

مقاله تحقیقی

اثر زیرکشنده آفت کش های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید روی واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید *Diaeretiella rapae* نسبت به شته مومی کلم، *Brevicoryne brassicae*

مریم فروزان^۱، فرناز سیدی صاحباری^۲، حسین لطفعلی زاده^۳، آزاده جراحی^۴

۱، ۴- استادیار، محقق، بخش تحقیقات گیاه پزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران.

۲، ۳- استادیار، استاد، بخش تحقیقات گیاه پزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران.

مسئول مکاتبات: مریم فروزان، ایمیل: m.forouzan@areeo.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

۶۵-۷۹ (۲) ۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

چکیده

شته مومی کلم، *Brevicoryne brassicae* یکی از آفات مهم خانواده چلیپانیان است که کنترل شیمیایی به عنوان یکی از رایج ترین روش های مدیریت آن به شمار می رود. با این حال، استفاده از این ترکیبات، به دلیل اثرات نامطلوب بر دشمنان طبیعی، نیازمند ارزیابی دقیق در برنامه های مدیریت تلفیقی آفات (IPM) است. زنبور پارازیتوئید *Diaeretiella rapae* در بسیاری از مناطق جهان به عنوان عامل مهم در کنترل بیولوژیک شته مومی کلم شناخته می شود. در این تحقیق، به منظور ارزیابی سازگاری آفت کش های مورد استفاده، اثر زیرکشنده آفت کش های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید بر واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید *D. rapae* نسبت به تراکم های مختلف پوره های سن سوم شته مومی کلم بررسی شد. برای تشکیل کلونی زنبور پارازیتوئید، شته های مومیایی شده از مزرعه کلم در شهرستان ارومیه جمع آوری و در اتاق رشد، درون ظرف های کوچک (۲۰ میلی لیتر) دارای تهویه قرار داده شدند. کلیه مراحل پرورش و آزمایش ها در دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس، رطوبت نسبی 60 ± 5 درصد و دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی انجام شد. غلظت زیرکشنده حشره کش ها با استفاده از روش پاشش مستقیم در مطالعات زیست سنجی تعیین شد (LC_{25} : فلونیکامید = ۰/۹۹۷ پی پی ام و ایمیداکلوپراید = ۵/۶۱۲ پی پی ام). در آزمایش واکنش تابعی، تراکم های مختلف پوره به مدت ۲۴ ساعت در اختیار یک زنبور ماده (≥ 24 ساعت) قرار گرفت و پوره ها تا زمان مومیایی شدن و تعیین میزان پارازیتسم نگهداری شدند. نتایج نشان داد واکنش تابعی زنبور *D. rapae* در شاهد و تیمار فلونیکامید از نوع دوم و در تیمار ایمیداکلوپراید از نوع سوم بود. پراسنجه های قدرت جستجو (a) و زمان دستیابی (Th) تحت تأثیر تیمارهای حشره کش قرار گرفتند؛ فلونیکامید تأثیر معنی داری بر قدرت جستجوی زنبور پارازیتوئید (۰/۰۴۵۶ بر ساعت) نداشت، اما ایمیداکلوپراید قدرت جستجوی زنبور (۰/۰۳۷۵ بر ساعت) را به طور قابل توجهی کاهش داد. همچنین، زمان دستیابی در هر دو تیمار به طور معنی داری افزایش یافت. بیشینه نرخ پارازیتسم نیز برای زنبور *D. rapae* در تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید به ترتیب برابر با ۱۶/۲۴ و ۹/۴۴ عدد پوره شته بدست آمد. بنابراین فلونیکامید نسبت به ایمیداکلوپراید سازگاری بالاتری با زنبور *D. rapae* داشته و می تواند در برنامه های مدیریت تلفیقی شته مومی کلم به کار رود. با این حال، نیاز به بررسی اثرات این حشره کش ها بر پراسنجه های جدول زندگی و سایر خصوصیات رفتاری زنبور در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه ای ضروری است.

واژه های کلیدی: شته مومی کلم، واکنش تابعی، *Diaeretiella rapae*، مدیریت تلفیقی آفات

مقدمه

شته مومی کلم، (*Brevicoryne brassicae* (L.) (Hem.: Aphididae) یکی از آفات مهم و اقتصادی محصولات خانواده چلیپائیان (Brassicaceae) است که علاوه بر کاهش کمی و کیفی محصول، نقش مهمی در انتقال عوامل بیماری‌زا داشته و در صورت عدم مدیریت صحیح می‌تواند به طغیان جمعیتی منجر شود (Mahmoodi *et al.*, 2020; Ali *et al.*, 2024; Slavíková *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2025). کنترل شیمیایی با استفاده از آفت کش‌های تماسی و سیستمیک یکی از رایج‌ترین روش‌های مدیریت شته‌ها به‌شمار می‌رود (Guo *et al.*, 2013; Kaleem Ullah *et al.*, 2023). با این حال، مصرف بی‌رویه این ترکیبات منجر به بروز مقاومت در جمعیت آفات، اثرات نامطلوب روی دشمنان طبیعی، کاهش تنوع زیستی و خطرات زیست‌محیطی شده است (Schmidt-Jeffris *et al.*, 2021; Siddiqui *et al.*, 2023; Akhter *et al.*, 2024). از این رو، در برنامه‌های مدیریت تلفیقی آفات (IPM) تأکید زیادی بر هماهنگی کنترل شیمیایی با کنترل بیولوژیک شده است تا هم کارایی کنترل حفظ شود و هم تأثیرهای نامطلوب بر سیستم‌های اکولوژیکی کاهش یابد (Zhou *et al.*, 2024). یکی از مهم‌ترین دشمنان طبیعی شته‌ها، زنبور پارازیتوئید (*Diaeretiella rapae* (M'Intosh) (Hymenoptera: Braconidae) است که در بسیاری از مناطق جهان برای کنترل بیولوژیک شته‌های آفت خانواده چلیپائیان مانند شته مومی کلم مورد استفاده می‌شود (Nisar *et al.*, 2021; Rizvi, 2021; Soni & Kumar, 2021a,b). مطالعات نشان داده‌اند که زنبور *D. rapae* در تراکم‌های مختلف می‌تواند پارازیته کردن را انجام دهد و در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای نقش مهمی در کاهش جمعیت شته‌ها ایفا کند (Abd El-Kareim *et al.*, 2024). رفتار پارازیتوئیدها در مواجهه با میزبان‌ها، به‌خصوص روابط بین تراکم میزبان و تعداد میزبان‌های پارازیته‌شده، از طریق مفهوم واکنش تابعی (Functional response) بررسی می‌شود (Núñez-Campero *et al.*, 2025). واکنش تابعی نشان‌دهنده رابطه‌ی بین تراکم طعمه/میزبان و تعداد

طعمه‌هایی است که یک دشمن طبیعی در واحد زمان می‌تواند پارازیته کند و پراسنجه‌های آن مانند نرخ حمله (Attack rate) و زمان دستیابی به میزبان (Handling time) نقش کلیدی در تبیین کارایی کنترل بیولوژیک دارند (Tomasetto *et al.*, 2018; Islam *et al.*, 2021). نوع واکنش تابعی (نوع I (رابطه خطی افزایشی)، II (منحنی کاهشی) یا نوع III (منحنی سیگموئیدی)) می‌تواند نشان‌دهنده پتانسیل پارازیتوئید برای تنظیم جمعیت میزبان در شرایط مختلف باشد (Fernández-Arhex & Corley, 2003; Pervez & Omkar, 2005).

در بسیاری از بررسی‌های آزمایشگاهی، زنبور *D. rapae* نسبت به میزبان‌های مختلف، واکنش تابعی نوع II را نشان داده است (Bernal *et al.*, 1994; Fathipour *et al.*, 2004, 2006; Tazerouni *et al.*, 2011, 2012; Moayeri *et al.*, 2013; Soni & Kumar, 2021a; Talebi *et al.*, 2021; Abd El-Kareim *et al.*, 2024). به این معنا که با افزایش تراکم میزبان، نرخ پارازیته کردن افزایش می‌یابد. اما در نهایت به دلیل محدودیت در زمان دستیابی به میزبان، منحنی به حالت اشباع نزدیک می‌شود (Holling, 1959). همچنین، دما و ویژگی‌های میزبان مانند گونه‌ی گیاهی یا مرحله‌ی رشدی می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر پراسنجه‌های واکنش تابعی تأثیر بگذارند، حتی اگر نوع کلی واکنش تابعی ثابت بماند (Messina & Hanks, 1998; Fathipour *et al.*, 2006). علاوه بر عوامل زیست‌محیطی و میزبان، آفت کش‌ها هم می‌توانند بر رفتار و عملکرد پارازیتوئیدها تأثیر بگذارند (Theenoor *et al.*, 2024). تأثیر آفت کش‌ها بر دشمنان طبیعی را می‌توان در دو دسته اثر کشنده و زیرکشنده تقسیم کرد (Teder & Knapp, 2019). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که برخی آفت کش‌ها، حتی در غلظت‌های زیرکشنده، می‌توانند موجب کاهش نرخ حمله، افزایش زمان دستیابی به میزبان، کاهش توانایی جست‌وجو یا حتی اختلال در فراوانی و نسل‌های بعدی پارازیتوئیدها شوند (Teder & Knapp, 2019; Agathokleous *et al.*, 2023). به‌ویژه ترکیبات شبه‌نیکوتینی مانند ایمیداکلوپراید، در بسیاری از تحقیقات

