



تأثیر تنش فلزات سنگین بر بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه و کیفیت درمانی گیاهان دارویی: چالش‌ها و راهکارهای نوین

صغری کیانی^{۱*}، شکبیا رجب‌پور^۲

*۱. استادیار گروه کشاورزی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، so_kiani@pnu.ac.ir

۲. استادیار گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

نتایج و بحث

تنش فلزات و شبه‌فلزات سنگین یکی از پیچیده‌ترین تنش‌های غیرزیستی مؤثر بر گیاهان دارویی است که پیامدهای آن فراتر از کاهش رشد و عملکرد بوده و به‌طور مستقیم کیفیت درمانی، پایداری فیتوشیمیایی و ایمنی مصرف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تجمع این عناصر در بافت‌های گیاهی با برهم‌زدن تعادل اکسید و احیا و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، موجب اختلال در فتوسنتز، کاهش کلروفیل و بازآرایی عمیق مسیرهای فیزیولوژیکی و متابولیکی می‌شود (Sharma et al., 2012; Rai et al., 2019). در پاسخ به تنش فلزی، گیاهان دارویی با فعال‌سازی سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی و مسیر فنیل‌پروپانویید، تجمع ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی را افزایش می‌دهند. این افزایش عمدتاً ماهیتی تدافعی داشته و اگرچه در خنثی‌سازی ROS و افزایش تحمل گیاه نقش دارد، اما غالباً با کاهش رشد و عملکرد همراه است و لزوماً به معنای بهبود ارزش دارویی نیست (Sytar et al., 2021). در *Salvia spinosa*، سمیت بالاتر Sb(III) نسبت به Sb(V) باعث القای پاسخ‌های تدافعی شدیدتر، کاهش کلروفیل و افت رشد هم‌زمان با افزایش ترکیبات فنلی شده است که بیانگر هزینه متابولیکی بالای این سازوکار است (Rajabpoor et al., 2025a).

تحمل و تجمع فلزات سنگین حاصل برهم‌کنش هماهنگ تنظیم ناقل‌های غشایی، کمپلکس‌سازی فلزات و ذخیره‌سازی کنترل‌شده در واکوئل است. گیاهان متحمل از طریق حفظ تعادل اکسیداتیو می‌توانند سطوح بالاتری از فلزات را بدون اختلال شدید در عملکردهای حیاتی تحمل کنند که این ویژگی آن‌ها را برای کاربرد در فیتورمیدیشن برجسته می‌سازد (Sytar et al., 2021). با این حال، تجمع فلزات سمی در اندام‌های دارویی حتی در شرایط افزایش متابولیت‌های زیست‌فعال تهدیدی جدی برای ایمنی مصرف انسانی محسوب می‌شود (Rai et al., 2019).

مدیریت تغذیه‌ای به‌عنوان یک راهبرد کلیدی در تعدیل اثرات تنش فلزات سنگین مطرح است. شواهد نشان می‌دهد که کاربرد آهن با کاهش جذب فلزات سمی و تنظیم متعادل‌تر متابولیسم ثانویه همراه بوده، در حالی که فسفر اگرچه تحمل فیزیولوژیکی گیاه را افزایش می‌دهد، اما می‌تواند تجمع فلز را تشدید کند. از این رو، آهن بیشتر به‌عنوان راهکار ایمن‌سازی و فسفر به‌عنوان راهکار افزایش تحمل شناخته می‌شود؛ تمایزی که در *S. spinosa* تحت تنش آنتیموان به‌روشنی گزارش شده است (Rajabpoor et al., 2025a; 2025b).

در مجموع، افزایش متابولیت‌های ثانویه آنتی‌اکسیدانی نظیر ترکیبات فنلی و فلاونوئیدها در شرایط تنش فلزی بیانگر فعال‌سازی سازوکارهای تدافعی گیاه است، اما اتکا صرف به این شاخص‌ها برای ارزیابی کیفیت درمانی می‌تواند گمراه‌کننده باشد. تضمین کیفیت و ایمنی گیاهان دارویی در محیط‌های آلوده مستلزم رویکردی یکپارچه است که علاوه بر تحلیل تغییرات متابولیکی، پایش تجمع فلزات سنگین و به‌کارگیری مدیریت تغذیه‌ای مبتنی بر شواهد را نیز در بر گیرد.

منابع

- کیانی، ص.، احمدی، ج.، شیران، ب.، فابریکی-اورنگ، ص. و فلاحی، ح. (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات فیتوشیمیایی در مراحل رویشی و گلدهی زین گیاه (*Dracocephalum kotschyi* Boiss) تحت شرایط تنش خشکی. نشریه پژوهش‌های پیشرفته در گیاهان دارویی. ۳ (۲): ۴۵-۵۶.
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment international*, 125, 365-385. doi:10.1016/j.envint.2019.01.067
- Rajabpoor, S., Kiani, S., and Hajhashemi, S. (2025a). Application of iron on improving antimony tolerance in *Salvia spinosa*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 291, 117852. doi: 10.1016/j.ecoenv.2025.117852
- Rajabpoor, S., Hajhashemi, S., and Kiani, S. (2025b). Role of phosphate on uptake of antimonate coupled with upgrading *Salvia spinosa* L. tolerance to antimony toxicity. *Plant and Soil*, 1-12. doi: 10.1007/s11104-025-07337-2
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of botany*, 2012(1), 217037. doi: 10.1155/2012/217037
- Sytar, O., Ghosh, S., Malinska, H., Zivcak, M., & Brestic, M. (2021). Physiological and molecular mechanisms of metal accumulation in hyperaccumulator plants. *Physiologia plantarum*, 173(1), 148-166. doi: 10.1111/ppl.13285

