



رویکردی پایدار برای کنترل *Varroa destructor* در کلنی‌های زنبورعسل توسط روغن اسانس نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) به‌عنوان یک آفت‌کش گیاهی

محمدحسین پاکروح^{۱،۳}، محمدجواد سلیمی^{۲،*}

۱. مدیرمسئول پژوهشکده دانشجویی بین‌رشته‌ای دامپزشکی (ISRI-VetM)، مرکز رشد، معاونت پژوهشی، دانشگاه شهرکرد،

چهارمحال و بختیاری، ایران (mhpakrooh82@gmail.com)

۲. دانشجوی کارشناسی، گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران

(mohammad.j.salimy@gmail.com)

۳. دانشجوی دکتری حرفه‌ای دامپزشکی، دانشکده دامپزشکی دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران

خلاصه

این مقاله مروری رویکردی پایدار برای کنترل *Varroa destructor* در کلنی‌های زنبورعسل (*Apis mellifera*) با استفاده از روغن اسانس نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) به‌عنوان یک آفت‌کش گیاهی ارائه می‌دهد. این مقاله اثرات مخرب *V. destructor* بر سلامت فردی زنبورها، دینامیک کلنی و خدمات اکوسیستمی را تشریح می‌کند، همراه با محدودیت‌های آفت‌کش‌های شیمیایی سنتی مانند توسعه مقاومت و تجمع باقی‌مانده‌ها. ترکیب شیمیایی روغن اسانس نعناع فلفلی، که عمدتاً شامل مونوترپن‌هایی مانند منتول (تا ۴۵٪) و منتون (۱۸٪) است، از طریق تحلیل GC-MS بررسی شده و پتانسیل آکارسیدال آن از طریق مکانیسم‌های نوروتوکسیک، اثرات fumigant و selectivity بالا نسبت به کنه‌ها برجسته می‌شود. شواهد تجربی از مطالعات آزمایشگاهی و میدانی نرخ مرگ‌ومیر کنه‌ها تا ۸۱.۳٪ با سمیت کم برای زنبورها (>۶.۲٪) را نشان می‌دهد، هرچند کارایی به عوامل محیطی وابسته است. مزایا شامل سازگاری زیست‌محیطی، کاهش خطر مقاومت و ادغام در استراتژی‌های IPM است، درحالی‌که معایب شامل تغییرات ترکیبی، حساسیت به دما و نفوذ محدود به سلول‌های brood می‌شود. این مقاله روغن نعناع فلفلی را با جایگزین‌های شیمیایی و گیاهی دیگر مقایسه می‌کند، روش‌های کاربرد بهینه مانند fumigation و نوارهای ضد کنه را پیشنهاد می‌دهد، محدودیت‌های فعلی را شناسایی کرده و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده برای فرمولاسیون‌های بهبودیافته در زنبورداری پایدار را ارائه می‌نماید.

کلمات کلیدی: واروت، نعناع فلفلی، روغن‌ها، مواد فرار، کنه‌کش‌ها، آپیس

مقدمه

Varroa destructor، یک کنه انگلی خارجی، به‌عنوان یکی از تهدیدهای اصلی برای سلامت و بقای کلنی‌های زنبورعسل (*Apis mellifera*) شناخته می‌شود. این انگل، که از اواسط قرن بیستم در جمعیت‌های زنبورعسل گسترش یافته، با تغذیه از همولف زنبورها، منجر به تضعیف سیستم ایمنی میزبان و انتقال ویروس‌های بیماری‌زا مانند ویروس تغییر شکل بال (Deformed Wing Virus) و ویروس فلج حاد اسرائیلی (Israeli Acute Paralysis Virus) می‌گردد. در نتیجه، *Varroa destructor* infestation می‌تواند باعث کاهش تولید عسل، افزایش مرگ‌ومیر زنبورها و



در نهایت فروپاشی کلنی (Colony Collapse Disorder) شود، که این امر خسارات اقتصادی قابل توجهی به صنعت زنبورداری وارد می کند [۱،۲].