پارازیتوئید *A. matricariae* نسبت به تراکم‌های مختلف پوره سن سوم شته سیاه باقلا *Aphis fabae* Scopoli مطالعه کرد. نتایج نشان داد واکنش تابعی در شاهد و تیمار حشره‌کش‌ها از نوع دوم بود (Amini Jam, 2022). آفت‌کش‌های انتخابی و سازگار با حشرات مفید مانند فلونیکامید در برخی مطالعات اثرات حاد کمتری بر پارازیتوئیدها از خود نشان داده‌اند، اگرچه داده‌های جامع در مورد اثرات رفتاری و زیرکشنده آن‌ها همچنان در حال گسترش است (Radrigán-Navarro & Fuentes-Contreras, 2024; Knapp et al., 2025). بررسی این اثرات برای انتخاب آفت‌کش‌هایی که در عین کنترل مؤثر شته‌ها، کمترین اثر منفی را بر دشمنان طبیعی بگذارند، در برنامه‌های مدیریت تلفیقی آفات (IPM) بسیار مهم است (Desneux et al., 2007; Teder & Knapp, 2019).

با توجه به اهمیت سازگاری آفت‌کش‌ها با دشمنان طبیعی در مدیریت تلفیقی آفات و نقش کلیدی پارازیتوئیدها در کنترل شته‌ها، ارزیابی اثر دو آفت‌کش فلونیکامید (*Teppeki*®) و ایمیداکلوپراید (*Confidor*®) بر نوع و مقدار پراسنجه‌های واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید *D. rapae* روی شته مومی کلم در شرایط آزمایشگاهی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای انتخاب برنامه مدیریت کارآمد و سازگار با کنترل بیولوژیک این آفت مهم فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

پرورش میزبان و دشمن طبیعی

شته‌های اولیه برای ایجاد کلونی، از مزرعه کلم در شهرستان ارومیه فراهم شد. شته‌های جمع‌آوری شده پس از شناسایی به اتاق رشد با دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس، رطوبت نسبی 56 ± 5 درصد و دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی منتقل و روی بوته‌های کلم سفید کاشته شده در داخل گلدان‌های پلاستیکی مستقر شدند. برای تشکیل کلونی زنبور پارازیتوئید *D. rapae*، شته‌های مومیایی شده در مزرعه کلم جمع‌آوری و در اتاق رشد درون ظرف‌های کوچک (۲۰ میلی‌لیتر) دارای تهویه قرار داده شدند. زنبورهای خارج شده از شته‌های مومیایی شده به منظور

به‌عنوان ترکیباتی با تأثیر منفی بر پارازیتوئیدها و دیگر دشمنان طبیعی گزارش شده‌اند، به‌طوری که حتی می‌توانند ظهور حشرات کامل را کاهش دهند یا دوره رشد و نمودرون میزبان را افزایش دهند (Kolac et al., 2024).

بنابر دانسته‌های ما مطالعات محدودی روی اثر زیرکشنده حشره‌کش‌ها بر واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید *D. rapae* یا گونه‌های مشابه صورت گرفته است. نتایج حاصل از مطالعه اثر زیرکشنده حشره‌کش‌های تیمتوکسام و پیریمیکارب روی واکنش تابعی زنبور *D. rapae* نسبت به شته خردل، *Lipaphis erysimi* Kalténbach (Hem.: Aphididae) نشان داد؛ حشره‌کش‌های مورد استفاده تأثیری روی نوع واکنش تابعی و مقدار پراسنجه نرخ حمله (a) نداشتند و واکنش تابعی در شاهد و هر دو تیمار حشره‌کش از نوع دوم بود. در حالی که زمان دستیابی (T_h) به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار با غلظت‌های زیرکشنده حشره‌کش‌های پیریمیکارب و تیمتوکسام قرار گرفت (Rezaei et al., 2014). برخی محققان اثر حشره‌کش‌های مختلف (مانند ایمیداکلوپراید و فلونیکامید) را روی واکنش تابعی زنبورهای پارازیتوئید گونه‌های متفاوت از شته‌ها مطالعه کرده‌اند. در همین راستا، امینی‌جم و همکاران (۱۳۹۱)، اثر دو حشره‌کش ایمیداکلوپراید و پیریمیکارب را روی واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید *Aphidius matricariae* (Haliday) (Hym.: Aphididae) نسبت به تراکم‌های مختلف پوره سن سوم شته جالیز *Aphis gossypii* (Glover) (Hem.: Aphididae) بررسی کردند نتایج نشان داد که واکنش تابعی در شاهد و تیمارهای دو حشره‌کش از نوع دوم بود (Amini Jam et al., 2012). همچنین، در تحقیق دیگری اثر زیرکشنده حشره‌کش‌های اسپیروترامات، استامی‌پرید، پیریمیکارب و فلونیکامید روی زنبور پارازیتوئید *Lysiphlebus fabarum* (Mardhall) (Hym.: Braconidae) در شرایط آزمایشگاهی ارزیابی شد. واکنش تابعی در شاهد و تیمارهای حشره‌کش از نوع دوم بود (Amini Jam & Kabiri Dehkordi, 2018). علاوه بر این، امینی‌جم (۱۳۹۷) اثر زیرکشنده حشره‌کش‌های استامی‌پرید، پای‌متروزین و فلونیکامید را روی واکنش تابعی زنبور

می باشند (Khakasa et al., 2016) در زیست سنجی، از پوره های سن سوم شته مومی کلم استفاده شد.

واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید *D. rapae*

برای مطالعه واکنش تابعی زنبور *D. rapae*، تعداد ۱۰۰ زنبور ماده (≥ ۲۴ ساعت) از کلونی جدا شدند. تراکم های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۶، ۲۴، ۴۰، ۵۰ عددی از پوره های سن سوم شته مومی کلم تهیه و هر تراکم دارای ۱۰ تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. پوره ها روی صفحه های برگگی کلم به قطر ۵ سانتی متر قرار داده شدند. تغذیه زنبورها با استفاده از عسل انجام شد. برای این منظور، نوار چسبی روی یک قطعه کاغذ چسبانده شده و با کمک کاردک، لایه نازکی از عسل روی آن کشیده شد. در حین کشیدن عسل دقت شد تا قطرات بزرگ عسل تشکیل نشده و مانع فعالیت زنبورها نشود. آب نیز به صورت دائم در اختیار زنبورها قرار گرفت؛ بدین منظور مقداری آب مقطر در یک لوله آزمایش پلاستیکی ریخته شده و انتهای آن با پنبه مسدود گردید و به صورت وارونه روی ظرف آزمایش قرار گرفت. ظرف های آزمایش (۱۴×۴×۸ سانتی متر) دارای شش سوراخ جهت تهویه بودند که با توری ارگانزا پوشانده شدند. روی درپوش این ظرف ها سه سوراخ تعبیه شد؛ یک سوراخ برای قرار دادن لوله آزمایش حاوی آب مقطر و دو سوراخ دیگر برای ورود و خروج برگ های حاوی پوره ها و همچنین قرار دادن نوارهای عسل. این دو سوراخ با چوب پنبه پلاستیکی مسدود شدند. اطراف درپوش ظرف ها نیز با چسب حرارتی پوشانده شد تا از فرار احتمالی زنبورها و باز شدن ناگهانی در هنگام تعویض پوره ها و نوارهای عسل جلوگیری شود. هر تراکم به مدت ۲۴ ساعت در اختیار یک زنبور ماده قرار گرفت و بعد از آن برگ حاوی پوره ها خارج شده و به درون قفس برگگی موجود روی بوته کلم منتقل شدند. پوره ها تا زمان مشخص شدن افراد مومیایی و تعیین میزان پارازیتیزم در این وضعیت نگهداری شدند. برای مطالعه اثر غلظت زیرکشنده (LC₂₅) حشره کش های فلونیکامید (۰/۹۹۷ پی پی ام) و ایمیداکلوپراید (۵/۶۱۲ پی پی ام) بر واکنش تابعی زنبور *D. rapae* از روش پاشش مستقیم محلول سمی روی صفحه های برگگی حاوی پوره های سن سوم شته مومی کلم

ایجاد نسل آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفتند. کلیه آزمایش ها در شرایط محیطی مذکور انجام شد.

