



A comprehensive review with a phytochemical approach on the natural insecticide pyrethrum (*Tanacetum cinerariifolium*)

Fatemeh Bina^{1*} | Amin Panjsotouni² | Ayatollah Rezaei³

1. Master of Science, Department of Horticulture, Faculty of Agricultural Sciences, Shahed University.
2. Master of Science in Medicinal Plants, Department of Horticulture, Faculty of Agricultural Sciences, Shahed University.
3. Associate Professor, Department of Horticulture, Faculty of Agricultural Sciences, Shahed University.

* Corresponding Author Email: f.bina@shahed.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 19/12/2024
Accepted: 27/01/2025

Keywords:

pyrethrum active compounds,
pyrethrins,
HPLC,
LC-MS/MS,
herbal insecticide.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Pyrethrum, derived from *Tanacetum cinerariifolium* L., is one of the most significant natural insecticides known for its selective toxicity toward insects, rapid environmental degradation, and low mammalian toxicity. These properties have secured its role in sustainable agriculture and integrated pest management (IPM) systems. The insecticidal activity of pyrethrum is primarily attributed to six lipophilic esters collectively known as pyrethrins, which are categorized into Type I (pyrethrin I, cinerin I, jasmolin I) and Type II (pyrethrin II, cinerin II, jasmolin II). Type I pyrethrins exhibit stronger knockdown effects, whereas Type II compounds offer greater stability. Despite its long-standing use and environmental compatibility, the efficacy and quality of pyrethrum-based products are highly variable, influenced by genetic, agronomic, and analytical factors. Therefore, a comprehensive understanding of pyrethrin chemistry, biosynthesis, extraction techniques, and modern analytical methodologies is essential for optimizing its application and ensuring product consistency.

Cite this article: Bina, Fatemeh; Panjsotouni, Amin & Rezaei, Ayatollah (2024-25). A comprehensive review with a phytochemical approach on the natural insecticide pyrethrum (*Tanacetum cinerariifolium*). *Journal of Phytoallexins*, 1(2).



© The Author(s).

Publisher: Shahed University

Materials and Methods: This paper is structured as a systematic literature review. A thorough search was conducted across major international scientific databases including Web of Science, Scopus, PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar using key terms such as



Pyrethrum, Pyrethrins, Pyrethrin biosynthesis, HPLC analysis of pyrethrins, LC–MS/MS pyrethrins, and botanical insecticides. The search spanned publications from 1970 to 2025, with particular emphasis on analytical advancements in the last decade. Peer-reviewed research articles, review papers, book chapters, and reports from authoritative bodies like the WHO and FAO were critically evaluated. The focus was on integrating current knowledge regarding the chemical profile of pyrethrins, their biosynthetic pathways, the impact of environmental and genetic variables on accumulation, extraction methods (both classical and modern), and validated analytical techniques especially high-performance liquid chromatography (HPLC) and liquid chromatography–tandem mass spectrometry (LC–MS/MS) used for quality control and residue monitoring.

Results and Discussion: The biosynthesis of pyrethrins in *T. cinerariifolium* involves the convergence of the terpenoid pathway producing chrysanthemic acid and the jasmonic acid pathway yielding rethrolone-type alcohols. Key enzymes such as chrysanthemyl diphosphate synthase (CDS) and transcription factors like TcMYC2 regulate this process in response to developmental and environmental cues, including mechanical stress or insect herbivory. Pyrethrins accumulate predominantly in the glandular tissues of flower heads, especially in the ovaries, with concentrations peaking at full bloom. Extraction techniques have evolved from solvent-intensive classical methods (e.g., Soxhlet with hexane) toward greener, more efficient alternatives such as ultrasound-assisted extraction (UAE) and supercritical CO₂ extraction, which improve yield while minimizing thermal degradation and solvent use. Analytically, HPLC with diode array detection (DAD) remains a cost-effective and reliable method for the simultaneous quantification of all six pyrethrins in botanical extracts, typically using a C18 column and acetonitrile–water mobile phases with detection at 225 nm. However, for complex matrices such as food or environmental samples, LC–MS/MS offers superior sensitivity and selectivity, with detection limits in the nanogram-per-kilogram range via multiple reaction monitoring (MRM) in positive electrospray ionization mode. This technique is critical for compliance with Maximum Residue Limits (MRLs) established by regulatory agencies like the European Commission. Despite its benefits, pyrethrum faces challenges including photodegradation, batch-to-batch variability, and non-selective toxicity to beneficial insects like pollinators. Future research should focus on stabilizing formulations (e.g., nano-encapsulation), breeding high-yielding cultivars through genetic insight, and integrating pyrethrum into ecologically sound IPM frameworks. Overall, pyrethrum remains a cornerstone of natural pest control, and its continued relevance depends on synergizing botanical knowledge on cutting-edge analytical and agronomic innovations.

مروری جامع با رویکرد فیتوشیمیایی بر گل حشره‌کش طبیعی پیرتروم (*Tanacetum cinerariifolium*)

فاطمه بینا^{*۱} | امین پنجستونی^۲ | آیت اله رضائی^۳

۱. کارشناس ارشد گروه علوم باغبانی دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گیاهان دارویی، گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد.

۳. دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد.

* ایمیل نویسنده مسئول: f.bina@shahed.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	پیرتروم (<i>Tanacetum cinerariifolium</i> L.) یکی از مهم‌ترین حشره‌کش‌های طبیعی شناخته‌شده است که به دلیل سمیت انتخابی برای حشرات، تجزیه‌پذیری سریع در محیط و ایمنی نسبی برای پستانداران، جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی پایدار و مدیریت تلفیقی آفات یافته است. ترکیبات فعال پیرتروم شامل شش استر اصلی موسوم به پیرترین‌ها هستند که از نظر ساختار شیمیایی، فعالیت زیستی و پایداری، تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند. هدف از این مقاله مروری، بررسی جامع پیشرفت‌های علمی مرتبط با شیمی پیرترین‌ها، مسیرهای بیوسنتز در گیاه، عوامل مؤثر بر تجمع این ترکیبات، روش‌های استخراج کلاسیک و نوین و به‌ویژه روش‌های آنالیتیکی معتبر مبتنی بر HPLC، LC-MS/MS و GC-MS است. در این مقاله، داده‌های واقعی و منتشر شده مربوط به شرایط کروماتوگرافی، زمان‌های نگهداری، حدود تشخیص و کمی‌سازی و کاربرد این روش‌ها در کنترل کیفیت عصاره‌های گیاهی و پایش باقیمانده‌ها در محصولات کشاورزی گردآوری و تحلیل شده‌اند. نتایج این مرور نشان می‌دهد که روش‌های LC-MS/MS به‌عنوان دقیق‌ترین و اختصاصی‌ترین ابزار برای تفکیک و تعیین جداگانه شش پیرترین شناخته می‌شوند، در حالی که HPLC-DAD همچنان روشی مقرون‌به‌صرفه و قابل اعتماد برای کنترل کیفیت فرآورده‌های گیاهی است. این مقاله می‌تواند به‌عنوان مرجع علمی برای پژوهشگران حوزه گیاهان دارویی، حشره‌کش‌های گیاهی و آنالیز ترکیبات طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸	
واژه‌های کلیدی: ترکیبات فعال پیرتروم، پیرترین‌ها، HPLC، LC-MS/MS، حشره‌کش گیاهی.	

استناد: بینا، فاطمه؛ پنجستونی، امین؛ رضائی، آیت‌اله (۱۴۰۳). مروری جامع با رویکرد فیتوشیمیایی بر گل حشره‌کش طبیعی پیرتروم (*Tanacetum cinerariifolium*). دوفصلنامه گیاه‌پاد، ۱ (۲)، ۷۹-۹۴.



حق مؤلف © نویسندگان.