اثرات مخرب *Varroa destructor* نه تنها به سطح فردی زنبورها محدود می شود، بلکه بر دینامیک جمعیت کلنی تأثیر می گذارد. کنه ها ترجیحاً بر روی لاروها و شفیره ها تکثیر می شوند، که این امر منجر به کاهش نرخ تولد زنبورهای سالم و افزایش حساسیت کلنی به عوامل محیطی مانند سرما، کمبود غذا و آلودگی های دیگر می گردد. مطالعات اپیدمیولوژیک نشان می دهد که سطوح infestation بالای ۳-۵ کنه به ازای هر ۱۰۰ زنبور می تواند آستانه بحرانی برای بقای کلنی باشد، و بدون مداخله، نرخ مرگومیر کلنی ها می تواند تا ۹۰٪ افزایش یابد [۳]. علاوه بر این، این انگل نقش کلیدی در کاهش تنوع ژنتیکی جمعیت های وحشی زنبور عسل ایفا می کند، که این مسئله بر خدمات اکوسیستمی مانند گرده افشانی تأثیر منفی می گذارد. روش های سنتی کنترل *Varroa destructor* عمدتاً بر پایه استفاده از آفت کش های شیمیایی *синтети* کی مانند فلووترین، تائوفلووالینات و آمیتراز استوار بوده است. این ترکیبات، اگرچه در ابتدا مؤثر بوده اند، اما با چالش هایی مانند توسعه مقاومت ژنتیکی در جمعیت کنه ها، تجمع باقی مانده های سمی در موم و عسل، و اثرات جانبی بر سلامت زنبورها مواجه هستند. گزارش های متعدد از سازمان هایی مانند EFSA (European Food Safety Authority) نشان می دهد که استفاده مداوم از این مواد شیمیایی می تواند منجر به کاهش کیفیت محصولات زنبور عسل و تهدید سلامت مصرف کنندگان شود، که این امر ضرورت جستجوی جایگزین های پایدار و زیست سازگار را برجسته می سازد [۴].

رویکردهای پایدار برای کنترل آفات، به ویژه در کشاورزی ارگانیک و زنبورداری، بر استفاده از آفت کش های گیاهی تمرکز دارند که از منابع طبیعی مشتق شده و کمترین تأثیر را بر محیط زیست و غیر هدف ها دارند. روغن های اسانسی، به عنوان ترکیبات فرار گیاهی، به دلیل خواص ضد میکروبی، ضد قارچی و ضد آفتی خود، گزینه های امیدوارکننده ای برای مدیریت یکپارچه آفات (Integrated Pest Management) محسوب می شوند. این روغن ها، که از گیاهان خانواده هایی مانند *Lamiaceae* استخراج می شوند، می توانند از طریق مکانیسم های *fumigant*، *contact* و *repellent* عمل کنند، و در مقایسه با مواد شیمیایی، تجزیه پذیری بالاتری دارند و کمتر منجر به مقاومت می شوند [۵،۶].

روغن اسانسی نعنای فلفلی (*Mentha piperita*)، یکی از پرکاربردترین روغن های گیاهی، حاوی ترکیبات فعال اصلی مانند منتول (تا ۵۹٪)، منتون (تا ۱۹٪) و سینئول است که خواص *acaricidal* قوی علیه کنه ها نشان می دهند. این روغن، که از برگ های گیاه نعنای فلفلی به روش تقطیر با بخار آب استخراج می شود، در مطالعات متعدد به عنوان یک آفت کش طبیعی برای کنترل آفات کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. خواص آنتی اکسیدانی و ضد التهابی آن نیز می تواند به تقویت سلامت کلی کلنی های زنبور عسل کمک کند، در حالی که غلظت های مناسب آن حداقل اختلال را در رفتارهای طبیعی زنبورها ایجاد می کند.

مکانیسم عمل روغن اسانسی نعنای فلفلی علیه *Varroa destructor* عمدتاً بر پایه اختلال در سیستم عصبی کنه است، جایی که ترکیبات مونوترپنی آن با گیرنده های اکتوپامین، GABA و استیل کولین استراز تداخل ایجاد می کنند [۸]. این تداخل منجر به فلج، اختلال در تغذیه و در نهایت مرگ کنه می شود، در حالی که اثرات *fumigant* آن اجازه نفوذ به سلول های *brood* را می دهد. مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهد که این روغن از طریق تماس مستقیم یا بخار، می تواند چرخه تکثیر کنه را مختل کند، بدون اینکه تأثیر قابل توجهی بر متابولیسم زنبورها داشته باشد، که این امر آن را به گزینه ای *selective* تبدیل می کند [۹].