حشره کش های مورد استفاده

در این تحقیق از حشره کش های فلونیکامید با نام تجاری Teppeki® به صورت گرانول قابل حل در آب ۵۰ درصد (50% WG)، محصولی از شرکت ISK ژاپن و حشره کش ایمیداکلوپراید با نام تجاری Confidor® به صورت سوسپانسیون غلیظ ۳۵ درصد (35% SC) محصولی از شرکت آرمان سبز آدینه استفاده شد.

زیست سنجی شته مومی کلم

غلظت های مورد استفاده جهت تعیین LC₂₅ و LC₅₀ بر اساس غلظت های توصیه شده روی برچسب حشره کش ها (فلونیکامید = ۲۰۰ پی پی ام و ایمیداکلوپراید = ۲۰۰۰ پی پی ام) تعیین شد. پس از انجام زیست سنجی اولیه، ۵ غلظت از هریک از حشره کش ها (فلونیکامید: ۲۰۰، ۳۹/۴، ۷/۷، ۱/۵، ۰/۳ پی پی ام و ایمیداکلوپراید: ۲۰۰۰، ۶۳۶/۲، ۲۰۲/۴، ۶۴/۴، ۲۰/۵ پی پی ام) به همراه شاهد (آب مقطر به همراه ۰/۰۵ درصد روغن سیتوویت) برای زیست سنجی شته مومی کلم روی کلم سفید استفاده شد. در هر غلظت چهار تکرار و در هر تکرار ۱۰ عدد پوره سن سوم یک روزه شته مومی کلم به صورت تصادفی انتخاب و به روش پاشش مستقیم حشره کش روی برگ های کلم حاوی پوره ها تیمار شدند (Marandi et al., 2025). برای این منظور ۱۰ عدد پوره سن سوم شته مومی کلم روی دیسک برگگی به قطر پنج سانتی متر قرار داده شد. از محلول پاش دستی، ((Ronix® (RH-6002)) به فاصله ۱۵ سانتی متری برای پاشش یکنواخت محلول حشره کش روی برگ ها استفاده شد. برگ ها پس از خشک شدن (۳۰ دقیقه) به درون تشتک های پتری به قطر ۸ سانتی متر روی کاغذ صافی منتقل شدند. روی درپوش پتری ها برای تهویه، سوراخی به ابعاد سه سانتی متر ایجاد شده و با توری ارگانزا پوشیده شد. حشرات تیمار شده در شرایط آزمایشگاهی یکسان با پرورش، نگهداری شده و تعداد تلفات، ۲۴ ساعت بعد از تیمار شمارش شد (Marandi et al., 2025). با توجه به اینکه بیشترین میزان ترجیح زنبور پارازیتوئید *D. rapae* پوره های سن سوم شته

(۲)

$$N_a = N_0 \left[1 + \exp \left(- \frac{a T P_t}{1 + a T_h N_0} \right) \right]$$

در این معادله، N_a تعداد پوره‌های شته مومی پارازیت شده، N_0 تعداد اولیه پوره‌های شته، T کل زمان آزمایش، a قدرت جستجو، P_t تعداد پارازیتوئیدها و T_h زمان دستیابی است. رسم منحنی‌های واکنش تابعی با استفاده از نرم افزار Excel انجام شد.

نتایج

بر اساس نتایج زیست‌سنجی، غلظت کشنده ۲۵ درصد (LC_{25}) برای حشره‌کش‌های فلوونیکامید و ایمیداکلوپراید روی پوره‌های سن سوم شته مومی کلم، به ترتیب (۲/۲۳۵-۰/۲۷۶) (۰/۹۹۷ پی‌پی‌ام و (۱/۱۲-۲۹۷/۳۹۸) (۵/۶۱۲ پی‌پی‌ام-۰/۹۹۷ پی‌پی‌ام بدست آمد.

نتایج تعیین نوع واکنش تابعی زنبور *D. rapae* روی پوره‌های شته مومی کلم و برآورد نرخ حمله و زمان دستیابی به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. شیب بخش خطی رگرسیون لجستیک برای آزمایش واکنش تابعی زنبور *D. rapae* نسبت به پوره‌های شته مومی کلم در شاهد و تیمار فلوونیکامید منفی و به ترتیب برابر با -۰/۰۹۵۱ و -۰/۰۹۷۵ و در تیمار ایمیداکلوپراید مثبت و مقدار آن برابر با +۰/۰۸۳ بود که به ترتیب نشان دهنده واکنش تابعی نوع دوم و سوم می‌باشد.

در بررسی حاضر، مقدار پراسنجه‌های قدرت جستجو (a) و زمان دستیابی (T_h) زنبور *D. rapae* در شاهد به ترتیب ۰/۰۵۸۶ بر ساعت و ۱/۱۳۴۷ ساعت تخمین زده شد (جدول ۲). بیشینه نرخ پارازیتسم زنبور برابر با ۲۱/۱۵ عدد پوره شته برآورد گردید. مقادیر پراسنجه قدرت جستجو در تیمارهای فلوونیکامید و ایمیداکلوپراید به ترتیب ۰/۰۴۵۶ و ۰/۰۳۷۵ بر ساعت و پراسنجه زمان دستیابی به ترتیب ۱/۴۷ و ۲/۵۴ ساعت بود. نرخ قدرت جستجو در تیمارهای فلوونیکامید و ایمیداکلوپراید به ترتیب ۲۲٪ و ۹۳٪ کمتر از شاهد محاسبه شد. نسبت زمان آزمایش به زمان دستیابی (T/T_h) نشان دهنده بیشینه نرخ حمله می‌باشد که این مقدار در تیمارهای شاهد، فلوونیکامید و ایمیداکلوپراید به ترتیب ۲۱/۱۵، ۱۶/۲۴

همانند روش زیست‌سنجی استفاده شد (Fathipour et al., 2004).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تخمین مقادیر مختلف غلظت‌های کشنده (LC)، تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از روش پروبیت در سطح احتمال ۵ درصد به وسیله نرم‌افزار SPSS25 انجام گرفت.

تجزیه داده‌های واکنش تابعی در دو مرحله و با استفاده از نرم‌افزار SAS (SAS Institute, 2002) انجام شد (Juliano, 2001). در مرحله اول، برای تعیین نوع واکنش تابعی زنبور *D. rapae*، رگرسیون لجستیک نسبت پوره‌های پارازیت شده (N_a) به تراکم اولیه (N_0) پوره‌های شته مومی مطابق معادله زیر برآورد گردید (Trexler and Travis, 1993):

$$\frac{N_a}{N_0} = \frac{\exp (P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_0^2 + P_3 N_0^3)}{1 + \exp (P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_0^2 + P_3 N_0^3)}$$

در این معادله، پراسنجه‌های P_0 (عرض از مبدأ)، P_1 (خطی)، P_2 (درجه دو) و P_3 (درجه سه) توسط مدل تخمین زده می‌شوند. این رگرسیون، داده‌ها را با یک مدل لجستیکی چند جمله‌ای برازش کرده و در نتیجه یک منحنی چند درجه‌ای واکنش تابعی را ارائه می‌دهد. در واکنش تابعی نوع دوم، با افزایش تراکم میزبان، نسبت پوره‌های پارازیت شده کاهش می‌یابد (وابسته به تراکم معکوس میزبان). بنابراین، مقدار برآوردی ضریب خطی (PI) منفی بوده و نشانگر شیب نزولی منحنی است. در واکنش تابعی نوع سوم، با افزایش تراکم میزبان ابتدا نسبت پوره‌های پارازیت شده افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ بنابراین ضریب خطی (PI) دارای شیب مثبت بوده و مقدار برآوردی آن نیز مثبت است. به این ترتیب، علامت منفی یا مثبت ضریب خطی منحنی واکنش تابعی به ترتیب بیانگر نوع دو و سه واکنش تابعی است (Trexler et al., 1988; Juliano, 2001).

در مرحله دوم پس از تعیین نوع واکنش تابعی، پراسنجه‌های قدرت جستجو (a) و زمان دستیابی (T_h) با استفاده از رگرسیون غیرخطی محاسبه شد (Juliano, 2001). برای تخمین این پراسنجه‌ها از مدل راجرز (Rogers, 1972) به صورت زیر استفاده گردید:

و ۹/۴۴ پوره میزبان بود. نتایج نشان دهنده تاثیر سوء غلظت - های زیرکشنده فلونیکامید و ایمیداکلوپراید روی بیشینه نرخ حمله پارازیتوئید است. به عبارت دیگر کارایی پارازیتسم در شاهد به ترتیب ۱/۳ و ۲/۲۴ برابر بیشتر از تیمارهای

فلونیکامید و ایمیداکلوپراید بود. نرخ دستیابی (بیشینه نرخ پارازیتسم) در تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید به ترتیب ۲۳٪ و ۵۵٪ کمتر از شاهد برآورد شد.

