگیری از آسیب ریشه، انتخاب گونه متناسب با نور محل، رسیدگی به کیفیت آبیاری و کنترل منابع آلودگی، می‌توانند از شدت تنش بکاهد. مدیریت گونه‌ها نیز باید بر اساس سازگاری و تنوع انجام شود، نه بر پایه تکرار یک گونه در همه بخش‌های شهر.

ارزیابی سلامت درختان باید ترکیبی باشد. مشاهده تاج، برگ و ریشه، بررسی خاک و ثبت شرایط محیطی می‌توانند در کنار پایش مولکولی به تشخیص زودهنگام کمک کند. با این‌حال، روش‌های مولکولی برای پایش روزمره همه درختان پرهزینه و تخصصی‌اند. کاربرد مناسب آن‌ها بیشتر در پژوهش، مقایسه گونه‌ها، شناخت سازوکارهای آسیب و ارزیابی برنامه‌های مدیریت بلندمدت است.

محدودیت‌های علمی و پژوهشی

یکی از محدودیت‌های اصلی، کمبود داده‌های مستقیم و همسان درباره بیان ژن در همه گونه‌های پرتکرار فضای سبز ایران است. عنوان‌های کلی مانند «مقاومت به آلودگی» یا «تحمل سایه» ممکن است در منابع مختلف به روش‌ها و شرایط متفاوتی اشاره داشته باشند. بنابراین، مقایسه نتایج بدون شناخت طرح پژوهش، بافت نمونه‌برداری و نوع تنش می‌تواند گمراه‌کننده باشد.

محدودیت دیگر، پیچیدگی محیط شهری است. سایه، آلودگی، فشردگی خاک، کم‌آبی، گرما و آسیب مکانیکی می‌توانند هم‌زمان رخ دهند و اثر یکدیگر را تغییر دهند. تفکیک اثر هر عامل در شرایط میدانی دشوار است. پژوهش‌های کنترل‌شده برای شناخت سازوکارها مفیدند، اما لازم است با پایش میدانی تکمیل شوند.

همچنین، تغییر بیان ژن در یک زمان کوتاه الزاماً بیانگر سازگاری پایدار نیست. پاسخ مولکولی ممکن است گذرا باشد یا با گذشت زمان تغییر کند. برای شناخت پیامد بلندمدت، بررسی در زمان‌های گوناگون و

پیوند آن با رشد و سلامت درخت اهمیت دارد. نتیجه‌گیری مدیریتی باید از مجموعه شواهد به دست آید، نه از یک نشانگر منفرد.

ملاحظات حقوقی و محیطی

پایش و مدیریت فضای سبز شهری با قوانین حفاظت از محیط زیست، خاک، هوا و فضای سبز پیوند دارد. قانون حفاظت و بهسازی محیط زیست، قانون هوای پاک، قانون حفاظت از خاک و قانون حفظ و گسترش فضای سبز در شهرها، زمینه‌های حقوقی حفاظت از محیط و مدیریت منابع را فراهم می‌کنند. این قوانین جایگزین ارزیابی فنی نیستند، اما مسئولیت نهادهای شهری در حفاظت از درختان، خاک و کیفیت محیط را برجسته می‌سازند.

اقدام‌های مدیریتی مانند هرس، جابه‌جایی خاک، اصلاح بستر یا جایگزینی درخت باید بر پایه ارزیابی کارشناسی صورت گیرد. درختان شهری بخشی از زیست‌بوم محله‌اند و تصمیم‌های عجولانه ممکن است به ریشه، زیستگاه جانداران یا پایداری فضای سبز آسیب بزنند. ثبت پیشینه نگهداری و شرایط محیطی نیز می‌تواند به تفسیر بهتر پایش‌های بعدی کمک کند.