شواهد تجربی از مطالعات آزمایشگاهی و میدانی تأیید کننده کارایی روغن نعنای فلفلی است؛ برای مثال، در آزمایش های *fumigation*، نرخ مرگومیر کنه ها تا ۸۱.۳٪ پس از ۲۴ ساعت گزارش شده، در حالی که مرگومیر زنبورها کمتر از ۶.۲٪



بوده است. مقایسه با دیگر روغن‌ها مانند روغن میخک یا ریحان نشان می‌دهد که نفعان فلفلی نسبت selectivity بالاتری (تا ۹۶۵۱ پس از ۷۲ ساعت) نسبت به تیمول دارد، و در آزمایش‌های میدانی، کاربرد آن منجر به افزایش ۳۶۲ برابری افت کنه‌ها شده است. بااین‌حال، کارایی آن به عوامل محیطی مانند دما و رطوبت وابسته است، و فرمولاسیون‌های کپسوله‌شدن می‌تواند پایداری آن را افزایش دهد [۱۰].

اهداف این مقاله مروری عبارت‌اند از: بررسی جامع ادبیات موجود در مورد استفاده از روغن اسانس نفعان فلفلی به‌عنوان یک رویکرد پایدار برای کنترل Varroa destructor، ارزیابی کارایی و ایمنی این روغن در شرایط آزمایشگاهی و میدانی بر اساس مطالعات اخیر، تحلیل مکانیسم‌های بیولوژیکی و شیمیایی عمل آن علیه کنه، مقایسه آن با روش‌های شیمیایی و گیاهی دیگر برای برجسته‌سازی مزایای زیست‌محیطی، پیشنهاد روش‌های بهینه کاربرد و فرمولاسیون برای زنبورداران، شناسایی محدودیت‌های فعلی مانند تغییرات ترکیبات گیاهی و اثرات جانبی احتمالی، و ارائه پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده به‌منظور توسعه استراتژی‌های یکپارچه مدیریت آفات در زنبورداری پایدار.

ترکیبات ریز پایه اسانس نفعان فلفلی

اسانس نفعان فلفلی (*Mentha piperita*) از طریق روش‌های تحلیلی مانند کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) موردبررسی قرار گرفته و ترکیبات اصلی آن عمدتاً شامل مونوترپن‌های اکسیژنه و هیدروکربن‌های ترپنی است. این ترکیبات، که بیش از ۹۰٪ اسانس را تشکیل می‌دهند، از برگ‌های گیاه استخراج شده و بسته به شرایط ژنتیکی، محیطی و روش استخراج، درصدهای متغیری نشان می‌دهند. بر اساس مطالعات متعدد، مانند تحلیل‌های منتشرشده در مجلات Journal of Analytical Science and Technology و Heliyon، ۲۰ ترکیب اصلی شناسایی شده عبارت‌اند از منتول، منتون و غیره، که در جدول زیر بر اساس فراوانی نسبی متوسط (از منابع مختلف مانند، و) فهرست شده‌اند. این جدول بر پایه داده‌های GC-MS از نمونه‌های هیدرودیستیلسیون تهیه شده و درصدهای تقریبی را نشان می‌دهد، که می‌تواند برای ارزیابی پتانسیل آکارسیدال (ضد کنه‌ای) مفید باشد [۱۱، ۵۱].

ردیف	نام ترکیب (Compound Name)	فرمول شیمیایی (Formula)	فراوانی نسبی متوسط (%)
1	Menthol	C ₁₀ H ₂₀ O	۴۵.۰
2	Menthone	C ₁₀ H ₁₈ O	۱۸.۰
3	Menthofuran	C ₁₀ H ₁₄ O	۷.۵
4	1,8-Cineole [Eucalyptol]	C ₁₀ H ₁₈ O	۵.۵
5	Menthyl acetate	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	۴.۵
6	Isomenthone	C ₁₀ H ₁₈ O	۳.۵
7	Neomenthol	C ₁₀ H ₂₀ O	۲.۵
8	Limonene	C ₁₀ H ₁₆	۲.۰
9	β-Pinene	C ₁₀ H ₁₆	۱.۵
10	α-Pinene	C ₁₀ H ₁₆	۱.۰
11	Sabinene	C ₁₀ H ₁₆	۰.۸
12	Myrcene	C ₁₀ H ₁₆	۰.۷



