



# تنظیم متابولیت‌های ثانویه آویشن کوهی در پاسخ به تنش‌های محیطی با رویکردهای نوین فیتوشیمیایی و مولکولی

مریم صمدی خوشخوا<sup>۱</sup>، امید سفالیان<sup>۱\*</sup>، نورالدین حسین پورآزاد<sup>۲</sup>، علی اصغری<sup>۱</sup>

۱-مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

۲-گروه علوم گیاهی و گیاهان دارویی، دانشکده کشاورزی مشگین شهر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

در *T. kotschyanus*، پیش‌سازهای مونوترپن‌ها به طور عمده از مسیر متیل-اریتریتول فسفات در پلاستیدها تأمین می‌شوند. ابتدا ژرانیل دی‌فسفات توسط آنزیم ترپن‌سنتاز به گاما-تریپن تبدیل می‌شود. گاما-تریپن به صورت خودبه‌خودی یا آنزیمی به پی-سیمن اکسید می‌شود. در نهایت، پی-سیمن توسط آنزیم‌های سیتوکروم P450 به نام‌های CYP71D178 و CYP71D180 در موقعیت‌های مختلف هیدروکسیله شده و به تیمول یا کارواکرول تبدیل می‌شود. با این حال، یافته‌های ترنسکریپتومیکس اخیر نشان می‌دهد که بیان ژن‌های کدکننده این آنزیم‌ها ثابت نبوده و همبستگی مستقیمی با شرایط تنش محیطی دارد (Alipour et al., 2025).

## چکیده

گیاه آویشن کوهی یکی از گونه‌های ارزشمند و بومی ایران است که سهم بسزایی در طب سنتی و صنایع دارویی دارد. هدف از این مطالعه، بررسی و تحلیل آخرین یافته‌های علمی پیرامون ترکیبات فیتوشیمیایی، مکانیسم‌های پاسخ به عوامل محیطی و کاربردهای نوین بیوتکنولوژی در این گیاه است. مرور منابع علمی بیانگر این است که اگرچه تیمول و کارواکرول مهم‌ترین ترکیبات تشکیل‌دهنده اسانس این گیاه هستند، نکته قابل تامل اینجاست که کمیت و کیفیت آن‌ها ثابت نیست و به شدت تحت تأثیر فاکتورهای اکولوژیکی نظیر ارتفاع از سطح دریا و تنش‌های خشکی قرار دارد. در واقع آویشن کوهی با دریافت تنش‌های محیطی، مسیرهای بیوسنتزی خود را در جهت تولید بیشتر آنتی‌اکسیدان‌ها فعال می‌کند. این مجموعه یافته‌ها نشان می‌دهد که شناخت دقیق برهم‌کنش ژنوتیپ و محیط در این گونه گیاهی می‌تواند در توسعه راهبردهای اهلی‌سازی و تولید مواد مؤثره استاندارد، نقش کلیدی ایفا نماید.

## تأثیر عوامل اکوفیزیولوژیک بر متابولیت‌ها

تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاهان دارویی، یک استراتژی دفاعی برای بقا در محیط‌های متغیر است. ارتفاع از سطح دریا یکی از پیچیده‌ترین گرادیان‌های محیطی است که با تغییرات همراه است. تحقیقات میدانی بر روی فلور ارتفاعات ایران نشان می‌دهد که آویشن کوهی در ارتفاعات بالاتر، جهت محافظت از دستگاه فتوسنتزی در برابر اشعه UV، میزان بیشتری فلاونوئید و ترکیبات فنلی در اپیدرم برگ ذخیره می‌کند (Sohbatzadeh et al., 2022). آویشن کوهی به عنوان یک گیاه خشکی پسند، مکانیسم‌های کارآمدی برای تحمل به تنش خشکی دارد. تنش خشکی باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن ROS در سلول می‌شود. گیاه برای مقابله با این تنش اکسیداتیو، بیوسنتز مونوترپن‌های فنلی که خاصیت آنتی‌اکسیدانی دارند را افزایش می‌دهد. مطالعات اخیر نشان داده است که تنش خشکی ملایم تا متوسط، بیان ژن‌های مسیر MEP را تحریک کرده و باعث افزایش محتوا و درصد اسانس در بافت گیاه می‌شود، هرچند که به دلیل کاهش رشد رویشی، ممکن است عملکرد کل در هکتار کاهش یابد (Alipour et al., 2025).