چکیده

تنش فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی مؤثر بر تولید، کیفیت و ایمنی گیاهان دارویی در اکوسیستم‌های آلوده به‌شمار می‌رود. این تنش از طریق القای تنش اکسیداتیو، برهم‌زدن تعادل عناصر غذایی و ایجاد اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک و متابولیکی، بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگرچه افزایش ترکیباتی نظیر فنل‌ها، فلاونوئیدها و سایر متابولیت‌های ثانویه در بسیاری از مطالعات به‌عنوان پاسخ تدافعی گیاه گزارش شده است، اما این افزایش لزوماً به معنای بهبود کیفیت درمانی نبوده و در شرایط تنش فلزات سنگین می‌تواند با کاهش رشد، افت عملکرد و تجمع عناصر سمی در اندام‌های دارویی همراه باشد. در این مقاله مروری، اثر تنش فلزات سنگین بر مسیرهای بیوسنتزی متابولیت‌های ثانویه با تأکید بر مطالعات انجام‌شده روی *Salvia spinosa* تحت تنش آنتیموان و نقش عناصر غذایی در تعدیل این تنش بررسی شده و در ادامه، این نتایج با پاسخ‌های متابولیکی گیاه *Dracocephalum kotschyi* تحت تنش خشکی مقایسه می‌شود. در نهایت، راهکارهای نوین مدیریتی برای کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و حفظ کیفیت و ایمنی گیاهان دارویی ارائه می‌گردد.

مقدمه

گیاهان دارویی به دلیل دارا بودن متابولیت‌های ثانویه زیست‌فعال مانند ترکیبات فنلی، فلاونوئیدها، تریپنوئیدها و آلکالوئیدها، نقش مهمی در صنایع دارویی و سلامت ایفا می‌کنند و کیفیت درمانی آن‌ها به کمیت، تنوع و تعادل این ترکیبات وابسته است (Rai et al., 2021; Sytar et al., 2019). در دهه‌های اخیر، گسترش فعالیت‌های صنعتی، معدنی و کشاورزی ناپایدار منجر به آلودگی گسترده خاک و منابع آبی به فلزات سنگین شده است؛ عنصری که به دلیل پایداری، تجمع زیستی و سمیت بالا، تهدیدی جدی برای تولید ایمن گیاهان دارویی محسوب می‌شوند (Sharma et al., 2012).

تنش فلزات سنگین در گیاهان با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، اختلال در فتوسنتز، کاهش رشد و بازآرایی مسیرهای فیزیولوژیکی و متابولیکی همراه است (Sharma et al., 2012; Rai et al., 2019). در پاسخ به این تنش، گیاهان دارویی سامانه‌های تدافعی آنتی‌اکسیدانی و متابولیسم ثانویه را فعال می‌کنند. شواهد نشان می‌دهد که ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی از نخستین اجزای متابولیکی هستند که در مواجهه با فلزات سمی دچار تغییر می‌شوند و نقشی دوگانه در افزایش تحمل گیاه و تعیین کیفیت و ایمنی دارویی ایفا می‌کنند (Sytar et al., 2021).

با این حال، افزایش متابولیت‌های ثانویه تحت تنش فلزی همواره به معنای بهبود ارزش درمانی نیست و در برخی موارد بازتابی از یک پاسخ استرسی پرهزینه و ناپایدار برای گیاه است. از این رو، بررسی اثر تنش فلزات سنگین بر متابولیسم ثانویه گیاهان دارویی از منظر فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و کاربردی ضروری است (Rajabpoor et al., 2025a; 2025b).

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت مروری انجام شد. مقالات علمی مرتبط با تنش فلزات سنگین، متابولیت‌های ثانویه و گیاهان دارویی از پایگاه‌های Web of Science، Scopus و Google Scholar استخراج شدند. در انتخاب منابع، مطالعات تجربی معتبر که به بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و متابولیکی گیاهان دارویی تحت تنش فلزات سنگین پرداخته بودند، در اولویت قرار گرفتند.

به‌طور ویژه، نتایج مطالعات انجام‌شده روی *S. spinosa* تحت تنش آنتیموان و نقش عناصر غذایی نظیر آهن و فسفر در تعدیل این تنش به‌عنوان مطالعات موردی اصلی مورد استفاده قرار گرفتند (Rajabpoor et al., 2025a; Rajabpoor et al., 2025b). همچنین، به‌منظور مقایسه مفهومی پاسخ‌های متابولیکی، مطالعه تنش خشکی روی *Dracocephalum kotschyi* به‌عنوان نمونه‌ای از تنش غیرزیستی فاقد ریسک تجمع آلاینده‌ها در تحلیل‌ها لحاظ شد (کیانی و همکاران، ۱۳۹۸).