جدول ۱ - پراسنجه های حاصل از برازش رگرسیون لجستیک به داده های واکنش تابعی زنبور *Diaeretiella rapae* نسبت به پوره های *Brevicoryne brassicae* در تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید

Table 1. Parameters obtained from logistic regression fitting in proportion to *Brevicoryne brassicae* nymphs parasitized by *Diaeretiella rapae* against the initial density, at flonicamid and imidacloprid treatments

Treatments	Parameter	Estimate	SE	Chi-Square	P-Value
control	Intercept(P0)	1.2874	0.3248	15.71	0.0001
	Linear(P1)	-0.0951	0.0466	4.16	0.0414
	Quadratic(P2)	0.00167	0.00187	0.80	0.3715
	Cubic (P3)	-0.00001	0.000022	0.29	0.5917
Flonicamid	Intercept(P0)	0.9063	0.3116	8.46	0.0036
	Linear(P1)	-0.0975	0.0463	4.44	0.0351
	Quadratic(P2)	0.00197	0.00189	1.09	0.2965
	Cubic (P3)	-0.00002	0.000022	0.57	0.4512
Imidacloprid	Intercept(P0)	-0.2082	0.3111	0.45	0.5034
	Linear(P1)	0.00830	0.0481	0.03	0.8631
	Quadratic(P2)	-0.00273	0.00201	1.84	0.1747
	Cubic (P3)	0.000043	0.000024	3.24	0.0717

جدول ۲ - برآورد نرخ حمله و زمان دستیابی زنبور *Diaeretiella rapae* نسبت به پوره های *Brevicoryne brassicae* در تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید

Table 2. Estimated parameters (mean $\pm$ SE) indicating functional response of *Diaeretiella rapae* to *Brevicoryne brassicae* nymphs at flonicamid and imidacloprid treatments

Treatment	Attack rate (h^{-1}) $a \pm SE$	Handling time (h) $T_h \pm SE$	R^2	Maximum attack rate (T/T_h)
Control	0.0586 ± 0.0039 (0.0506–0.0665) ^a	1.1347 ± 0.0451 (1.0448–1.2246)	0.98	21.15
Flonicamid	0.0456 ± 0.006 (0.0336–0.0576)	1.4776 ± 0.1131 (1.2523–1.7028)	0.95	16.24
Imidacloprid	0.00375 ± 0.0005 (0.0026–0.0048)	2.5415 ± 0.0951 (2.3521–2.7309)	0.94	9.44

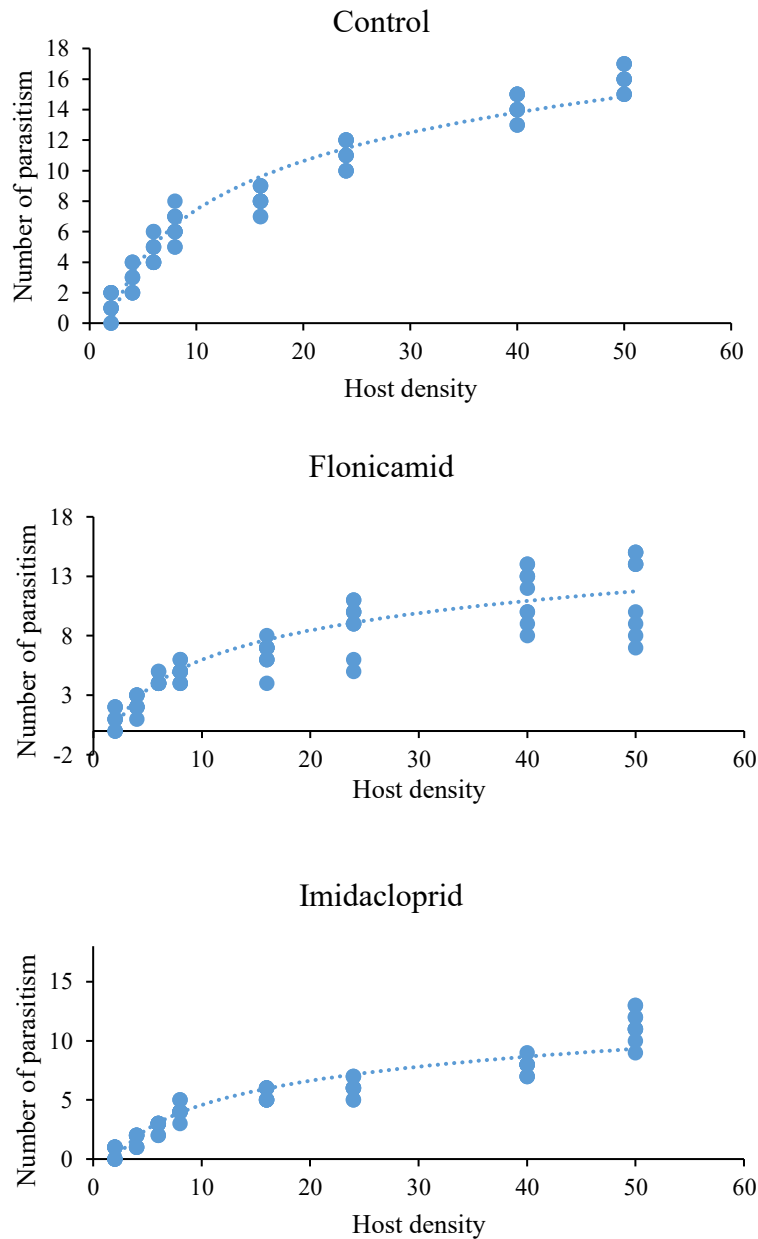
^a 95% fiducial limits (FL) are shown in parenthesis

نمودارهای مربوط به واکنش تابعی و نرخ پارازیتسم در شکل های ۱ و ۲ آورده شده است. در نمودار مربوط به واکنش تابعی زنبور *D. rapae* در شاهد و تیمار فلونیکامید با افزایش تراکم میزبان، تعداد میزبان های مورد حمله افزایش یافت، اما این افزایش به صورت خطی نبود و به تدریج از شیب منحنی کاسته شد و به یک مقدار ثابت رسید. به عبارت دیگر در تراکم های پایین شته مومی کلم میزان

پارازیتسم به سرعت افزایش یافت اما در تراکم بالا، افزایش تعداد میزبان تاثیر کمی بر میزان پارازیتسم توسط زنبور *D. rapae* داشت که نشان دهنده واکنش تابعی نوع دوم است. در نمودار مربوط به واکنش تابعی زنبور *D. rapae* تحت تاثیر غلظت زیرکشنده ایمیداکلوپراید در تراکم های پایین از پوره سن سوم شته مومی کلم میزان پارازیتسم کم بود در صورتی که با افزایش تراکم میزبان، میزان پارازیتسم به

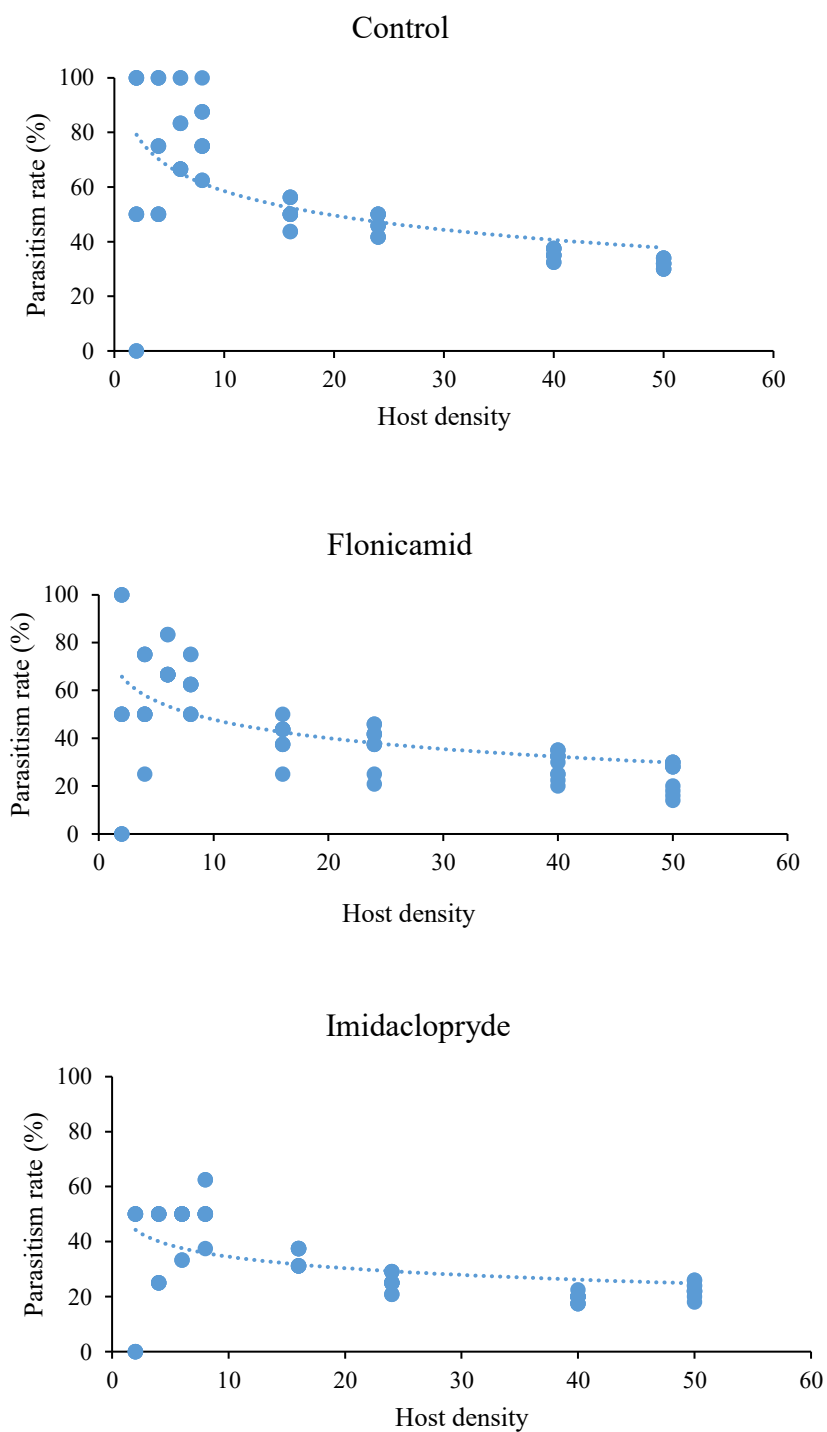
با افزایش تراکم پوره های شته، درصد پوره های پارازیت شده در شاهد و تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید کاهش یافت که نشان داد زنبور *D. rapae* به صورت وابسته به تراکم معکوس عمل کرده است (شکل ۲).