۰.۶	C ₁₀ H ₁₈	Cis-carane	13
۰.۵	C ₁₀ H ₁₄ O	Carvone	14
۰.۴	C ₁₀ H ₁₆ O	Pulegone	15
۰.۳	C ₁₅ H ₂₄	Germacrene D	16
۰.۳	C ₁₅ H ₂₄	β-Caryophyllene	17
۰.۲	C ₁₀ H ₁₈ O	Linalool	18
۰.۲	C ₁₀ H ₁₈ O	Trans-sabinene hydrate	19
۰.۱	C ₁₀ H ₁₈ O	Terpinen-4-ol	20

ترکیبات اصلی اسانس نعنای فلفلی، به‌ویژه مونوترپن‌های اکسیژنه مانند منتول و منتون، ساختارهای حلقوی با گروه‌های هیدروکسیل یا کربونیل دارند که فراریت بالا و نفوذپذیری مناسبی به بافت‌های بیولوژیکی اعطا می‌کنند. منتول، به‌عنوان ترکیب غالب (تا ۴۵٪)، یک الکل مونوترپن است که با فرمول C₁₀H₂₀O، خواص خنک‌کننده و ضدالتهابی دارد و در مطالعات GC-MS به‌عنوان عامل اصلی بوی نعنایی شناسایی شده است. این ترکیبات از طریق بیوسنتز ترپنوئیدی در غدد ترشحی برگ‌ها تولید می‌شوند و تنوع آن‌ها به عوامل ژنتیکی و محیطی وابسته است، که این امر فرمولاسیون‌های پایدار برای کاربردهای آفت‌کشی را چالش‌برانگیز می‌سازد [۱۲].

منتون، ایزومر کتونی منتول، با فراوانی حدود ۱۸٪، نقش کلیدی در تعادل شیمیایی اسانس ایفا می‌کند و به‌عنوان پیش‌ماده بیوسنتزی منتول عمل می‌نماید. ساختار آن (C₁₀H₁₈O) اجازه می‌دهد تا به‌راحتی در غشاهای سلولی نفوذ کند و اختلالاتی در متابولیسم حشرات و کنه‌ها ایجاد نماید. بر اساس تحلیل‌های GC-MS در منابع مانند، منتون و منتول با هم بیش از ۶۰٪ اسانس را تشکیل می‌دهند، که این غلظت بالا پتانسیل سینرژیستیک برای اثرات بیولوژیکی، از جمله آکارسیدال، فراهم می‌آورد. باین‌حال، نوسانات فصلی در درصد این ترکیبات (تا ۱۰٪) می‌تواند کارایی کلی اسانس را تحت‌تأثیر قرار دهد [۴، ۱۳].

منتوفوران و ۱،۸-سینئول (اوکالیپتول) به‌عنوان ترکیبات اکسیژنه فرعی (۵-۷.۵٪)، ساختارهای هتروسیکلیک و اثر اکسیددار دارند که پایداری حرارتی بالاتری نسبت به الکل‌ها نشان می‌دهند. منتوفوران (C₁₀H₁₄O) یک فوران مشتق است که در مطالعات به‌عنوان عامل ضد میکروبی برجسته شده، در حالی که سینئول با خواص اکسپکتورانت، نفوذپذیری fumigant (بخارزا) را افزایش می‌دهد. این ترکیبات، هرچند در درصد پایین، می‌توانند به‌عنوان تقویت‌کننده‌های اثرات اصلی عمل کنند و در کنترل Varroa destructor، که نیاز به نفوذ به سلول‌های brood دارد، کاربردی باشند.

استرهای مانند منتیل استات (۴.۵٪) و ایزوترپین‌ها مانند لیمونن و پینن‌ها (۱-۲٪)، بخش هیدروفوبیک اسانس را تشکیل می‌دهند و فراریت اولیه را تضمین می‌کنند. منتیل استات (C₁₂H₂₂O₂)، مشتق استری منتول، بوی ملایم‌تری دارد و در GC-MS به‌عنوان مارکر کیفیت اسانس شناخته می‌شود. هیدروکربن‌های ترپنی مانند بتا-پینن و آلفا-پینن، با ساختارهای دویپوندی، خواص repellent (دافع) دارند و می‌توانند در دفع اولیه کنه‌ها مؤثر باشند، همان‌طور که در تحقیقات آکارسیدال اشاره شده است [۱۴].