ناشر: دانشگاه شاهد

مقدمه

گل حشره‌کش (Pyrethrum) گیاهی است که در کوه‌های شمال ایران تا ارتفاع ۲۰۰۰ متر از سطح دریا و همچنین در کوه‌های ارمنستان و قفقاز به‌طور خودرو می‌روید. ماده موثره این گیاه شش استر است به نام پیرترین (پیرترین یک - دو و سینرین یک - دو) که خاصیت حشره‌کشی پیرترین یک و سینرین یک بیشتر از بقیه است. مقدار پیرترین در تمام اعضا گیاه بالاخص در گل و تخمدان‌ها بیشتر است. برای قویتر نمودن خاصیت حشره‌کشی گل حشره‌کش موادی از قبیل پی پرونیل بوتوکسید یا بوتوکساید، سزوگسان و سولفوکساید به آن اضافه و سمیت آن را تا ۲ برابر افزایش می‌دهد. گل حشره‌کش دارای خاصیت فلج‌کننده قوی است ولی پس از اندک زمانی بعضی از حشرات فلج‌شده قادرند پرواز کنند. بدین جهت در محلول‌های گل حشره‌کش غالباً یکی از حشره‌کش‌های مصنوعی افزوده می‌شود تا گل حشره‌کش باعث فلج سریع حشره و حشره‌کش مصنوعی باعث مرگ حشره شود. امشی از فرآورده‌هایی است که دارای ددت، عصاره پیرتروم، اسانس و نفت می‌باشد (Metwalian, 2001). افزایش جمعیت جهانی و نیاز روزافزون به تولید محصولات کشاورزی، استفاده گسترده از حشره‌کش‌های شیمیایی را در دهه‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش داده است. اگرچه این ترکیبات نقش مهمی در کنترل آفات و افزایش عملکرد محصولات ایفا کرده‌اند، اما مصرف بی‌رویه آن‌ها منجر به بروز مشکلات جدی زیست محیطی، آلودگی منابع آب و خاک، ظهور آفات مقاوم و تهدید سلامت انسان و سایر موجودات غیرهدف شده است (Casida and Durkin, 2013). این چالش‌ها ضرورت توسعه و به‌کارگیری جایگزین‌های ایمن‌تر و سازگار با محیط زیست را بیش از پیش آشکار ساخته‌اند. در این میان، حشره‌کش‌های گیاهی به‌عنوان بخشی از راهبردهای کشاورزی پایدار و مدیریت تلفیقی آفات، توجه پژوهشگران و سیاست‌گذاران را به خود جلب کرده‌اند. این ترکیبات طبیعی به‌طور کلی دارای زیست‌تخریب‌پذیری بالا، پایداری کمتر در محیط و سمیت پایین‌تر برای پستانداران و حشرات مفید هستند (Isman, 2020). در میان حشره‌کش‌های گیاهی شناخته‌شده، پیرتروم جایگاه ویژه‌ای دارد و به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال مؤثرترین حشره‌کش‌های طبیعی شناخته می‌شود.

حشره‌کش طبیعی پیرتروم از گل‌های خشک شده گیاه پیرتروم (*Tanacetum cinerariifolium*)، متعلق به خانواده (Asteraceae)، استخراج می‌شود. این گیاه بومی مناطق بالکان و شرق مدیترانه بوده و امروزه در کشورهای مختلفی از جمله کنیا، تانزانیا، استرالیا و برخی مناطق آسیا به‌صورت تجاری کشت می‌گردد (Grdiša et al., 2014). ترکیبات فعال اصلی پیرتروم، مجموعه‌ای از استرهای طبیعی موسوم به پیرترین‌ها هستند که مسئول فعالیت حشره‌کشی سریع و مؤثر این عصاره گیاهی می‌باشند. پیرترین‌ها با اثرگذاری بر کانال‌های سدیمی وابسته به ولتاژ در سیستم عصبی حشرات، موجب اختلال در انتقال پیام‌های عصبی، فلج سریع و در نهایت مرگ حشره می‌شوند. این مکانیسم عمل شباهت‌هایی با حشره‌کش‌های سنتتیک پیرتروئیدی دارد (Soderlund, 2012). این ویژگی‌ها سبب شده است که پیرتروم به‌ویژه در تولید محصولات ارگانیک و سیستم‌های کشاورزی کم‌نهاده مورد توجه قرار گیرد. با وجود مزایای متعدد پیرتروم، کیفیت و اثربخشی آن به شدت تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر ژنوتیپ گیاه، شرایط اقلیمی، مرحله برداشت، روش استخراج و تکنیک‌های آنالیز قرار دارد. از این رو، استفاده از روش‌های دقیق و قابل اعتماد برای شناسایی و تعیین کمی پیرترین‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (Soderlund, 2012).

برخلاف بسیاری از آفت‌کش‌های مصنوعی، پیرترین در آب، نور خورشید و هوا بسیار زیست‌تخریب‌پذیر است و با وجود سابقه طولانی استفاده، مقاومت در برابر آن در عمل بسیار نادر مشاهده شده است (Yang et al., 2020). گزارش سازمان بهداشت جهانی بیان می‌کند که داده‌های موجود در مورد انسان‌ها هیچ اثر نامطلوب قابل توجهی بر سلامتی پس از قرار گرفتن در معرض محصولات مدرن مبتنی بر پیرترین نشان نمی‌دهد (WHO, 2010). پژوهشگران نیز تأیید کردند که سطوح پیرترین مورد استفاده برای مصرف‌کنندگان یا کشاورزان نگران‌کننده نیست (Hernández-Moreno et al., 2013). با این حال، وقتی پیرترین‌ها مستقیماً در شرایط آزمایشگاهی استفاده شوند، برای ماهی‌ها (Pillmore, 1973)، دوزیستان (Oliveira

(et al., 2019) و بی‌مهرگان آبی (مانند خرچنگ) (Camougis and Davis, 1971) سمی هستند. بررسی تأثیر پیرترین‌ها بر محیط زیست، سمیت آنها بر گونه‌های هدف و غیر هدف و همچنین بیوسنتز، فعالیت بیولوژیکی، روش‌های استخراج و تعیین مقدار و عوامل مؤثر بر میزان و ترکیب پیرترین (ویژگی‌های مورفولوژیکی، زمان بلوغ/برداشت گل، شیوه‌های کشاورزی و غیره) ارائه شده است (Grdiša et al., 2024). پیرترین دالماسی به طور طبیعی در شرق مدیترانه (مناطق مدیترانه‌ای-اروپایی و زیرمدیترانه‌ای) یافت می‌شود و یک جزء رایج از پوشش گیاهی درختچه‌ای کم رشد در خاک‌های آهکی است. منطقه اصلی پراکنش آن شامل منطقه ساحلی و جزایر کرواسی (یعنی دالماتیا)، بخش‌های جنوبی بوسنی و هرزگوین و مناطق ساحلی مونته‌نگرو و آلبانی است (Euro+Med, 2006; Nikolić, 2020).

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه روش‌های آنالیتیکی به‌ویژه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) و کروماتوگرافی مایع-طیف‌سنجی جرمی دوگانه (LC-MS/MS) صورت گرفته است که امکان اندازه‌گیری دقیق ترکیبات فعال پیرتروم را فراهم ساخته‌اند (Peruga et al., 2013). با توجه به گسترش مطالعات پراکنده در زمینه ترکیبات شیمیایی، بیوسنتز، استخراج و آنالیز پیرتروم، نیاز به یک مرور جامع و یکپارچه از یافته‌های علمی احساس می‌شود. هدف از این مقاله مروری، گردآوری، تحلیل و مقایسه نتایج پژوهش‌های معتبر منتشرشده در سال‌های اخیر در خصوص پیرتروم است، به‌گونه‌ای که ضمن ارائه تصویری روشن از وضعیت کنونی دانش، خلأهای پژوهشی موجود و مسیرهای آینده تحقیقات در این حوزه نیز مشخص گردد. تمرکز ویژه این مقاله بر داده‌های تحلیلی حاصل از HPLC و LC-MS/MS است که نقش کلیدی در کنترل کیفیت عصاره‌های پیرتروم و پایش باقی‌مانده‌های آن در محصولات کشاورزی ایفا می‌کنند.

مواد و روش‌ها

این مقاله به‌صورت یک مطالعه مروری نظام‌مند طراحی و اجرا شد. به‌منظور گردآوری منابع علمی مرتبط با پیرتروم و پیرترین‌ها، جست‌وجوی جامع در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر بین‌المللی شامل PubMed، Scopus، Web of Science، ScienceDirect و Google Scholar انجام گرفت. کلیدواژه‌های مورد استفاده به‌صورت منفرد و ترکیبی شامل Pyrethrum، Pyrethrin biosynthesis، Pyrethrin extraction، Pyrethrum LC-MS/MS، HPLC analysis of pyrethrins، botanical insecticides و GC-MS pyrethrum، pyrethrins سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۵ را در بر گرفت، با تمرکز ویژه بر مطالعات دهه اخیر در حوزه روش‌های آنالیتیکی پیشرفته. مقالات پژوهشی، مقالات مروری، فصول کتاب‌ها و گزارش‌های سازمان‌های معتبر بین‌المللی (نظیر WHO و FAO) که به شیمی پیرترین‌ها، بیوسنتز، عوامل مؤثر بر تجمع، روش‌های استخراج و آنالیز این ترکیبات پرداخته بودند، مورد بررسی قرار گرفتند.