سرعت افزایش یافت و منحنی به حالت خطی رسید که نشان دهنده واکنش تابعی نوع سوم است (شکل ۱). در منحنی های مربوط به درصد پارازیتسم، نسبت میزبان های مورد حمله به تدریج کاهش پیدا کرد. به بیان دیگر، متناسب



شکل ۱- منحنی های واکنش تابعی زنبور *Diaeretiella rapae* به تراکم های مختلف شته مومی کلم (*Brevicoryne brassicae*) در تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید

Fig. 1. Functional response curves of *Diaeretiella rapae* to *Brevicoryne brassicae* nymphs at flonicamid and imidacloprid treatments



شکل ۲- منحنی های درصد پارازیتسم زنبور *Diaeretiella rapae* روی شته مومی کلم (*Brevicoryne brassicae*) در تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید

Fig. 2. Curves of the percentage parasitism of *Diaeretiella rapae* to *Brevicoryne brassicae* at flonicamid and imidacloprid treatments

بحث

در این تحقیق، منفی بودن شیب بخش خطی رگرسیون لجستیک در آزمایش واکنش تابعی زنبور *D. rapae* نسبت به پوره‌های شته مومی کلم در شاهد نشان دهنده مرگ و میر وابسته به تراکم منفی و در نتیجه واکنش تابعی نوع دوم می‌باشد. پارازیتوئیدهایی که این نوع واکنش را از خود نشان می‌دهند بیشترین اثر و پارازیتسم خود را در تراکم‌های پایین میزبان انجام می‌دهند و بنابراین در مرحله استقرار میزبان می‌توانند موثر باشند ولی با افزایش جمعیت میزبان کارایی آنها کاهش می‌یابد (Hassel, 2000; Fernández-Arhex & Corley 2003; Chong & Oetting, 2006). کاربرد حشره‌کش فلونیکامید نوع واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید تغییر نکرده و در این تیمار نوع دوم را نشان داد. هر چند ممکن است تغییر نوع واکنش تابعی از نوع دوم به سوم یا بالعکس، زمانی که پارازیتوئیدها تحت تاثیر غلظت توصیه شده مزرعه‌ای قرار گیرند گزارش شود (Stanley & Preetha, 2024). این حالت در کاربرد تیمار ایمیداکلوپراید به وقوع پیوست. واکنش تابعی دشمنان طبیعی هر نوعی که باشد در کاهش جمعیت میزبان موثر است (Greenop et al., 2018). البته تنها براساس آزمایش واکنش تابعی نمی‌توان در مورد کارایی واقعی یک دشمن طبیعی اظهار نظر کرد (Lester & Harmsen, 2002).

همسو با نتایج این پژوهش، برخی محققان واکنش تابعی زنبور *D. rapae* را نسبت به شته مومی کلم از نوع دو گزارش کرده‌اند (Fathipour et al., 2004, 2006; Soni & Kumar, 2021a). همچنین، واکنش تابعی زنبور *D. rapae* نسبت به شته مومی کلم در شرایط آزمایشگاهی و در سه دمای ثابت ۱۷، ۲۵ و ۳۰ درجه سلسیوس بررسی شد. نتایج نشان داد که این پارازیتوئید در هر سه دما، واکنش تابعی نوع دوم را از خود نشان می‌دهد (Moayeri et al., 2013). Pandey et al. (1984) گزارش کردند که واکنش تابعی زنبور *D. rapae* نسبت به شته مومی کلم از نوع سوم است. این یافته بر خلاف نتایج تحقیق حاضر در شاهد و تیمار فلونیکامید است، اما با نتایج به‌دست‌آمده در تیمار ایمیداکلوپراید تطابق دارد. همسو با نتایج این پژوهش،

برخی مطالعات نشان داده‌اند که واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید *D. rapae* نسبت به شته روسی گندم، *Diuraphis noxia* (Hem.: Aphididae) (Mordvilko in Kurdjumov) از نوع دوم بوده است (Bernal et al., 1994; Tazerouni et al., 2011, 2012). همچنین، واکنش تابعی زنبور *D. rapae* نسبت به پوره‌های سن دوم شته سبز هلو، *Abd El Myzus persicae* (Sulzer) (Hem.: Aphididae) (Karim et al., 2024) و شته گندم، *Schizaphis graminum* (Rondani) (Hem.: Aphididae) (Talebi et al., 2021) نیز از نوع دوم بود.

همسو با نتایج تحقیق حاضر، مطالعه اثر زیرکشنده حشره‌کش‌های تیمتوکسام و پیریمیکارب روی واکنش تابعی زنبور *D. rapae* نسبت به شته خردل، *Lipaphis erysimi* Kalténbach (Hem.: Aphididae) حشره‌کش‌های مورد استفاده تاثیری روی نوع واکنش تابعی نداشتند و واکنش تابعی در شاهد و تیمارهای حشره‌کش از نوع دو بود (Rezaei et al., 2014). در همین راستا، اثر دو حشره‌کش ایمیداکلوپراید و پیریمیکارب روی واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید *A. matricariae* نسبت به تراکم‌های مختلف پوره سن سوم شته جالیز بررسی شد. نتایج نشان داد که واکنش تابعی در شاهد و تیمارهای حشره‌کش از نوع دو بود (Amini Jam et al., 2012). در حالی که در تحقیق حاضر حشره‌کش ایمیداکلوپراید موجب تغییر نوع واکنش تابعی زنبور *D. rapae* از دو به سه شد که این تفاوت می‌تواند به دلیل تفاوت در گونه زنبور پارازیتوئید باشد. در تحقیق دیگری اثر زیرکشنده حشره‌کش‌های اسپیروترامات، استامی‌پرید، پیریمیکارب و فلونیکامید روی زنبور پارازیتوئید *L. fabarum* در شرایط آزمایشگاهی مطالعه شد. همسو با نتایج این پژوهش، واکنش تابعی در شاهد و تیمارهای حشره‌کش از نوع دو بود (Amini Jam & Kabiri Dehkordi, 2018). همچنین، امینی جم (۱۳۹۷) اثر زیرکشنده حشره‌کش‌های استامی‌پرید، پای‌متروزین و فلونیکامید را روی واکنش تابعی زنبور پارازیتوئید *A. matricariae* نسبت به تراکم‌های مختلف پوره سن سوم شته سیاه باقلا مطالعه کرد. نتایج نشان داد واکنش تابعی در شاهد و تیمار حشره‌کش‌ها از نوع دوم بود که با نتایج