ترکیبات سسکوئی‌ترپنی مانند ژرماکن D و بتا-کاروفیلین (۰.۳٪)، هرچند در مقادیر trace، تنوع بیولوژیکی اسانس را افزایش می‌دهند و خواص ضدالتهابی و آنتی‌اکسیدانی فراهم می‌آورند. این ترکیبات (C₁₅H₂₄) زنجیره‌های بلندتری دارند که پایداری طولانی‌مدت در محیط کلنی زنبورعسل را تضمین می‌کنند. در زمینه ضد کنه‌ای، آن‌ها می‌توانند به کاهش



استرس اکسیداتیو در زنبورها کمک کنند، بدون اینکه مستقیماً آکارسیدال باشند، و بر اساس، در استراتژی‌های یکپارچه مدیریت آفات نقش حمایتی ایفا نمایند [۱۵].

پتانسیل آکارسیدال این ترکیبات عمدتاً از طریق مکانیسم‌های عصبی-سمی ناشی می‌شود؛ برای مثال، منتول و منتون با تداخل در گیرنده‌های GABA و اکتوپامینرژیک در سیستم عصبی *Varroa destructor*، منجر به فلج و مرگ می‌گردند. مطالعات و نشان می‌دهد که اسانس نعنای فلفلی با نرخ کشندگی بالای ۷۰٪ علیه کنه‌های بالغ، selectivity مناسبی نسبت به زنبورها (کمتر از ۱۰٪ مرگومیر) دارد، که این امر به دلیل تفاوت در متابولیسم میزبان و انگل است. ترکیبات fumigant مانند سینثول نفوذ به brood cells را تسهیل می‌کنند [۱۶].

باوجود کارایی، محدودیت‌هایی مانند فرارپذیری بالا و حساسیت به دما (بهینه ۲۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد) وجود دارد، که می‌تواند اثرات ضد کنه‌ای را کاهش دهد. تحقیقات تأکید می‌کند که منتول به تنهایی می‌تواند *Varroa* را بدون آسیب به *Apis mellifera* کنترل کند، اما ترکیبات trace مانند کارون و پولوگون ممکن است اثرات جانبی تحریکی ایجاد کنند. در مجموع، این ترکیبات کاربردی هستند، اما نیاز به فرمولاسیون‌های نانو یا کپسوله‌شدن برای پایداری بیشتر در کلنی‌های زنبورعسل وجود دارد، همان‌طور که در بررسی‌های اخیر پیشنهاد شده است [۱۷، ۱۸].

مزایا و مضرات

روغن اسانسی نعنای فلفلی (*Mentha piperita*)، به‌عنوان یک آفت‌کش گیاهی طبیعی، گزینه‌ای پایدار برای کنترل *Varroa destructor* در کلنی‌های زنبورعسل ارائه می‌دهد که بر پایه ترکیبات فعال مانند منتول و منتون عمل می‌کند. این روغن از طریق مکانیسم‌های fumigant (بخارزا) و contact (تماس مستقیم) بر سیستم عصبی کنه تأثیر گذاشته و منجر به فلج و مرگ آن می‌شود، درحالی‌که اثرات جانبی کمتری نسبت به مواد شیمیایی سنتی دارد. مزایای اصلی آن شامل زیست‌سازگاری بالا، کاهش خطر مقاومت کنه‌ها و حفظ کیفیت محصولات زنبورعسل است، اما معایبی مانند کارایی متغیر و نیاز به کاربرد دقیق نیز وجود دارد. در ادامه، مزایا و مضرات آن به‌صورت جامع بررسی می‌شود، با تمرکز بر روش‌های مختلف کاربرد از جمله نوارهای ضد کنه داخل کندو، و مقایسه با دیگر آفت‌کش‌ها.

یکی از مزایای کلیدی روغن نعنای فلفلی، ایمنی نسبی آن برای زنبورهای عسل است؛ مطالعات نشان می‌دهد که در دوزهای آزمایشگاهی (مانند ۵-۱۵٪)، نرخ مرگومیر زنبورها کمتر از ۱۰٪ است، درحالی‌که نرخ کشندگی کنه‌ها تا ۶۵٪ می‌رسد. این selectivity بالا به دلیل تفاوت در متابولیسم میزبان و انگل است و روغن می‌تواند بدون اختلال قابل توجه در رفتارهای طبیعی زنبورها، مانند جستجوی غذا یا گرده‌افشانی، عمل کند. علاوه بر این، خواص ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی آن می‌تواند به تقویت سیستم ایمنی کلنی کمک کند و از شیوع بیماری‌های ثانویه مانند ویروس‌ها جلوگیری نماید، که این امر آن را به گزینه‌ای مناسب برای مدیریت یکپارچه آفات (IPM) تبدیل می‌کند [۱۹].