نتیجه‌گیری

سایه‌اندازی، آلودگی هوا و فشردگی خاک از تنش‌های مهم محیط شهری‌اند و هر یک می‌توانند رشد و سلامت گونه‌های فضای سبز را از راه دگرگونی فرایندهای فیزیولوژیک و مولکولی تحت تأثیر قرار دهند. پاسخ گیاه به این فشارها، از جمله تغییر بیان ژن‌های مرتبط با دریافت پیام، تنظیم رشد و حفاظت سلولی، به گونه، بافت، سن گیاه، شدت و مدت تنش و شرایط هم‌زمان وابسته است. بنابراین، نمی‌توان برای همه گونه‌ها یا همه شهرها یک الگوی یکسان پیشنهاد کرد.

ارزیابی بیان ژن باید با سنجش‌های فیزیولوژیک، شناخت وضعیت خاک و ثبت شرایط محیطی همراه باشد. علائم ظاهری یا فعالیت آنزیمی به‌تنهایی برای اثبات تغییر بیان ژن کافی نیستند. در گونه‌های پرتکرار مانند چنار، زبان‌گنجشک، اقاقیا، توت، نارون و کاج نیز تعمیم نتیجه از یک گونه به گونه دیگر، یا از شرایط آزمایشگاهی به محیط واقعی شهر، باید با احتیاط انجام شود.

برای مدیریت پایدار، کاهش تنش در کنار انتخاب گونه سازگار اهمیت دارد. حفظ کیفیت و نفوذپذیری خاک، حفاظت از ریشه، جانمایی مناسب گونه‌ها نسبت به نور و کاهش تماس با آلاینده‌ها می‌تواند فشار محیطی را محدود کند. پژوهش‌های آینده باید با نمونه‌برداری استاندارد، بررسی هم‌زمان چند تنش و پیوند میان داده‌های مولکولی و سلامت واقعی درختان انجام شوند. چنین رویکردی امکان می‌دهد دانش بیان ژن از سطح توصیف سازوکارها فراتر رود و به بهبود برنامه‌ریزی و نگهداری فضای سبز شهری کمک کند.

منابع

ابراهیم‌زاده، حسن. (۱۳۸۴). *فیزیولوژی گیاهی*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

ثابتی، حبیب‌الله. (۱۳۷۵). *جنگل‌ها، درختان و درختچه‌های ایران*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

سالاردینی، عطاءالله. (۱۳۸۲). *اصول و مبانی خاک‌شناسی*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

قانون حفاظت و بهسازی محیط زیست. (۱۳۵۳). مصوب مجلس شورای ملی، با اصلاحات بعدی.

قانون حفظ و گسترش فضای سبز در شهرها. (۱۳۵۹). مصوب مجلس شورای اسلامی، با اصلاحات بعدی.

قانون توزیع عادلانه آب. (۱۳۶۱). مصوب مجلس شورای اسلامی.

قانون هوای پاک. (۱۳۹۶). مصوب مجلس شورای اسلامی.

قانون حفاظت از خاک. (۱۳۹۸). مصوب مجلس شورای اسلامی.

قهرمان، احمد. (۱۳۷۲). *رستنی‌های ایران*. تهران: مرکز نشر دانشگاهی.

کوچکی، عطاءالله و سرمدنیا، غلامحسین. (۱۳۷۷). *زراعت در مناطق خشک*. مشهد: جهاد دانشگاهی.

مخدوم، مجید. (۱۳۸۰). *ارزیابی و برنامه‌ریزی محیط زیست با روش‌های اکولوژیک*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

مظاهری، داوود و همکاران. (۱۳۸۱). *مبانی ژنتیک*. تهران: انتشارات سمت.

مظفریان، ولی‌الله. (۱۳۷۵). *فرهنگ نام‌های گیاهان ایران*. تهران: فرهنگ معاصر.

آیین‌نامه اجرایی قانون حفظ و گسترش فضای سبز در شهرها. (۱۳۸۹). مصوب هیئت وزیران.

آیین‌نامه اجرایی قانون هوای پاک. (۱۳۹۷). مصوب هیئت وزیران.