به طور معنی داری تحت تأثیر تیمارهای حشره کش قرار گرفت، به گونه ای که غلظت زیرکشنده فلونیکامید و ایمیداکلوپراید موجب افزایش معنی دار زمان دستیابی نسبت به شاهد و یکدیگر شد. بر اساس نتایج حاصل از مطالعه اثر زیرکشنده حشره کش های پیریمیکارب و تیمتوکسام روی واکنش تابعی زنبور *D. rapae* نسبت به شته خردل، نرخ حمله (a) در شاهد 0.01 ± 0.057 بر ساعت برآورد شد که با مقدار این پراسنجه در تیمارهای حشره کش تفاوت معنی داری نداشت. درحالی که در تحقیق حاضر نرخ حمله در تیمار ایمیداکلوپراید به عنوان یک حشره کش شبه نیکوتینی و هم گروه با تیمتوکسام با شاهد تفاوت معنی داری داشت. زمان دستیابی (T_h) نیز در شاهد و تیمارهای پیریمیکارب و تیمتوکسام به ترتیب $1/0.97 \pm 0.1$ ، $1/0.86 \pm 0.2$ و $2/0.81 \pm 0.296$ ساعت بدست آمد که با نتایج حاصل از این پژوهش مبنی بر اثر معنی دار غلظت های زیرکشنده حشره کش ها روی این پراسنجه همخوانی دارد (Rezaei *et al.*, 2014). تفاوت های جزئی در نتایج این پژوهش با مطالعه (Rezaei *et al.*, 2014) می تواند به دلیل تفاوت در گونه آفت میزبان باشد. پیامدهای منفی غلظت های زیرکشنده سه آفت کش پیریمیکارب، پرمترین و مالاتیون بر کارایی جستجوی زنبور پارازیتوئید *D. rapae* روی کلم غنچه ای (Brussels sprouts) مطالعه شد (De Jiu & Waage, 1990). مشابه با نتایج تحقیق حاضر، بررسی توزیع زمانی زنبورها نشان داد که آن ها در مقایسه با شاهد، زمان کمتری را روی گیاهان سم پاشی شده سپری کردند و هنگام حضور روی این گیاهان، فعالیت خود را عمدتاً روی سطوح سم پاشی نشده انجام می دادند. در مطالعه دیگری، قدرت جستجو، زمان دستیابی و بیشینه نرخ حمله زنبور *D. rapae* روی پوره های سن دوم شته مومی کلم به ترتیب 0.33 ± 0.03 بر ساعت، 0.892 ± 0.09 ساعت و $26/89$ برآورد شد (Fathipour *et al.*, 2004) که نشان دهنده قدرت جستجوی کمتر و زمان دستیابی طولانی تر این زنبور در مقایسه با نتایج حاصل از این تحقیق است. این امر ممکن است به دلیل تفاوت در روش تجزیه آماری داده ها باشد (Holling, 1959; Rogers, 1972). بر اساس نتایج Moayeri *et al.*,

حاصل از تحقیق حاضر همخوانی دارد (Amini Jam, 2022).

در این پژوهش قدرت جستجو (نرخ حمله) زنبور *D. rapae* نسبت به تراکم های مختلف شته مومی کلم تحت تأثیر غلظت زیرکشنده حشره کش های مورد استفاده کاهش یافت. قدرت جستجو یا توانایی یافتن میزبان در تراکم های پایین تأثیر مهمی در موفقیت بلند مدت دشمن طبیعی در موقعیت های پایدار دارد (Fernández-Arhex & Corley, 2003). یک دشمن طبیعی که قادر است درصد معینی از تراکم آفتی را که دارای جمعیت پراکنده است از بین ببرد نسبت به دشمن طبیعی که همان درصد از جمعیت آفت متراکم را مورد حمله قرار می دهد از کارایی بیشتری برخوردار است (Bommarco & Ekbom, 2007; Yu *et al.*, 2020). قدرت جستجوی موثر می تواند جمعیت آفت را در تراکم های پایین تنظیم کند (Fernández-Arhex & Corley, 2003). همچنین قدرت جستجوی بالا باعث می شود که دشمنان طبیعی، جمعیت میزبان خود را در سطح پایین تر از سطح زیان اقتصادی کنترل کنند و قدرت جستجوی پایین، اثر عکس خواهد داشت (Zhang & Swinton, 2009). به طور کلی، در آزمایشات واکنش تابعی هر چقدر قدرت جستجو (نرخ حمله) بیشتر و زمان دستیابی کوتاه تر باشد کارایی دشمن طبیعی بالاتر خواهد بود (Papanikolaou *et al.*, 2021). در تحقیق حاضر، زمان دستیابی شامل فاصله زمانی بین لحظه مشاهده میزبان، پارازیته کردن آن و لحظه آغاز جستجو برای میزبان جدید، تحت تأثیر غلظت زیرکشنده حشره کش های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید افزایش یافت. با افزایش زمان دستیابی، تعداد حمله در زمان کل آزمایش (۲۴ ساعت) کمتر شده و میزان پارازیتسم کاهش یافت، در نتیجه بیشینه نرخ حمله نیز تحت تأثیر حشره کش ها کاهش پیدا کرد.

نتایج نشان داد که غلظت زیرکشنده حشره کش فلونیکامید تأثیر معنی داری بر نرخ حمله زنبور *D. rapae* در مقایسه با شاهد نداشت اما این پراسنجه در کاربرد غلظت زیرکشنده ایمیداکلوپراید نسبت به شاهد و تیمار فلونیکامید به طور معنی داری تحت تأثیر قرار گرفت. همچنین، زمان دستیابی

می‌تواند به دلیل تفاوت در نوع آفت میزبان باشد (Tazerouni *et al.*, 2011, 2012; Talebi *et al.*, 2021; Abd El-Kareim *et al.*, 2024). نتایج این پژوهش نشان داد حشره‌کش فلونیکامید نسبت به ایمیداکلوپراید سازگاری بالاتری با زنبور پارازیتوئید *D. rapae* برای کنترل شته مومی کلم دارد و می‌تواند در برنامه‌های مدیریت تلفیقی این آفت مورد استفاده قرار گیرد. هرچند مطالعات واکنش تابعی به تنهایی نمی‌تواند گویای این مهم باشد و نیاز به انجام مطالعات بیشتر در زمینه تاثیر این حشره‌کش روی پراسنجه‌های جدول زندگی و سایر واکنش‌های رفتاری این زنبور در سطح آزمایشگاهی و مزرعه‌ای ضروری به نظر می‌رسد.

سپاسگزاری

از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی به دلیل همکاری در اجرای این پژوهش قدردانی به عمل می‌آید.

(2013) نرخ حمله و زمان دستیابی زنبور *D. rapae* نسبت به پوره‌های سن دوم شته مومی کلم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۰/۳۵ بر ساعت و ۰/۹۷ ساعت بود که این اختلاف در مقدار پراسنجه‌های واکنش تابعی با تحقیق حاضر ممکن است به دلیل تفاوت در سن پوره‌های شته مومی کلم به عنوان میزبان زنبور در این دو آزمایش باشد. در همین راستا، (2006) Fathipour *et al.*، جستجو و زمان دستیابی زنبور *D. rapae* نسبت به پوره‌های سن دوم شته مومی کلم را به ترتیب ۰/۴۹ بر ساعت و ۱/۲۰ ساعت بیان کردند. علاوه بر این، در مطالعه واکنش تابعی زنبور *D. rapae* نسبت به پوره‌های سن سوم شته مومی کلم روی گیاه خردل قدرت جستجو و زمان دستیابی به ترتیب، ۰/۲۵۸۶۵ بر ساعت و ۱/۳۵ ساعت بدست آمد که می‌تواند نشان‌دهنده تاثیر نوع گیاه میزبان در انجام مطالعات واکنش تابعی باشد (Soni & Kumar, 2021a). محققان دیگری پراسنجه‌های واکنش تابعی زنبور *D. rapae* را نسبت به شته روسی گندم، شته گندم و شته سبز هلو مطالعه کرده‌اند که تفاوت در مقدار این پراسنجه‌ها با تحقیق حاضر

References

- Abd El-Kareim, A.I., Ghanim, N.M., El-Gazar, E.E. & Rashed, A.A. 2024. Functional response of the parasitoid *Diaeretiella rapae* (McIntosh) to different densities of *Myzus persicae* (Sulzer) under laboratory conditions. *Journal of Plant Protection and Pathology*, 15(6): 243–248. DOI:https://doi.org/10.21608/jppp.2024.330299.1273
- Agathokleous, E., Blande, J.D., Masui, N., Calabrese, E.J., Zhang, J., Sicard, P., Guedes, R.N.C. & Benelli, G. 2023. Sublethal chemical stimulation of arthropod parasitoids and parasites of agricultural and environmental importance. *Environmental Research*, 237(1): 116876. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116876
- Akhter, S., Naik, V.K., Naladi, B.J., Rathore, A., Yadav, P. & Lal, D. 2024. The ecological impact of pesticides on non-target organisms in agricultural ecosystems. *Advances in Bioresarch*, 15(4): 322–334. DOI:https://doi.org/10.15515/abr.0976–4585.15.4.322334
- Ali, J., Xiao, F., Alam, A., Li, L.J., Ji, Y., Chao, W.H., Weibo, Q., Xie, A., Zengyi, B., Abdel Hafez, M.M., Ghramh, H.A., Khan, K.A., Tonga, A. & Chen, R. 2024. Prohydrojasmon treatment of *Brassica juncea* alters the performance and behavioural responses of the cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 172(11): 1014–1023. DOI:https://doi.org/10.1111/eea.13506
- Amini Jam, N. 2022. Sublethal effects of acetamiprid, pymetrozine and flonicamid on the functional response of *Aphidius matricariae* Haliday. *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)*, 45(1): 97–117. DOI:https://doi.org/10.22055/ppr.2022.17400. (In Persian with English summary)
- Amini Jam, N. & Kabiri Dehkordi, S. 2018. Effects of spirotetramat, acetamiprid, pirimicarb and flonicamid on parasitoid wasp, *Lysiphlebus fabarum* (Marshall) (Hym.: Braconidae) under laboratory conditions. *Plant Pest Research*, 8(2): 67–81. DOI:10.22124/iprj.2018.2996. (In Persian with English summary)
- Amini Jam, N., Kochevli, F., Mossadegh, M. S., Rasekh, A. & Saber, M. 2012. Effect of imidacloprid and pirimicarb on functional response of *Aphidius matricariae* Haliday (Hym: Braconidae) under laboratory conditions. *Plant Pests Research*, 2(3): 51–61. (In Persian with English summary)