گیاه‌شناسی، پراکنش جغرافیایی و ویژگی‌های اکولوژیک پیرتروم

پیرتروم با نام علمی *Tanacetum cinerariifolium* (Trevir.) Sch. Bip. گیاهی چندساله و علفی از خانواده بزرگ Asteraceae است که به دلیل تولید ترکیبات حشره‌کش طبیعی، اهمیت اقتصادی و علمی قابل توجهی دارد. این گیاه دارای ساقه‌ای ایستاده، منشعب و پوشیده از کرک‌های نقره‌ای‌رنگ است که ارتفاع آن معمولاً بین ۴۰ تا ۸۰ سانتی‌متر متغیر می‌باشد. برگ‌ها عمیقاً بریدگی‌دار، خاکستری-سبز و متناوب بوده و گل‌آذین به‌صورت کپه‌ای با گل‌های شعاعی سفید و گل‌های لوله‌ای زردرنگ در مرکز ظاهر می‌شود (Grdiša et al., 2014). اندام اقتصادی اصلی پیرتروم، گل‌های آن هستند که بیشترین غلظت پیرترین‌ها را در خود جای داده‌اند. مطالعات آناتومیکی نشان داده‌اند که پیرترین‌ها عمدتاً در بافت‌های غده‌ای گل‌ها و به‌ویژه در ناحیه تخمدان تجمع می‌یابند. از این رو، زمان برداشت گل‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی محصول دارد؛ به‌طوری که برداشت در مرحله شکوفایی کامل گل معمولاً بیشترین بازده پیرترین را به همراه دارد (Grdiša et al., 2014) (شکل ۱). پیرتروم بومی مناطق ساحلی دریای آدریاتیک در جنوب شرقی اروپا است. با این حال، به دلیل ارزش اقتصادی بالا، کشت این گیاه به مناطق مختلفی از جهان گسترش یافته است. امروزه کشورهای شرق آفریقا به‌ویژه

کنیا و تانزانیا از مهم‌ترین تولیدکنندگان پیرتروم در جهان محسوب می‌شوند. علاوه بر این، استرالیا، چین، ژاپن و برخی کشورهای آمریکای جنوبی نیز در تولید تجاری پیرتروم نقش دارند (Shrestha, 2014). شرایط اقلیمی نقش مهمی در رشد گیاه و میزان تولید پیرترین‌ها ایفا می‌کند. پیرتروم به‌طور کلی در مناطق با آب‌وهوای معتدل، تابستان‌های خنک و زمستان‌های ملایم بهترین عملکرد را دارد. خاک‌های سبک تا متوسط با زهکشی مناسب و pH نزدیک به خنثی برای کشت این گیاه مطلوب هستند. تنش‌های محیطی نظیر خشکی، شدت نور و دمای بالا می‌توانند به‌طور مستقیم بر بیان ژن‌های دخیل در بیوسنتز پیرترین‌ها و در نتیجه بر محتوای نهایی این ترکیبات تأثیر بگذارند (Xu et al., 2018).



شکل ۱. پیرتروم (*T. cinerariifolium*)، کرومولیتوگراف پس از یک تصویر گیاه‌شناسی از کتاب گیاهان دارویی هرمان آدولف کوهلر، ویرایش شده توسط گوستاو پابست، کوهلر، آلمان، ۱۸۸۷.

Fig. 1. Pyrethrum, *T. cinerariifolium*, Chromolithograph after a botanical illustration from Hermann Adolph Koehler's Medicinal Plants, edited by Gustav Pabst, Koehler, Germany, 1887.

ترکیبات شیمیایی پیرتروم و طبقه‌بندی پیرترین‌ها

ترکیبات شیمیایی پیرتروم

خاصیت حشره‌کشی پیرتروم عمدتاً ناشی از حضور گروهی از استرهای طبیعی موسوم به پیرترین‌ها است. این ترکیبات ثانویه گیاهی، مجموعه‌ای از شش استر لیپوفیل هستند که از نظر ساختار شیمیایی شباهت زیادی به یکدیگر دارند و به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: پیرترین‌های نوع I و پیرترین‌های نوع II تفاوت اصلی این دو گروه در نوع اسید الکلی

متصل شونده در ساختار مولکولی آن‌هاست (Casida and Durkin, 2013). پیرترین‌های نوع I شامل پیرترین I، سینرین I و جاسمولین I بوده و فاقد گروه استری کربوکسیلات هستند، در حالی که پیرترین‌های نوع II شامل پیرترین II، سینرین II و جاسمولین II می‌باشند که دارای یک گروه کربوکسیلات اضافی هستند. این تفاوت ساختاری موجب تغییر در قطبیت، پایداری و تا حدی فعالیت زیستی این ترکیبات می‌شود. به‌طور کلی، پیرترین‌های نوع I فعالیت ضربه‌ای قوی‌تری دارند، در حالی که نوع II از پایداری نسبی بالاتری برخوردارند (Soderlund, 2012). مطالعات فیتوشیمیایی نشان داده‌اند که پیرترین I و پیرترین II معمولاً فراوان‌ترین اجزای پیرتروم هستند و سهم عمده‌ای از فعالیت حشره‌کشی را به خود اختصاص می‌دهند. نسبت این ترکیبات می‌تواند بسته به ژنوتیپ گیاه، شرایط رشد، مرحله برداشت و روش استخراج متفاوت باشد. این تغییرپذیری، اهمیت استفاده از روش‌های آنالیتیکی دقیق برای تعیین ترکیب شیمیایی پیرتروم را برجسته می‌سازد (Grdiša et al., 2014). علاوه بر پیرترین‌ها، پیرتروم حاوی ترکیبات فرعی دیگری نظیر فلاونوئیدها، تریپ‌ها و ترکیبات فنولی است که اگرچه نقش مستقیم کمتری در فعالیت حشره‌کشی دارند، اما می‌توانند بر پایداری عصاره و اثرات هم‌افزایی زیستی تأثیرگذار باشند (Shrestha et al., 2014). بررسی جامع این ترکیبات به درک بهتر خواص زیستی پیرتروم کمک می‌کند. مقادیر ارائه شده بازه‌های گزارش شده در مطالعات مختلف بوده و نشان‌دهنده تغییرپذیری ترکیب پیرترین‌ها تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی هستند (Grdiša et al., 2014, Shrestha et al., 2014).

جدول ۱. ترکیبات اصلی پیرترین‌ها در پیرتروم

Table 1. Main pyrethrin compounds in pyrethrum

Compound Group	Compound Name	Chemical Formula	Molecular Mass (g/mol)	Relative Fraction (%)
Type I Pyrethrins	Pyrethrin I	C ₂₁ H ₂₈ O ₃	328.45	30-38
	Cinerin I	C ₂₀ H ₂₈ O ₃	316.44	6-10
	Jasmolin I	C ₂₁ H ₃₀ O ₃	330.46	3-6
Type II Pyrethrins	Pyrethrin II	C ₂₂ H ₂₈ O ₅	327.45	18-24
	Cinerin II	C ₂₁ H ₂₈ O ₅	360.44	4-7
	Jasmolin II	C ₂₂ H ₃₀ O ₅	374.47	2-5