از منظر زیست‌محیطی، روغن نعنای فلفلی مزیت بزرگی نسبت به آفت‌کش‌های شیمیایی مانند فلوپترین یا آمیتراز دارد، زیرا تجزیه‌پذیر است و باقی‌مانده سمی در عسل، موم یا محیط باقی نمی‌گذارد، که این امر کیفیت محصولات را حفظ کرده و سلامت مصرف‌کنندگان را تضمین می‌کند. همچنین، استفاده از آن مقاومت ژنتیکی کمتری در جمعیت کنه‌ها ایجاد می‌کند، برخلاف مواد شیمیایی که پس از چند سال کارایی خود را از دست می‌دهند. در روش‌های کاربرد مانند fumigation (بخاردهی داخل کندو)، روغن می‌تواند به‌سرعت نفوذ کند و کنه‌های phoretic (روی زنبورهای بالغ) را کنترل نماید، که این روش ساده و کم‌هزینه است و می‌تواند در مقیاس کوچک برای زنبورداران ارگانیک مفید باشد [۲۰].



در مورد کاربرد به صورت نوارهای ضد کنه داخل کندو، این روش مزیت پایداری طولانی مدت دارد؛ نوارهای آغشته به روغن نعناع فلفلی می توانند به تدریج بخار آزاد کنند و کنترل مداوم (تا چند هفته) را فراهم آورند، بدون نیاز به مداخله مکرر زنبوردار. مطالعات میدانی نشان می دهد که این نوارها می توانند نرخ افت کنه ها را تا ۵۰-۸۰٪ افزایش دهند، به ویژه در ترکیب با روغن های دیگر مانند تیمول، و نسبت به نوارهای شیمیایی مانند Apistan کمتر اثرات جانبی بر جمعیت زنبورها دارند. این رویکرد همچنین هزینه کمتری دارد و می تواند بخشی از استراتژی چرخشی برای جلوگیری از مقاومت باشد، که مزیت اقتصادی برای زنبورداران کوچک فراهم می کند.

با وجود مزایا، معایب روغن نعناع فلفلی شامل کارایی متغیر آن است؛ اثربخشی به عوامل محیطی مانند دما (بهینه ۲۰-۳۰ درجه سانتی گراد) و رطوبت وابسته است و در شرایط سرد یا مرطوب، نرخ کشندگی کاهش می یابد. علاوه بر این، روغن نمی تواند به سلول های brood (لاروی) نفوذ کند و فقط کنه های بالغ را هدف قرار می دهد، که این امر نیاز به کاربرد مکرر یا ترکیب با روش های دیگر مانند اسید اگزالیک را ایجاد می کند، برخلاف برخی مواد شیمیایی که چرخه تکثیر را کاملاً مختل می کنند. در غلظت های بالا، بوی قوی آن می تواند زنبورها را تحریک کرده و منجر به ترک کلنی یا کاهش فعالیت شود، که این مسئله در روش های spray مستقیم بیشتر مشاهده می شود [۲۱].

یکی دیگر از مضرات، عدم استانداردسازی ترکیبات است؛ درصد منتول و دیگر اجزا بسته به منبع گیاهی متغیر است، که می تواند نتایج ناهماهنگی در آزمایش های میدانی ایجاد کند و نیاز به فرمولاسیون های پیشرفته مانند نانوکپسوله سازی دارد تا پایداری افزایش یابد. در مقایسه با دیگر آفت کش های گیاهی مانند تیمول (از گیاه آویشن)، روغن نعناع فلفلی کمتر مؤثر است و در برخی مطالعات، هیچ تفاوتی با گروه کنترل نشان نداده، در حالی که تیمول نرخ کشندگی بالاتری (تا ۹۰٪) دارد؛ اما ممکن است طعم عسل را تغییر دهد. نسبت به مواد شیمیایی سخت مانند آمیتراز، روغن نعناع فلفلی کندتر عمل می کند و برای infestation شدید مناسب نیست، اما در infestation پایین، گزینه پایداری است.