- Bernal, J.S., Bellows, T.S. & Gonzalez, D. 1994. Functional response of *Diaeretiella rapae* (McIntosh) (Hymenoptera: Aphidiidae) to *Diuraphis noxia* (Mordwilko) (Homoptera: Aphididae) hosts. Journal of Applied Entomology, 118(3–4): 300–309. DOI:https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1994.tb00804.x
- Bommarco, R., Firle, S.O. & Ekbom, B. 2007. Outbreak suppression by predators depends on spatial distribution of prey. Ecological Modelling, 201(2): 163–170. DOI:https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.09.012
- Chong, J.-H. & Oetting, R.D. 2006. Functional response and progeny production of the Madeira mealybug parasitoid, *Anagyrus* sp. nov. nr. *sinope*: The effects of host and parasitoid densities. Biological Control, 39(3): 320–328. DOI:https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2006.08.013
- De Jiu, G. & Waage, J.K. 1990. The effect of insecticides on the distribution of foraging parasitoids, *Diaeretiella rapae* (Hym.: Braconidae) on plants. Entomophaga, 35(1): 49–56. DOI:https://doi.org/10.1007/BF02374300
- Desneux, N., Decourtye, A. & Delpuech, J.-M. 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. Annual Review of Entomology, 52: 81–106. DOI:https://doi.org/10.1146/annurev.ento.52.110405.091440
- El-Shazly, M., El-Shafie, F. & Mohamed, M. 2021. Impact of the parasitoid, *Diaeretiella rapae* (McIntosh), on crucifer's aphid in Egypt and Iraq. Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, F. Toxicology & Pest Control, 13(2): 289–299. DOI:https://doi.org/10.21608/eajbsf.2021.243112
- Fathipour, Y., Hosseini Gharalari, A. & Talebi, A.A. 2004. Some behavioral characteristics of *Diaeretiella rapae* (Hym.: Aphidiidae), parasitoid of *Brevicoryne brassicae* (Hom.: Aphididae). Iranian Journal of Agricultural Sciences, 35(2): 395–401. (In Persian with English summary)
- Fathipour, Y., Hosseini, A., Talebi, A. & Moharramipour, S. 2006. Functional response and mutual interference of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Aphidiidae) on *Brevicoryne brassicae* (Homoptera: Aphididae). Entomologica Fennica, 17(2): 90–97. DOI:https://doi.org/10.33338/ef.84293
- Fathipour, Y., Kamali, K., Khalghani, J. & Abdollahi, G. 2001. Functional response of *Trissolcus grandis* (Hym., Scelionidae) to different egg densities of *Eurygaster integriceps* (Het., Scutelleridae) and effects of wheat genotypes on it. Applied Entomology and Phytopathology, 68: 123–136.
- Fernández-Arhex, V. & Corley, J.C. 2003. The functional response of parasitoids and its implications for biological control. Biocontrol Science and Technology, 13(4): 403–413. DOI:https://doi.org/10.1080/0958315031000104523
- Greenop, A., Woodcock, B.A., Wilby, A., Cook, S.M. & Pywell, R.F. 2018. Functional diversity positively affects prey suppression by invertebrate predators: A meta-analysis. Ecology, 99(8): 1771–1782. DOI:https://doi.org/10.1002/ecy.2378
- Guo, K., Yang, P., Chen, J., Lu, H. & Cui, F. 2017. Transcriptomic responses of three aphid species to chemical insecticide stress. Science China Life Sciences, 60(8): 931–934. DOI:https://doi.org/10.1007/s11427-017-9104-5
- Hassell, M.P. 2000. The Spatial and Temporal Dynamics of Host-Parasitoid Interactions. Oxford, UK: Oxford University Press. DOI:https://doi.org/10.1093/oso/9780198540892.001.0001
- Holling, C.S. 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. The Canadian Entomologist, 91(7): 385–398. DOI:https://doi.org/10.4039/Ent91385-7
- Islam, Y., Shah, F.M., Rubing, X., Razaq, M., Yabo, M., Li, X. & Zhou, X. 2021. Functional response of *Harmonia axyridis* preying on *Acyrtosiphon pisum* nymphs: The effect of temperature. Scientific Reports, 11: 13565. DOI:https://doi.org/10.1038/s41598-021-92954-x
- Juliano, S.A. 2001. Non-linear curve fitting: predation and functional response curves. In S.M. Scheiner & J. Gurevitch (Eds), Design and analysis of ecological experiments (pp. 178–196). Oxford University Press: New York. DOI:https://doi.org/10.1093/oso/9780195131871.003.0010
- Kaleem Ullah, R.M., Gao, F., Sikandar, A. & Wu, H. 2023. Insights into the effects of insecticides on aphids (Hemiptera: Aphididae): Resistance mechanisms and molecular basis. International Journal of Molecular Sciences, 24(7): 6750. DOI:https://doi.org/10.3390/ijms24076750
- Khakasa, S.W.R., Mohamed, S.A., Lagat, Z.O. Khamis, F.M. & Tanga, C.M. 2016. Host stage preference and performance of the aphid parasitoid *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae) on *Brevicoryne brassicae* and *Lipaphis pseudobrassicae* (Hemiptera: Aphididae). International Journal of Tropical Insect Science, 36: 10–21. DOI:https://doi.org/10.1017/S1742758415000260
- Knapp, R.A., Doyle, E., Hoffmann, A.A. & Umnia, P.A. 2025. Sub-lethal and population -level impacts of afidopyropen and flonicamid on *Harmonia conformis* (Coleoptera: Coccinellidae). Ecotoxicology and Environmental Safety, 303: 118958. DOI:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118958
- Kolac, J., Schneider, M.I. & Rimoldi, F. 2024. Short- and long-term effects of commercial formulations of imidacloprid, spirotetramat, and mixtures of these active ingredients on pupae of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae) and its progeny. Pest Management Science, 80(9): 4594–4603. DOI:https://doi.org/10.1002/ps.8178