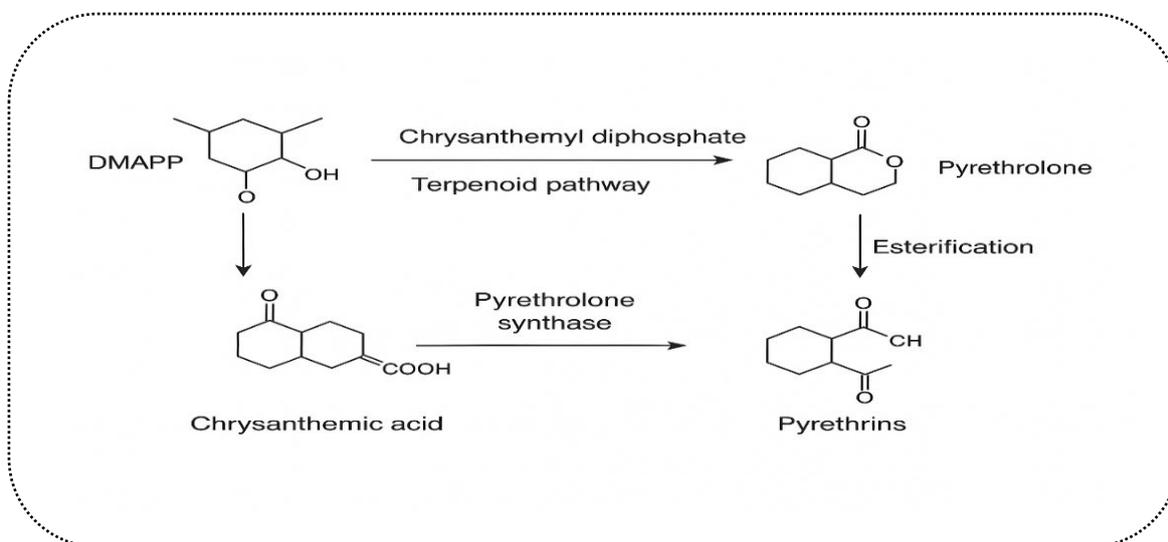
مسیرهای بیوسنتز پیرترین‌ها در پیرتروم

بیوسنتز پیرترین‌ها

بیوسنتز پیرترین‌ها در گیاه پیرتروم یک فرایند پیچیده و چندمرحله‌ای است که حاصل همگرایی دو مسیر متابولیکی اصلی شامل مسیر ترپنوئیدی و مسیر اسید جاسمونیک می‌باشد. این همگرایی منجر به تشکیل استرهای نهایی پیرترین‌ها می‌شود که عامل اصلی خاصیت حشره‌کشی پیرتروم هستند (Ramirez et al., 2012). در مرحله نخست، مسیر ترپنوئیدی از طریق واحدهای ایزوپرنوئیدی منجر به تولید پیش‌ساز مهمی به نام کریزانثیل دی‌فسفات می‌گردد. این واکنش که به عنوان اولین مرحله اختصاصی بیوسنتز پیرترین‌ها شناخته می‌شود، توسط آنزیم کلیدی CDS¹ کاتالیز می‌شود. فعالیت این آنزیم نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان نهایی تولید پیرترین‌ها دارد و تنظیم بیان ژن مربوط به آن از اهمیت بالایی برخوردار است (Ramirez et al., 2012). به‌طور هم‌زمان، مسیر اسید جاسمونیک منجر به تولید اسیدهای الکلی نظیر پیرترولات و جاسمولات می‌شود که در مراحل پایانی بیوسنتز، با بخش ترپنوئیدی ترکیب شده و ساختار نهایی پیرترین‌ها را شکل می‌دهند. شواهد نشان می‌دهد که مسیر جاسمونات نه‌تنها در تأمین پیش‌سازها نقش دارد، بلکه به‌عنوان یک مسیر تنظیمی،

1. Chrysanthemyl diphosphate synthase

بیان ژن‌های دخیل در بیوسنتز پیرترین‌ها را نیز کنترل می‌کند (Xu et al., 2018). مطالعات مولکولی اخیر نشان داده‌اند که فاکتورهای رونویسی متعددی در تنظیم بیوسنتز پیرترین‌ها نقش دارند. از جمله این عوامل می‌توان به فاکتورهای پاسخ‌دهنده به جاسمونات مانند TcMYC2 اشاره کرد که بیان ژن‌های CDS و سایر آنزیم‌های کلیدی مسیر را به‌طور مثبت تنظیم می‌کنند. افزایش بیان این فاکتورها معمولاً با افزایش تجمع پیرترین‌ها در گل‌های پیرتروم همراه است (Zeng et al., 2022). عوامل محیطی نظیر شدت نور، دما و تنش‌های زیستی نیز می‌توانند از طریق تأثیر بر مسیر جاسمونات، بر بیوسنتز پیرترین‌ها اثرگذار باشند. به‌عنوان مثال، تنش‌های مکانیکی یا حمله حشرات می‌تواند موجب فعال‌سازی مسیر جاسمونات و در نتیجه افزایش تولید پیرترین‌ها به‌عنوان یک مکانیسم دفاعی گیاه شود. این ویژگی، پیرتروم را به نمونه‌ای شاخص از گیاهان دارای دفاع شیمیایی القاشونده تبدیل کرده است (Xu et al., 2018). در مجموع، درک دقیق مسیرهای بیوسنتز و مکانیسم‌های تنظیمی پیرترین‌ها، علاوه بر افزایش دانش بنیادی، زمینه را برای بهبود تولید پیرتروم از طریق اصلاح ژنتیکی، مدیریت زراعی و بهینه‌سازی شرایط رشد فراهم می‌سازد. این اطلاعات همچنین می‌توانند در توسعه سیستم‌های زیست‌فناورانه برای تولید پایدار پیرترین‌ها مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۲. مسیر پیشنهادی بیوسنتز پیرترین‌ها در گیاه پیرتروم

Fig. 2. Proposed pathway of pyrethrin biosynthesis in the pyrethrum plant

این شکل، مسیر بیوسنتزی پیرترین‌ها که حاصل همگرایی مسیر ترپنوئیدی و مسیر اکسولپین/جاسمونات است، نشان داده شده است. در بخش ترپنوئیدی، پیش‌ساز ایزوپرنوئیدی DMAPP از طریق فعالیت آنزیم CDS به کریزانتیل دی‌فسفات و سپس به اسید کریزانتیمیک^۱ تبدیل می‌شود. به‌طور هم‌زمان، مسیر اکسولپین/جاسمونات منجر به تولید الکل‌های اختصاصی نظیر پیرترولون^۲ می‌گردد. در مرحله نهایی، از طریق واکنش استریفیکاسیون بین اسید کریزانتیمیک و الکل‌های حاصل از مسیر جاسمونات، ترکیبات نهایی پیرترین‌ها تشکیل می‌شوند. این مسیر بیانگر نقش کلیدی آنزیم‌ها و تنظیم‌کننده‌های وابسته به جاسمونات در کنترل تولید ترکیبات حشره‌کش طبیعی پیرتروم است.

روش‌های استخراج پیرترین‌ها از پیرتروم

کیفیت و بازده عصاره پیرتروم به‌شدت تحت تأثیر روش استخراج قرار دارد. انتخاب روش مناسب استخراج نقش

1. Chrysanthemic acid
2. Pyrethrolone

تعیین‌کننده‌ای در میزان بازیابی پیرترین‌ها، پایداری ترکیبات و ایمنی زیست‌محیطی فرایند ایفا می‌کند. به‌طور کلی، روش‌های استخراج پیرترین‌ها به دو دسته کلاسیک و نوین تقسیم می‌شوند (Fuard et al., 2025).

روش‌های استخراج کلاسیک

استخراج با حلال‌های آلی یکی از قدیمی‌ترین و متداول‌ترین روش‌های استخراج پیرترین‌ها است. در این روش‌ها معمولاً از حلال‌هایی نظیر هگزان، پترولیوم اتر، اتانول یا متانول استفاده می‌شود. مزیت اصلی این روش‌ها سادگی اجرا و هزینه نسبتاً پایین آن‌هاست، اما استفاده از حلال‌های آلی فرار و سمی، نگرانی‌های زیست‌محیطی و ایمنی را به همراه دارد (Casida and Durkin, 2013). روش سوکسله یکی از پرکاربردترین روش‌های کلاسیک برای استخراج پیرترین‌ها به‌شمار می‌رود. اگرچه این روش بازده استخراج بالایی دارد، اما به دلیل مصرف زیاد حلال، زمان طولانی و احتمال تخریب حرارتی برخی ترکیبات حساس، محدودیت‌هایی دارد (Grdiša et al., 2014).

روش‌های استخراج نوین و سبز

در سال‌های اخیر، توجه پژوهش‌ها به توسعه روش‌های استخراج نوین با مصرف کمتر حلال و سازگاری بیشتر با محیط زیست معطوف شده است. استخراج به کمک امواج فراصوت یکی از این روش‌هاست که با افزایش نفوذپذیری دیواره سلولی گیاه، موجب افزایش سرعت و بازده استخراج می‌شود (Chemat et al., 2017). استخراج با سیال فوق بحرانی، به‌ویژه با استفاده از دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی ($SC-CO_2$)، به‌عنوان یکی از پاک‌ترین و کارآمدترین روش‌های استخراج پیرترین‌ها شناخته می‌شود. این روش امکان استخراج انتخابی ترکیبات لیپوفیل را بدون باقی‌ماندن حلال‌های سمی فراهم می‌سازد و کیفیت بالایی از عصاره را ارائه می‌دهد، هرچند هزینه تجهیزات آن نسبتاً بالا است (Reverchon and De Marco, 2006). جدول ۲ مقایسه‌ای از متداول‌ترین روش‌های استخراج پیرترین‌ها از گل‌های پیرتروم را از نظر نوع حلال مصرفی، بازده استخراج، مدت زمان فرایند و مزایا و معایب هر روش ارائه می‌دهد. روش‌های کلاسیک نظیر سوکسله و خیساندن، علی‌رغم سادگی اجرا، معمولاً با مصرف زیاد حلال‌های آلی و زمان استخراج طولانی همراه هستند و ممکن است موجب تخریب حرارتی برخی ترکیبات حساس شوند. در مقابل، روش‌های نوین مانند استخراج به کمک امواج فراصوت و استخراج با دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی ($SC-CO_2$) به دلیل کاهش مصرف حلال، کوتاه شدن زمان استخراج و افزایش انتخاب‌پذیری، به‌عنوان گزینه‌های مناسب‌تر برای استخراج پایدار و صنعتی پیرترین‌ها مطرح شده‌اند. انتخاب روش استخراج مناسب به هدف کاربرد، مقیاس تولید و الزامات زیست‌محیطی بستگی دارد. روش‌های استخراج نوین در مقایسه با روش‌های کلاسیک، از نظر کارایی، زمان فرایند و سازگاری با محیط زیست برتری قابل توجهی دارند (Fuard et al., 2025; Chemat et al., 2017).