## نتیجه‌گیری

جمع‌بندی مطالعات این پژوهش، نشانگر این است که آویشن کوهی، یک مخزن ژنتیکی ارزشمند برای تولید ترکیبات دارویی است. تنوع بالای کموتایپی در رویشگاه‌های ایران، فرصت بی‌نظیری را برای برنامه‌های اصلاحی این گیاه فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که تنش‌های محیطی همچون ارتفاعات بالاتر و تنش‌های خشکی کنترل‌شده، می‌توانند به عنوان محرک‌هایی برای افزایش کیفیت اسانس عمل کنند. بررسی‌های صورت‌گرفته روشن می‌سازد که بهره‌گیری از ابزارهای نوین، از فناوری‌های اومیکس گرفته تا سیستم‌های کشت پیشرفته، مسیر آینده بهبود بهره‌وری و پایداری تولید ترکیبات مؤثره این گونه را مشخص می‌کند. به‌کارگیری رویکردهای ترکیبی شامل کشت دیم، اومیکس و فناوری‌های نوظهور، می‌تواند آینده بهبود بهره‌وری و پایداری تولید مواد مؤثره آویشن کوهی را تضمین کند.

## منابع

حسین پورآزاد، ن.، آراستگی مرئی، ح.، و بورنگ، ش. ۱۴۰۱. مروری بر گیاه دارویی گل گاوزبان ایرانی. اکوفیزیولوژی و فیتوشیمی گیاهان دارویی و معطر. ۹(جدید ۱): ۷۱-۶۱. doi: 10.30495/ejmp.2022.1961601.1246

Alipour, M., Haghghi, M., Rahimmalek, M., Reichelt, M., Martinelli, L., Groten, K., and Mithöfer, A. (2025). Integrated metabolomics, transcriptomic, and phytohormonal analyses to study the effects of water stress and foliar abscisic acid application in *Thymus* species using LC-MS/MS. *Frontiers in Plant Science*, 16: 1557446. doi: 10.3389/fpls.2025.1557446.

## مقدمه

خانواده نعناعیان به ویژه جنس آویشن به دلیل دارا بودن خواص چندگانه دارویی و تولید ترکیبات ترپنوئیدی و اسانس‌های فرار، در کانون توجه قرار دارند. متابولیت‌های ثانویه این گیاهان نه تنها ارزش اقتصادی دارند، بلکه به عنوان مکانیسم‌های دفاعی در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده عمل می‌کنند. در میان گونه‌های ایران، آویشن کوهی که در دامنه‌های سنگی کوهستان رویش دارد، به واسطه سازگاری فوق‌العاده با شرایط سخت اقلیمی و تولید تیمول و کارواکرول، اهمیت ویژه‌ای دارد (Sohbatzadeh et al., 2022).

با وجود پتانسیل بالا، اکثر مطالعات پیشین توصیفی بوده و ناپایداری کمیت و کیفیت اسانس در پاسخ به ارتفاعات و تنش‌های مختلف، چالش اصلی در بهره‌برداری صنعتی است. این مقاله مروری تلاش دارد با تلفیق و تحلیل انتقادی یافته‌های فیتوشیمیایی و مولکولی سال‌های اخیر، تصویر جامعی از مکانیسم‌های تنظیم متابولیت‌های ثانویه در پاسخ به عوامل اکوفیزیولوژیک در آویشن کوهی ارائه دهد.

## روش جست‌وجوی منابع

این مطالعه مروری بر پایه جست‌وجوی نظام‌مند در پایگاه‌های اطلاعاتی Web of Science، Direct Science، Scopus، و Google Scholar انجام شدند. کلیدواژه‌هایی از قبیل *Thymus kotschyanus*، thymol، carvacrol، essential oil، phytochemistry، Abiotic Stress به صورت منفرد و ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند.

معیار ورود مطالعات، شامل تمرکز بر گونه *T. kotschyanus* یا گونه‌های بسیار نزدیک در جنس *Thymus*، همچنین داشتن داده‌های کمی درباره ترکیبات اسانس، پاسخ به تنش‌های محیطی یا کاربردهای بیوتکنولوژیک و نیز انتشار در مجلات معتبر علمی بود. مقالات فاقد روش‌شناسی واضح یا داده‌های قابل استناد کنار گذاشته شدند.

## مکانیسم بیوسنتز مونوترپن‌ها

درک مسیر بیوسنتزی برای تفسیر تغییرات متابولیتی در پاسخ به محیط ضروری است.