در نهایت، استفاده از روغن نعناع فلفلی در اشکال مختلف مانند spray (برای تماس مستقیم، با مزیت پوشش سریع اما معایب تحریک زنبورها)، fumigation (برای نفوذ عمیق، با مزیت کم تماس اما وابستگی به دما) و نوارها (برای رهش کنترل شده، با مزیت دوام اما معایب نیاز به فرمولاسیون دقیق) باید بر اساس شرایط کلنی انتخاب شود. مقایسه کلی نشان می دهد که این روغن نسبت به شیمیایی ها ایمن تر و پایدارتر است، اما برای حداکثر کارایی، باید در ترکیب با روش های IPM مانند غربالگری brood یا چرخش با اسیدهای ارگانیک استفاده شود، تا معایب آن جبران گردد و مزایای زیست محیطی آن برجسته شود. [۲۲]

نتیجه گیری

در نتیجه، روغن اسانسی نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) به عنوان یک آفت کش گیاهی، پتانسیل قابل توجهی برای کنترل پایدار *Varroa destructor* در کلنی های زنبور عسل نشان می دهد، با تمرکز بر ترکیبات فعال مانند منتول و منتون که مکانیسم های آکارسیدال مؤثری از طریق اختلال عصبی و اثرات fumigant ارائه می دهند. این رویکرد نه تنها selectivity بالایی نسبت به زنبورهای میزبان دارد و اثرات جانبی کمتری نسبت به مواد شیمیایی سنتی ایجاد می کند، بلکه با اصول مدیریت یکپارچه آفات (IPM) همخوانی دارد و می تواند مقاومت ژنتیکی کنه ها را کاهش دهد. با این حال، چالش هایی مانند کارایی متغیر وابسته به عوامل محیطی، عدم استانداردسازی ترکیبات و نیاز به فرمولاسیون های پیشرفته مانند نانوکپسوله سازی، ضرورت تحقیقات بیشتر را برای بهینه سازی کاربردهای عملی برجسته می سازد.

در نهایت، ادغام روغن نعناع فلفلی در استراتژی های چرخشی کنترل آفات، همراه با روش هایی مانند نوارهای آغشته داخل کندو یا fumigation، می تواند به حفظ سلامت کلنی ها و کیفیت محصولات زنبور عسل کمک کند، در حالی که مزایای



زیست محیطی آن مانند تجزیه پذیری و عدم باقی مانده سمی، آن را به گزینه‌ای برتر برای زنبورداری ارگانیک تبدیل می‌نماید. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر ارزیابی بلندمدت اثرات در شرایط میدانی متنوع، توسعه فرمولاسیون‌های پایدار و مقایسه با سایر گیاهان خانواده Lamiaceae تمرکز کند تا راهکارهای جامع‌تری برای مقابله با تهدیدهای جهانی مانند فروپاشی کلنی ارائه شود.

مراجع:

1. Bava, R., Castagna, F., Palma, E., Marrelli, M., Conforti, F., Musolino, V., ... & Musella, V. [2023]. Essential oils for a sustainable control of honeybee varroosis. *Veterinary Sciences*, 10[5], 308.
2. Ntalli, N. G., Spochacz, M., & Adamski, Z. [2022]. The role of botanical treatments used in apiculture to control arthropod pests. *Apidologie*, 53[2], 27.
3. Topal, E., Cıpcıgan, M. C., Tunca, R. İ., Kösoğlu, M., & Mărgăoan, R. [2020]. The use of medicinal aromatic plants against bee diseases and pests. *Bee Studies*, 12[1], 5-11.
4. Bava, R., Castagna, F., Lupia, C., Ruga, S., Conforti, F., Marrelli, M., ... & Palma, E. [2023]. Phytochemical Composition and Pharmacological Efficacy Evaluation of Calamintha nepeta, Calamintha sylvatica, Lavandula austroapennina and Mentha piperita Essential Oils for the Control of Honeybee [Apis mellifera] Varroosis. *Animals*, 14[1], 69.
5. Kadoglidou, K. I., & Chatzopoulou, P. [2023]. Approaches and applications of mentha species in sustainable agriculture. *Sustainability*, 15[6], 5245.
6. Ntalli, N. G., Samara, M., Stathakis, T., Barda, M., Kapaxidi, E., Manea-Karga, E., ... & Karamaouna, F. [2025]. The Acaricidal Activity of Essential Oil Vapors and Its Effect on the Varroa Mite Varroa destructor. *Agriculture*, 15[13], 1379.
7. Gostin, I. N., & Popescu, I. E. [2023]. Evaluation of the essential oils used in the production of biopesticides: assessing their toxicity toward both arthropod target species and beneficial pollinators. *Agriculture*, 14[1], 81.
8. Bava, R., Castagna, F., Lupia, C., Ruga, S., Musella, V., Conforti, F., ... & Palma, E. [2023]. Chemical profile of essential oils of selected Lamiaceae plants and in vitro activity for varroosis control in honeybees [Apis mellifera]. *Veterinary Sciences*, 10[12], 701.
9. Ruffinengo, S. R., Maggi, M. D., Marcangeli, J. A., Eguaras, M. J., Principal, J., Barrios, C., ... & Giullia, M. [2014]. Integrated Pest Management to control Varroa destructor and its implications to Apis mellifera colonies. *Zootecnia Tropical*, 32[2], 149-168.
10. Shah, A. H., Saeed, A., Khan, S., Shah, A. H., Shah, J. U., & Shah, A. H. [2025]. Miticidal Efficacy of Selected Plants and Animals Products Against Varroa destructor of Apis dorsata. *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*, 1-13.
11. Dar, S. A., Mahdi, S. S., Al Galil, F. M. A., Mir, S. H., Jan, R., & Sultan, R. M. S. [2022]. Role of botanicals in integrated pest management for sustained crop production.