جدول ۲. مقایسه روش‌های مختلف استخراج پیرترین‌ها از پیرتروم

Table 2. Comparison of different methods for extracting pyrethrins from pyrethrum

Extraction Method	Solvent Type	Extraction Yield	Process Time	Advantages	Disadvantages
Soxhlet	Hexane, petroleum ether	High	Long	Simplicity, acceptable yield	High solvent consumption, thermal degradation
Soaking	Ethanol, methanol	Moderate	Long	Low cost	Low yield
Ultrasonics	Ethanol, water-ethanol	High	Short	Short time, lower solvent consumption	Requires precise condition control
Supercritical CO_2	CO_2	High	Moderate	Clean extract, high selectivity	High equipment cost

آنالیز پیرترین‌ها با کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)

آنالیز پیرترین‌ها با HPLC

به‌منظور کنترل کیفیت عصاره‌های پیرتروم و تعیین کمی دقیق پیرین‌ها، استفاده از روش‌های آنالیتیکی معتبر و تکرارپذیر ضروری است. در میان روش‌های موجود، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا به‌دلیل دقت، حساسیت و قابلیت تفکیک مناسب ترکیبات، به‌عنوان روش استاندارد برای آنالیز پیرترین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wang et al., 1997). در اغلب مطالعات، از ستون‌های معکوس فاز C18 برای جداسازی پیرترین‌ها استفاده شده است. انتخاب فاز متحرک مناسب، نقش مهمی در دستیابی به تفکیک مطلوب بین ایزومرهای ساختاری پیرترین‌ها دارد. معمولاً ترکیبی از استونیتریل و آب یا متانول و آب به‌صورت ایزوکراتیک یا گرادیانی به‌عنوان فاز متحرک به کار می‌رود. آشکارسازی پیرترین‌ها اغلب با استفاده از آشکارساز آرایه دیودی^۱ (DAD) در طول موج‌های بین ۲۲۰ تا ۲۳۰ نانومتر انجام می‌شود که بیشترین جذب این ترکیبات در این محدوده قرار دارد (Kouhestani et al., 2018). یکی از مزایای اصلی HPLC، امکان تعیین کمی هم‌زمان شش پیرترین اصلی در یک آنالیز واحد است. این ویژگی برای ارزیابی کیفیت عصاره‌های تجاری پیرتروم و مقایسه نمونه‌های حاصل از روش‌های استخراج مختلف اهمیت ویژه‌ای دارد. علاوه بر این، HPLC روشی نسبتاً ساده و اقتصادی برای کاربردهای روتین آزمایشگاهی محسوب می‌شود (Peruga et al., 2013).

جدول ۳. شرایط بهینه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا برای آنالیز پیرترین‌ها در پیرتروم

Table 3. Optimal high-performance liquid chromatography conditions for the analysis of pyrethrins in pyrethrum

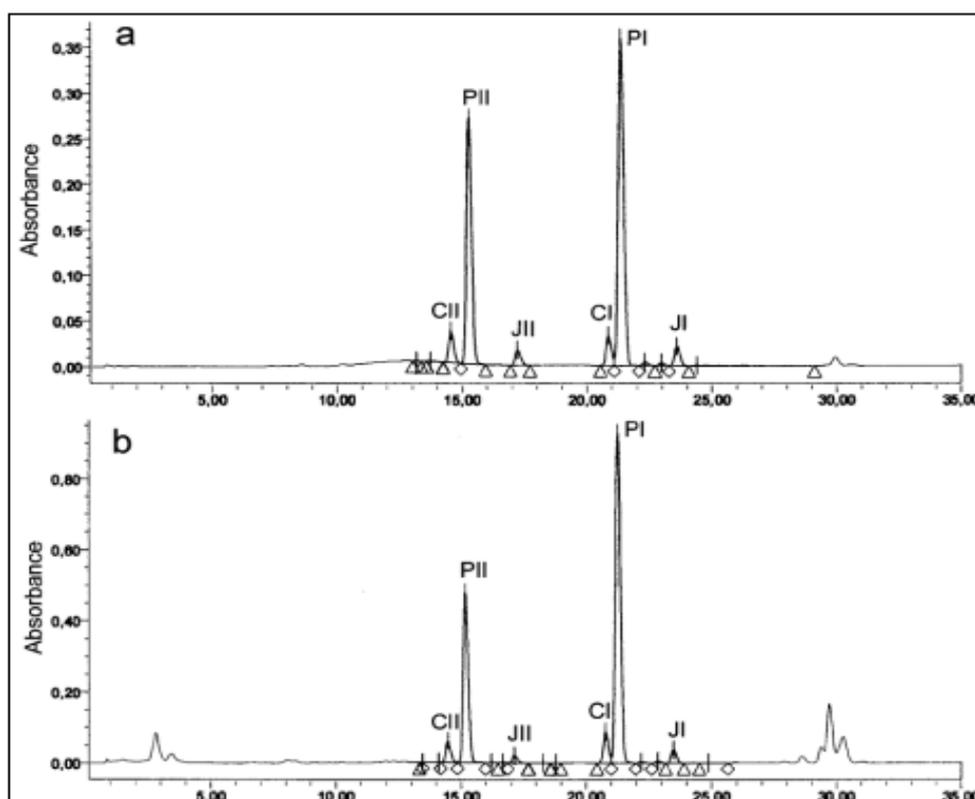
Parameter	Operating Conditions
Column	اندازه ذره ۵ میکرومتر (۴/۶ × ۲۵۰ mm) C18
Mobile phase	استونیتریل: آب (۲۰:۸۰، حجمی/حجمی)
Elution mode	Isocratic
Flow rate	1 ml/min
Column temperature	30 °C
Detector	DAD
Wavelength	225 nm
Injection volume	20 µl
Analysis time	15 min

این جدول شرایط عملیاتی پیشنهادی برای آنالیز پیرترین‌ها با استفاده از سیستم HPLC-DAD را نشان می‌دهد. استفاده از ستون معکوس فاز C18 و فاز متحرک استونیتریل-آب به‌صورت ایزوکراتیک، تفکیک مناسب شش پیرترین اصلی را در مدت زمان آنالیز نسبتاً کوتاه فراهم می‌کند. طول موج آشکارسازی ۲۲۵ نانومتر به‌دلیل بیشینه جذب پیرترین‌ها در این ناحیه انتخاب شده است. شرایط ارائه‌شده در این جدول بر اساس مطالعات معتبر بوده و برای کنترل کیفیت عصاره‌های پیرتروم و مقایسه نمونه‌های مختلف مناسب می‌باشد (Wang et al., 1997; Kouhestani et al., 2018). مقادیر زمان بازداری ممکن است بسته به نوع ستون، ترکیب فاز متحرک و شرایط دستگاه تغییرات جزئی داشته باشند (جدول ۴)(شکل ۲).

جدول ۴. زمان بازداری (RT) پیرترین‌ها در آنالیز HPLC-DAD

Table 4. Retention time (RT) of pyrethrins in HPLC-DAD

ترکیب	زمان بازداری (دقیقه)
Cinerin I	8.6 ± 0.1
Pyrethrin I	9.8 ± 0.2
Cinerin II	10.4 ± 0.2
Pyrethrin II	11.2 ± 0.3
Jasmolin I	12.1 ± 0.2
Jasmolin II	13.4 ± 0.3



شکل ۳. کروماتوگرام HPLC از مخلوط استاندارد پیرترین؛ (ب) کروماتوگرام HPLC از سر گل پیرتروم از باغ گیاه‌شناسی لیوبلیانا.

Fig. 3. HPLC chromatogram of standard pyrethrin mixture; (b) HPLC chromatogram of pyrethrum flower head from the Ljubljana Botanical Garden. (Ambrožič Dolinšek et al., 2007)

این جدول زمان بازداری شش پیرترین اصلی شامل پیرترین I و II، سینرین I و II و جاسمولین I و II را تحت شرایط کروماتوگرافی ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد. ترتیب خروج ترکیبات از ستون، بیانگر تفاوت در قطبیت و برهم‌کنش آن‌ها با فاز ساکن C18 است. تغییرات جزئی در زمان بازداری می‌تواند ناشی از تفاوت در نوع ستون، ترکیب فاز متحرک و شرایط دستگاه باشد. داده‌های ارائه شده مبنای مناسبی برای شناسایی ترکیبات و تطبیق پیک‌ها در کروماتوگرام‌های نمونه‌های واقعی پیرتروم فراهم می‌کنند (Wang et al., 1997; Peruga et al., 2013).

آنالیز پیرترین‌ها با LC-MS/MS

اگرچه روش HPLC-DAD برای تعیین کمی پیرترین‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد، اما در نمونه‌هایی با ماتریکس پیچیده (مانند مواد غذایی، خاک و نمونه‌های زیست‌محیطی)، حساسیت و گزینش‌پذیری این روش ممکن است محدود باشد. در چنین مواردی، استفاده از کروماتوگرافی مایع کوپل شده با طیف‌سنجی جرمی دوگانه (LC-MS/MS) به‌عنوان یک روش پیشرفته، امکان شناسایی و اندازه‌گیری دقیق پیرترین‌ها در غلظت‌های بسیار پایین را فراهم می‌کند (Peruga et al., 2013). روش LC-MS/MS با بهره‌گیری از یونیزاسیون الکتروپاشی در مد مثبت، قادر است یون‌های مادر پیرترین‌ها را تولید کرده و از طریق پایش واکنش‌های چندگانه، یون‌های فرزند اختصاصی هر ترکیب را آشکارسازی کند. این ویژگی موجب افزایش چشمگیر حساسیت و کاهش تداخلات ماتریکسی می‌شود و روش را برای پایش باقی‌مانده‌های پیرترین‌ها مطابق استانداردهای بین‌المللی مناسب می‌سازد (Hernandez et al., 2017). از دیگر مزایای LC-MS/MS می‌توان به کاهش حد تشخیص و حد کمی‌سازی اشاره کرد. در بسیاری از مطالعات، مقادیر حد تشخیص برای پیرترین‌ها در محدوده نانوگرم بر کیلوگرم گزارش شده است که این امر نقش مهمی در ارزیابی ایمنی مواد غذایی و انطباق با مقررات حداکثر باقیمانده دارد (European Commission, 2023).

جدول ۵- پارامترهای LC-MS/MS برای آنالیز پیرترین‌ها

Table 5 - LC-MS/MS parameters for pyrethrin analysis

ترکیب	یون مادر (m/z)	یون فرزند (m/z)	مد یونیزاسیون	حد تشخیص (ng/kg)	حد کمی‌سازی (ng/kg)
Pyrethrin I	329.2	161.1	ESI+	1.5	5
Pyrethrin II	373.2	183.1	ESI+	2.0	6
Cinerin I	317.2	161.1	ESI+	2.5	8
Cinerin II	361.2	183.1	ESI+	3.0	10
Jasmolin I	331.2	161.1	ESI+	2.8	9
Jasmolin II	375.2	183.1	ESI+	3.5	12

مقادیر حد تشخیص و حد کمی‌سازی بسته به نوع دستگاه، شرایط یونیزاسیون و آماده‌سازی نمونه ممکن است تغییر کنند. این جدول یون‌های مادر و یون‌های فرزند اختصاصی هر یک از پیرترین‌های اصلی را به‌همراه مد یونیزاسیون، حد تشخیص و حد کمی‌سازی گزارش می‌کند. استفاده از یونیزاسیون الکتروپاشی در مد مثبت و پایش واکنش‌های چندگانه موجب افزایش گزینش‌پذیری و حساسیت روش شده است. مقادیر پایین حد تشخیص و حد کمی‌سازی ارائه شده در جدول، توانمندی روش LC-MS/MS را برای شناسایی و اندازه‌گیری مقادیر بسیار کم پیرترین‌ها در ماتریکس‌های پیچیده نظیر

مواد غذایی و نمونه‌های زیست محیطی نشان می‌دهد. داده‌های این جدول مبنای مناسبی برای پایش باقی‌مانده‌های پیرتروم و انطباق با استانداردهای ایمنی بین‌المللی فراهم می‌کنند (Peruga et al., 2013; Hernandez et al., 2017; European Commission, 2023). عصاره پیرتروم ترکیبی از شش ترکیب حشره‌کش از سر گل‌های *Chrysanthemum ciner-ariaefolium* L است. از آنجایی که این ترکیبات سمیت کم تا متوسطی برای پستانداران دارند، می‌توانند به عنوان حشره‌کش‌های طبیعی در کشاورزی یا برای توسعه فرمولاسیون‌های پوستی کم‌هزینه و ایمن استفاده شوند. به دلیل ناپایداری حرارتی پیرترین‌ها، روش‌های تحلیلی مبتنی بر کروماتوگرافی مایع نسبت به روش‌های مبتنی بر کروماتوگرافی گازی ترجیح داده می‌شوند. چند کاربرد با استفاده از کروماتوگرافی مایع با تشخیص طیف‌سنجی جرمی در مقالات ارائه شده است. پروتکل‌های فعلی برای توصیف آنها توسط کروماتوگرافی مایع به استفاده از آشکارسازهای ساده‌تر مانند تشخیص UV متکی هستند. عصاره تجاری پیرتروم و نمونه‌های مختلفی از سرگل‌های *C. cinerariaefolium* L با استفاده از کروماتوگرافی نانومایع فاز معکوس متصل به یونیزاسیون الکترونی مستقیم - طیف‌سنجی جرمی^۱ بررسی شدند این تکنیک می‌تواند ابزاری مفید برای تشخیص پیرترین‌ها باشد. (Cappiello, A., et al., 2012).

کاربردهای کشاورزی، زیست‌محیطی و بهداشتی پیرتروم

کاربردهای پیرتروم

پیرتروم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حشره‌کش‌های گیاهی، کاربردهای گسترده‌ای در بخش‌های مختلف کشاورزی، بهداشت عمومی و حفاظت محیط زیست دارد. ویژگی‌هایی نظیر اثر ضربه‌ای سریع، سمیت پایین برای پستانداران و زیست‌تخریب‌پذیری بالا، موجب شده است که پیرتروم به‌عنوان جایگزینی مناسب برای بسیاری از حشره‌کش‌های شیمیایی سنتزی مطرح شود (Isman, 2020).

کاربردهای کشاورزی

در بخش کشاورزی، پیرتروم به‌طور گسترده برای کنترل طیف وسیعی از آفات مکنده و جونده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ترکیب طبیعی علیه شته‌ها، تریپس‌ها، سفیدبالک‌ها، سوسک‌ها و برخی لاروهای پروانه‌ای مؤثر است. پیرتروم به دلیل تجزیه سریع در نور و هوا، خطر باقی‌مانده طولانی‌مدت در محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهد و از این رو برای استفاده در سیستم‌های کشاورزی ارگانیک و تولید محصولات سالم مناسب است (Casida and Durkin, 2013). یکی دیگر از مزایای پیرتروم در کشاورزی، سازگاری آن با برنامه‌های مدیریت تلفیقی آفات است. این ترکیب می‌تواند در کنار روش‌های زراعی، کنترل بیولوژیک و سایر حشره‌کش‌های کم‌خطر به کار رود. با این حال، به دلیل اثرگذاری غیرانتخابی پیرتروم بر برخی حشرات مفید، زمان و نحوه کاربرد آن باید با دقت مدیریت شود (Isman, 2020).

کاربردهای بهداشت عمومی

پیرتروم نقش مهمی در کنترل ناقلین بیماری‌های انسانی ایفا می‌کند. این ترکیب در فرمولاسیون‌های مختلف برای کنترل پشه‌ها، مگس‌ها و سایر حشرات مزاحم در فضاهای مسکونی، بیمارستان‌ها و اماکن عمومی به کار می‌رود. اثر ضربه‌ای سریع پیرتروم موجب کاهش فوری جمعیت حشرات ناقل شده و خطر انتقال بیماری‌هایی نظیر مالاریا، دنگی و لیشمانیوز را کاهش می‌دهد (WHO, 2019). فرمولاسیون‌های مبتنی بر پیرتروم اغلب در اسپری‌های خانگی، قرص‌های دودزا و تله‌های حشرات استفاده می‌شوند. به دلیل منشأ طبیعی و سمیت نسبتاً پایین، این محصولات معمولاً از مقبولیت بالاتری در میان مصرف‌کنندگان برخوردارند، هرچند رعایت دستورالعمل‌های ایمنی همچنان ضروری است (Casida and Durkin, 2013).