9th National Conference on

Innovation in Agriculture, Animal Sciences and Veterinary Medicine

نهمین کنفرانس ملی
نوآوری در کشاورزی،
علوم دامی و دامپزشکی

- In *Secondary Agriculture: Sustainability and Livelihood in India* [pp. 147-168]. Cham: Springer International Publishing.
12. Said-Al Ahl, H. A., Hikal, W. M., & Tkachenko, K. G. [2017]. Essential oils with potential as insecticidal agents: A review. *Int. J. Environ. Plan. Manag.*, 3[4], 23-33.
 13. Koul, O., Walia, S., & Dhaliwal, G. S. [2008]. Essential oils as green pesticides: potential and constraints. *Biopestic. Int.*, 4[1], 63-84.
 14. Štrbac, F., Krnjajić, S., Stojanović, D., Ratajac, R., Simin, N., Orčić, D., ... & Bosco, A. [2023]. In vitro and in vivo anthelmintic efficacy of peppermint [*Mentha x piperita* L.] essential oil against gastrointestinal nematodes of sheep. *Frontiers in veterinary science*, 10, 1232570.
 15. McKay, D. L., & Blumberg, J. B. [2006]. A review of the bioactivity and potential health benefits of peppermint tea [*Mentha piperita* L.]. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 20[8], 619-633.
 16. Modafferi, A., Giunti, G., Urbaneja, A., Laudani, F., Latella, I., Pérez-Hedo, M., ... & Campolo, O. [2025]. High-energy emulsification of *Allium sativum* essential oil boosts insecticidal activity against *Planococcus citri* with no risk to honeybees. *Journal of Pest Science*, 98[1], 337-348.
 17. Su, X. L., Huang, Z. C., Chen, L., Chen, D. Y., Zhao, D. X., & Zeng, Z. J. [2024]. Active components of 16 essential oils and their fumigation effects on *Galleria mellonella* [Lepidoptera: Pyralidae]. *Insects*, 15[12], 977.
 18. Dodia, D. A., Patel, I. S., & Patel, G. M. [2010]. *Botanical pesticides for pest management*. Scientific Publishers.
 19. Regnault-Roger, C., Hemetsberger, S., & Buchbauer, G. [2020]. Use of essential oils in agriculture. In *Handbook of essential oils* [pp. 873-917]. CRC Press.
 20. Wiles, D., Pearson, J. S., & Beddoe, T. [2025]. Harnessing plant-derived terpenoids for novel approaches in combating bacterial and parasite infections in veterinary and agricultural settings. *Current Microbiology*, 82[4], 134.
 21. Ukoroije, R. B., & Otoyor, R. A. [2020]. Review on the bio-insecticidal properties of some plant secondary metabolites: types, formulations, modes of action, advantages and limitations. *Asian Journal of Research in Zoology*, 3[4], 27-60.
 22. Hummelbrunner, L. A. [2000]. *Acute, sublethal and synergistic effects of some essential oil constituents against the Asian armyworm, *spodoptera litura* [lepidoptera: noctuidae]* [Doctoral dissertation, University of British Columbia].