ملاحظات زیست‌محیطی

از منظر زیست‌محیطی، پیرتروم نسبت به بسیاری از حشره‌کش‌های شیمیایی سنتزی اثرات منفی کمتری بر اکوسیستم‌ها دارد. این ترکیب به سرعت در محیط تجزیه شده و تجمع زیستی محدودی دارد. با این حال، پیرتروم برای برخی موجودات آبی به‌ویژه ماهی‌ها و بی‌مهرگان آبی سمی است و ورود آن به منابع آبی باید به‌طور جدی کنترل شود (Soderlund, 2012). در مجموع، کاربرد موفق پیرتروم مستلزم ایجاد تعادل بین اثربخشی کنترل آفات و حفاظت از موجودات غیرهدف است. توسعه فرمولاسیون‌های جدید با رهایش کنترل‌شده و افزایش گزینش‌پذیری می‌تواند نقش مهمی در بهبود ایمنی زیست‌محیطی پیرتروم ایفا کند.

سمیت، ایمنی مصرف و مقررات بین‌المللی پیرتروم

سمیت و ایمنی پیرتروم

ارزیابی سمیت و ایمنی حشره‌کش‌های گیاهی از جمله پیرتروم، نقش اساسی در تعیین دامنه کاربرد و پذیرش آن‌ها در کشاورزی و بهداشت عمومی دارد. به‌طور کلی، پیرتروم در مقایسه با بسیاری از حشره‌کش‌های سنتتیک، از سمیت حاد پایین‌تری برای پستانداران برخوردار است و به همین دلیل به‌عنوان یک حشره‌کش نسبتاً ایمن طبقه‌بندی می‌شود (Casida and Durkin, 2013). مطالعات سم‌شناسی نشان داده‌اند که پیرتروم‌ها به‌سرعت در بدن پستانداران متابولیزه و دفع می‌شوند و تجمع زیستی قابل توجهی ندارند. مکانیسم اصلی سمیت پیرتروم در حشرات، اختلال در عملکرد کانال‌های سدیمی وابسته به ولتاژ است، در حالی که این کانال‌ها در پستانداران حساسیت کمتری به پیرتروم‌ها نشان می‌دهند. این تفاوت فیزیولوژیک، یکی از دلایل اصلی انتخاب‌پذیری نسبی پیرتروم محسوب می‌شود (Soderlund, 2012). با این حال، تماس مستقیم با مقادیر بالای پیرتروم یا فرمولاسیون‌های غلیظ آن می‌تواند موجب بروز علائم تحریک پوستی، حساسیت‌های تنفسی و واکنش‌های آلرژیک در برخی افراد شود. به‌ویژه در افرادی که سابقه آسم یا حساسیت‌های تنفسی دارند، استنشاق ذرات آئروسل پیرتروم ممکن است مشکلات تنفسی ایجاد کند. از این رو، رعایت دستورالعمل‌های ایمنی در هنگام استفاده از محصولات حاوی پیرتروم ضروری است (WHO, 2019).

مقررات بین‌المللی و حدود مجاز باقی‌مانده (MRLs)

به‌منظور حفاظت از سلامت مصرف‌کنندگان، سازمان‌های بین‌المللی و نهادهای قانون‌گذار، حدود مجاز باقی‌مانده^۱ پیرتروم و پیرترین‌ها را در محصولات غذایی تعیین کرده‌اند. کمیسیون کدکس مواد غذایی^۲ و اتحادیه اروپا از جمله مراجع اصلی تدوین این استانداردها هستند (European Commission, 2023). بر اساس مقررات اتحادیه اروپا، حدود مجاز باقی‌مانده پیرترین‌ها بسته به نوع محصول کشاورزی متفاوت بوده و معمولاً در محدوده ۰/۰۵ تا ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. رعایت این حدود مستلزم استفاده از روش‌های آنالیتیکی حساس نظیر LC-MS/MS برای پایش دقیق باقی‌مانده‌ها در محصولات غذایی است. نتایج پایش‌ها نشان داده‌اند که در صورت کاربرد صحیح پیرتروم مطابق دستورالعمل‌های توصیه‌شده، سطح باقی‌مانده‌ها معمولاً پایین‌تر از حدود مجاز تعیین‌شده باقی می‌ماند (European Commission, 2023). سازمان بهداشت جهانی و سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد نیز از پیرتروم به‌عنوان یک حشره‌کش با خطر کم برای مصرف‌کنندگان حمایت کرده‌اند، مشروط بر آنکه اصول مصرف ایمن و مدیریت صحیح کاربرد رعایت شود. این رویکرد، نقش پیرتروم را در توسعه کشاورزی پایدار و کاهش وابستگی به حشره‌کش‌های پرخطر تقویت می‌کند (WHO, 2019).

1. Maximum Residue Limits, MRLs
2. Codex Alimentarius Commission

چالش‌ها، محدودیت‌ها و چشم‌اندازهای آینده پژوهش در پیرتروم

چالش‌ها و محدودیت‌های کاربرد پیرتروم

با وجود مزایای متعدد پیرتروم به‌عنوان یک حشره‌کش گیاهی مؤثر و سازگار با محیط زیست، استفاده گسترده از این ترکیب با چالش‌ها و محدودیت‌هایی همراه است که باید به‌طور علمی مورد توجه قرار گیرند. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های پیرتروم، پایداری پایین آن در شرایط محیطی است. پیرترین‌ها در برابر نور، اکسیژن و دمای بالا ناپایدار بوده و به‌سرعت تجزیه می‌شوند، که این امر می‌تواند موجب کاهش دوام اثر حشره‌کشی در مزرعه گردد (Soderlund, 2012). چالش دیگر، تنوع ترکیب شیمیایی عصاره‌های پیرتروم است که ناشی از تفاوت‌های ژنتیکی، شرایط اقلیمی، مرحله برداشت و روش استخراج می‌باشد. این تغییرپذیری می‌تواند منجر به نوسان در کارایی زیستی و کیفیت محصولات تجاری شود. از این رو، استانداردسازی فرایند تولید و کنترل کیفیت عصاره‌های پیرتروم با استفاده از روش‌های آنالیتیکی دقیق نظیر HPLC و LC-MS/MS از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Grdiša et al., 2013). علاوه بر این، اثر غیرانتخابی پیرتروم بر برخی حشرات مفید نظیر زنبورهای گرده‌افشان و دشمنان طبیعی آفات، یکی دیگر از محدودیت‌های کاربرد آن در کشاورزی است. اگرچه سمیت پیرتروم برای پستانداران پایین است، اما مدیریت زمان و روش کاربرد برای کاهش اثرات ناخواسته بر موجودات غیرهدف ضروری می‌باشد (Isman, 2020).

چشم‌اندازهای آینده پژوهش و توسعه

پژوهش‌های آینده در حوزه پیرتروم می‌توانند بر چند محور کلیدی متمرکز شوند. یکی از مهم‌ترین این محورها، بهبود پایداری و کارایی پیرتروم از طریق توسعه فرمولاسیون‌های نوین است. استفاده از فناوری‌های نانو، ریزکپسوله‌سازی و سامانه‌های رهایش کنترل‌شده می‌تواند موجب افزایش دوام اثر حشره‌کشی و کاهش مصرف ماده مؤثره شود (Kah et al., 2019). محور دیگر، اصلاح ژنتیکی و به‌نژادی پیرتروم با هدف افزایش تولید پیرترین‌ها و بهبود یکنواختی ترکیب شیمیایی است. شناسایی ژن‌های کلیدی دخیل در مسیر بیوسنتز پیرترین‌ها و استفاده از ابزارهای زیست‌فناوری می‌تواند به تولید ارقام پرمحصول و سازگار با شرایط محیطی مختلف منجر شود (Zeng et al., 2022). از منظر آنالیتیکی، توسعه روش‌های سریع‌تر، ارزان‌تر و دوستدار محیط زیست برای پایش پیرترین‌ها، به‌ویژه در چارچوب نظارت‌های قانونی، از اهمیت بالایی برخوردار است. ترکیب روش‌های استخراج سبز با تکنیک‌های پیشرفته آنالیز می‌تواند نقش مهمی در تضمین ایمنی و کیفیت محصولات مبتنی بر پیرتروم ایفا کند (Chemat et al., 2017). در نهایت، ادغام پیرتروم در راهبردهای مدیریت تلفیقی آفات و ارزیابی اثرات بلندمدت آن بر اکوسیستم‌ها، از جمله موضوعاتی است که نیازمند مطالعات میان‌رشته‌ای و بلندمدت می‌باشد. این رویکرد می‌تواند جایگاه پیرتروم را به‌عنوان یک ابزار کلیدی در کشاورزی پایدار و ایمن تثبیت کند.

نتیجه‌گیری

پیرتروم به‌عنوان یکی از مؤثرترین حشره‌کش‌های طبیعی، نقش ویژه‌ای در مدیریت تلفیقی آفات و کشاورزی پایدار دارد. شواهد علمی نشان می‌دهد که اثر حشره‌کشی این گیاه عمدتاً ناشی از حضور شش استر فعال موسوم به پیرترین‌ها است که ترکیب شیمیایی خاص و مکانیسم عمل انتخابی آن‌ها موجب سمیت بالا برای حشرات و سمیت نسبی پایین برای پستانداران می‌شود. این ویژگی‌ها، همراه با تجزیه‌پذیری سریع در محیط و کاهش اثرات زیست‌محیطی، پیرتروم را به جایگزینی مناسب برای حشره‌کش‌های سنتتیک پرخطر تبدیل کرده است. مسیرهای بیوسنتزی پیرترین‌ها، که حاصل همگرایی مسیر ترپنوئیدی و مسیر اسید جاسمونیک هستند، پیچیده و چندمرحله‌ای بوده و توسط آنزیم‌ها و فاکتورهای رونویسی مختلف به‌طور دقیق تنظیم می‌شوند. شناخت این مسیرها، امکان بهینه‌سازی تولید و افزایش غلظت پیرترین‌ها در گل‌های پیرتروم را فراهم کرده و فرصت‌های قابل توجهی برای بهبود روش‌های زراعی، اصلاح ژنتیکی و تولید صنعتی این

ترکیبات ایجاد می‌کند. روش‌های استخراج نوین، به‌ویژه استخراج با دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی و استخراج به کمک امواج فراصوت، در مقایسه با روش‌های کلاسیک، بازدهی بالاتر، مصرف کمتر حلال و اثرات زیست‌محیطی کمتر دارند. این تکنیک‌ها همراه با روش‌های آنالیز پیشرفته HPLC و LC-MS/MS امکان شناسایی و تعیین کمی دقیق شش پیرترین اصلی را فراهم می‌آورند و ابزار قدرتمندی برای کنترل کیفیت عصاره‌های تجاری و پایش باقی‌مانده‌های آن‌ها در محصولات کشاورزی ارائه می‌دهند.

References

- Camougis, G., & Davis, W. (1971). A comparative study of the neuropharmacological basis of action of pyrethrins. *Pyrethrum Post*, 11, 7–14.
- Cappiello, A., Tirillini, B., Famiglini, G., Trufelli, H., Termopoli, V., Flender, C., & others. (2012). Nano-liquid chromatography–direct electron ionization mass spectrometry for the analysis of pyrethrins. *Phytochemical Analysis*, 23(3), 191–196.
- Casida, J. E., & Durkin, K. A. (2013). Neuroactive insecticides: Targets, selectivity, resistance, and secondary effects. *Annual Review of Entomology*, 58, 99–117.
- Chemat, F., Vian, M. A., & Cravotto, G. (2017). Ultrasound-assisted extraction of food and natural products: Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560.
- Euro+Med. (2006). Euro+Med PlantBase – the information resource for Euro-Mediterranean plant diversity. Available at: <https://www.emplantbase.org/home.html>
- European Commission. (2023). EU Pesticides Database: Pyrethrins – Maximum Residue Levels (MRLs). European Commission.
- Fuard, F., Zarnigar, & Jamaldeen, F. N. (2025). A complete review of ethnopharmacology, pharmacology and phytochemistry of *Anacyclus pyrethrum* DC. *Traditional & Integrative Medicine*, 10(3). <http://doi.org/10.18502/tim.v10i3.19764>
- Grdiša M, Liber Z, Radosavljević I, Carović-Stanko K, Kolak I, et al. (2014) Genetic Diversity and Structure of Dalmatian Pyrethrum (*Tanacetum cinerariifolium* Trevir. /Sch./ Bip., Asteraceae) within the Balkan Refugium. *PLOS ONE* 9(8): e105265. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105265>
- Grdiša, M., Varga, F., Liber, Z., Turudić, A., & Šatović, Z. (2024). Local adaptation to the native environment affects pyrethrin variability in Dalmatian pyrethrum populations. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1404614. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1404614>
- Hernandez, F., Ibanez, M., & Sancho, J. V. (2017). Current use of high resolution mass spectrometry in the environmental sciences. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 409(3), 593–610.
- Hernández-Moreno, D., Soffers, A. E. M. F., Falke, H. E., Rietjens, I. M. C. M., & Murk, A. J. (2013). Consumer and farmer safety evaluation of application of botanical pesticides in black pepper crop protection. *Food and Chemical Toxicology*, 56, 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.01.033>

- Isman, M. B. (2020). Botanical insecticides in the twenty-first century. *Annual Review of Entomology*, 65, 233–249. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025010>
- Kah, M., Tufenkji, N., & White, J. C. (2019). Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature Nanotechnology*, 14(6), 532–540. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0439-5>.
- Kouhestani, F., Dayer, M. S., & Kamali, H. (2018). Reversed-phase Liquid Chromatographic Quantification of Pyrethrins in the Extract of Wild *Tanacetum parthenium* (Feverfew) from Northern Khorasan Province (Iran). *Journal of Medicinal plants and By-products*, 7(1), 99-104. <https://doi.org/10.22092/jmpb.2018.116740>
- Metwalian, S. A. (2001). Pesticides and their use. Iran University of Medical Sciences and Health Services.
- Nikolić, T. (2020). *Flora Croatica* (Vol. 2). Zagreb, Croatia: Alfa d.d.
- Oliveira, C. R., Garcia, T. D., Franco-Belussi, L., Salla, R. F., Souza, B. F. S., Melo, N. F. S., et al. (2019). Pyrethrum extract encapsulated in nanoparticles: Toxicity studies based on genotoxic and hematological effects in bullfrog tadpoles. *Environmental Pollution*, 253, 1009–1020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.037>
- Peruga, A., Riba, I., Yusà, V., & Mañes, J. (2013). Determination of pyrethrins in food samples by LC–MS/MS. *Food Chemistry*, 138, 110–116.
- Pillmore, R. E. (1973). Toxicity of pyrethrum to fish and wildlife. In J. Casida (Ed.), *Pyrethrum: The natural insecticide* (pp. 143–165). New York: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-162950-2.50014-4>
- Ramirez, A. M., Weston, D. J., Valdés, A. E., & Rios, A. F. (2012). Biosynthesis of pyrethrins in *Tanacetum cinerariifolium*. *The Plant Journal*, 70(2), 212–225.
- Reverchon, E., & De Marco, I. (2006). Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter. *Journal of Supercritical Fluids*, 38(2), 146–166. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.02.006>
- SciSpace
- Shrestha, S., Satyal, P., Pandit, G., & Setzer, W. N. (2014). Chemical composition of the essential oil from the aerial parts of *Chrysanthemum cinerariifolium* growing in Nepal. *American Journal of Essential Oils and Natural Products*, 2(2), 1–3.
- Soderlund, D. M. (2012). Molecular mechanisms of pyrethroid neurotoxicity. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 104(2), 107–114.
- Wang, I.H., Subramanian, V., Moorman, R., Burlison, J., & Ko, J. (1997). Direct determination of pyrethrins in pyrethrum extracts by reversed-phase high- performance liquid chromatography with diode- array detection. *Journal Chromatogr A.*, 766:277-281.
- WHO (World Health Organization). (2019). Safety of pyrethrins and pyrethroid pesticides.
- WHO. (2010). The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2009. Geneva, Switzerland: World Health Organization. Available at: https://www.who.int/ipcs/publications/pesticides_hazard/en/

Xu, H., Wang, Y., Li, T., Cai, Y., Yuan, H., & Xu, F. (2018). Coexpression analysis identifies key genes involved in pyrethrin biosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(24), E5909–E5918.

Yang, L., Norris, E. J., Jiang, S., Bernier, U. R., Linthicum, K. J., & Bloomquist, J. R. (2020). Reduced effectiveness of repellents in a pyrethroid-resistant strain of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) and its correlation with olfactory sensitivity. *Pest Management Science*, 76, 118–124. <https://doi.org/10.1002/ps.5562>

Zeng, T., Li, J. W., Xu, Z. Z., Zhou, L., Li, J. J., Yu, Q., Luo, J., Chan, Z. L., Jongsma, M. A., Hu, H., & Wang, C. Y. (2022). TcMYC2 regulates pyrethrin biosynthesis in *Tanacetum cinerariifolium*. *Horticulture Research*, 9, uhac178. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac178>