- Lester, P.J. & Harmsen, R. 2002. Functional and numerical responses do not always indicate the most effective predator for biological control: An analysis of two predators in a two-prey system. *Journal of Applied Ecology*, 39(3): 455–468. DOI:https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00733.x
- Mahmoodi, L., Mehrkhoh, F., Guz, N., Forouzan, M. & Atlihan, R. 2020. Sublethal effects of three insecticides on fitness parameters and population projection of *Brevicoryne brassicae* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology*, 113(6): 2713–2722. DOI:https://doi.org/10.1093/jee/toaa193
- Marandi, R., Safavi, S.A., Forouzan, M. & Jarrahi, A. 2025. Fertility life table parameters of the cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae* affected by sublethal concentration of BotanAphid aphicide on two cabbage varieties. *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)*, 47(4): 23–43. DOI:https://doi.org/10.22055/ppr.2024.48256.1772. (In Persian with English summary)
- Messina, F.J. & Hanks, J.B. 1998. Host plant alters the shape of functional response of an aphid predator (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 27(5): 1196–1202. DOI:https://doi.org/10.1093/ee/27.5.1196
- Moayeri, H.R.S., Madadi, H., Pouraskari, H. & Enkegaard, A. 2013. Temperature-dependent functional response of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Aphidiidae) to the cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae* (Hemiptera: Aphididae). *European Journal of Entomology*, 110(1): 109–113. DOI:https://doi.org/10.14411/eje.2013.015
- Nisar, S. & Rizvi, P.Q. 2021. Host fitness of different aphid species for *Diaeretiella rapae* (M'Intosh): a life table approach. *International Journal of Tropical Insect Science*, 41: 787–799. DOI:https://doi.org/10.1007/s42690-020-00269-7
- Núñez-Campero, S.R., Suárez, L.d.C., Mello García, F.R., Cancino, J., Montoya, P. & Ovruski, S.M. 2025. Insights into the functional responses of four Neotropical-native parasitoids to enhance their role as biocontrol agents against *Anastrepha fraterculus* pest populations. *Insects*, 16(9): 919. DOI:https://doi.org/10.3390/insects16090919
- Pandey, K.P., Singh, R. & Tripathi, C.P.M. 1984. Functional response of *Diaeretiella rapae* (M'Intosh) (Hym., Aphidiidae), a parasitoid of the mustard aphid *Lipaphis erysimi* Kalt. (Hom., Aphididae). *Journal of Applied Entomology*, 98(4): 321–327. DOI:https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1984.tb02718.x
- Papanikolaou, N.E., Kypraios, T., Moffat, H., Fantinou, A., Perdakis, D.P. & Drovandi, C. 2021. Predators' functional response: Statistical inference, experimental design, and biological interpretation of the handling time. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9: 740848. DOI:https://doi.org/10.3389/fevo.2021.740848
- Pervez, A. & Omkar. (2005). Functional responses of coccinellid predators: An illustration of a logistic approach. *Journal of Insect Science*, 5(1): 5. DOI:https://doi.org/10.1093/jis/5.1.5
- Radrigán-Navarro, C. & Fuentes-Contreras, E. 2024. Sublethal effects of insecticides on the parasitism of *Acerophagus flavidulus*, a parasitoid of *Pseudococcus viburni*. *Sustainability*, 16(4): 1478. DOI:https://doi.org/10.3390/su16041478
- Rezaei, N., Kocheyli, F., Mossadegh, M.S., Talebi Jahromi, KH. & Kavousi, A. 2014. Effect of sublethal doses of thiamethoxam and pirimicarb on functional response of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae), parasitoid of *Lipaphis erysimi* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Crop Protection*, 3(4): 467–477. DOI:https://doi.org/10.48311/jcp.2014.1156
- Rogers, D. (1972). Random search and insect population models. *Journal of Animal Ecology*, 41: 369–383. DOI:https://doi.org/10.2307/3474
- Schmidt-Jeffris, R.A., Beers, E.H. & Sater, C. 2021. Meta-analysis and review of pesticide non-target effects on phytoseiids, key biological control agents. *Pest Management Science*, 77(11): 4848–4862. DOI:https://doi.org/10.1002/ps.6531
- Siddiqui, J.A., Fan, R., Naz, H., Bamisile, B.S., Hafeez, M., Ghani, M.I., Wei, Y., Xu, Y. & Chen, X. (2023). Insights into insecticide-resistance mechanisms in invasive species: Challenges and control strategies. *Frontiers in Physiology*, 13: 1112278. DOI:https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1112278
- Slavíková, L., Fryč, D. & Kundu, J.K. 2024. Analysis of twenty years of suction trap data on the flight activity of *Myzus persicae* and *Brevicoryne brassicae*, two main vectors of oilseed rape infection viruses. *Agronomy*, 14(9): 1931. DOI:https://doi.org/10.3390/agronomy14091931
- Soni, S. & Kumar, S. 2021a. Biological control potential of an aphid parasitoid, *Diaeretiella rapae* (McIntosh) (Hymenoptera: Braconidae) against *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus) (Hemiptera: Aphididae), a pest of oilseed brassicas in India. *International Journal of Tropical Insect Science*, 41(4): 2361–2372. DOI:https://doi.org/10.1007/s42690-020-00408-0
- Soni, S. & Kumar, S. 2021b. Efficacy of the parasitoid, *Diaeretiella rapae* (McIntosh) (Hymenoptera: Braconidae) against *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) infesting rapeseed-mustard. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 24(3): 912–917. DOI:https://doi.org/10.1016/j.aspen.2021.07.019
- Stanley, J. & Preetha, G. 2024. Investigating the effect of chlorpyrifos and spirotetramat insecticides on the functional response of *Aenasius bambawalei*. *Entomology and Applied Science Letters*, 11(2): 40–47. DOI:https://doi.org/10.51847/uVDdv6yrPt

- Talebi, A.A., Kazemi, M., Rezaei, M., Mirhosseini, M.A. & Moharramipour, S. 2021. Host stage preference and temperature-dependent functional response of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae) on *Schizaphis graminum* (Hemiptera: Aphididae). International Journal of Tropical Insect Science, 42(1): 415–424. DOI:https://doi.org/10.1007/s42690-021-00558-9
- Tazerouni, Z., Talebi, A.A. & Rakhshani, E. 2011. The foraging behavior of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae) on *Diuraphis noxia* (Hemiptera: Aphididae). Archives of Biological Sciences, 63(1): 225–234. DOI:https://doi.org/10.2298/ABS1101225T
- Tazerouni, Z., Talebi, A.A. & Rakhshani, E. 2012. Temperature-dependent functional response of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae), a parasitoid of *Diuraphis noxia* (Hemiptera: Aphididae). Journal of the Entomological Research Society, 14(1): 31–40. DOI:https://entomol.org/journal/index.php/JERS/article/view/343
- Teder, T. & Knapp, M. 2019. Sublethal effects enhance detrimental impact of insecticides on non-target organisms: A quantitative synthesis in parasitoids. Chemosphere, 214: 371–378. DOI:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.132
- Tomasetto, F., Casanovas, P., Brandt, S.N. & Goldson, S.L. 2018. Biological control success of a pasture pest: Has its parasitoid lost its functional mojo? Frontiers in Ecology and Evolution, 6: 215. DOI:https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00215
- Trexler, J.C., McCulloch, C.E. & Travis, J. 1988. How can the functional response best be determined? Oecologia, 76(2): 206–214. DOI:https://doi.org/10.1007/BF00379954
- Trexler, J. C. & Travis, J. 1993. Nontraditional regression analysis. Ecology, 74(6): 1629–1637. DOI:https://doi.org/10.2307/1939921
- Theenoor, R., Ghosh, A. & Venkatesan, R. 2024. Harmonising control: Understanding the complex impact of pesticides on parasitoid wasps for enhanced pest management. Current Opinion in Insect Science, 65: 101236. DOI:https://doi.org/10.1016/j.cois.2024.101236
- Wu, J., Li, G., Lin, Z., Zhang, Y., Yu, W., Hu, R., Zhan, S. & Chen, Y. 2025. A chromosome-level genome assembly of the cabbage aphid *Brevicoryne brassicae*. Scientific Data, 12: 167. DOI:https://doi.org/10.1038/s41597-025-04501-2
- Yu, X.-L., Tang, R., Xia, P.-L., Wang, B., Feng, Y. & Liu, T.-X. 2020. Effects of prey distribution and heterospecific interactions on the functional response of *Harmonia axyridis* and *Aphidius gifuensis* to *Myzus persicae*. Insects, 11(6): 325. DOI:https://doi.org/10.3390/insects11060325
- Zhang, W. & Swinton, S.M. 2009. Incorporating natural enemies in an economic threshold for dynamically optimal pest management. Ecological Modelling, 220(9–10): 1315–1324. DOI:https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.01.027
- Zhou, W., Arcot, Y., Medina, R.F., Bernal, J., Cisneros-Zevallos, L. & Akbulut, M.E.S. 2024. Integrated Pest Management: An update on the sustainability approach to crop protection. ACS Omega, 9(40): 41130–41147. DOI:https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06628

Sublethal effect of the insecticides Flonicamid and Imidacloprid on the functional response of the parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae* to the cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae*

Maryam Forouzan¹, Farnaz Seyyedi Sahebari², Hossein Lotfalizadeh³, Azadeh Jarrahi⁴

1., 4. Assistant Professor, Researcher, Plant Protection Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran.

2., 3. Assistant professor, Professor, Plant Protection Research Department, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, AREEO, Tabriz, Iran.

Corresponding author: Maryam Forouzan, email: m.forouzan@areeo.ac.ir

Received: Feb., 01, 2026

12(2) 65–79

Accepted: Feb., 09, 2026

Abstract

The cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae*, is one of the major pests of the Brassicaceae family for which chemical control is one of the most common management methods. However, the use of these compounds requires careful evaluation within integrated pest management (IPM) programs because of its adverse effects on natural enemies. The parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae* is recognized as an important biological control agent of the cabbage aphid in many regions of the world. In this study, the sublethal effect of the insecticides flonicamid and imidacloprid were evaluated on the functional response of the parasitoid wasp, *D. rapae* to different densities of third-instar cabbage aphid nymphs to assess pesticide compatibility. A colony of *D. rapae* was established using mummified aphids collected from cabbage fields in Urmia County and maintained in small ventilated containers (20 mL) under controlled laboratory conditions. All rearing and experiments were conducted at 25 ± 1 °C, $60 \pm 5\%$ relative humidity, and a photoperiod of 16:8 h (L:D). Sublethal concentrations of the insecticides were determined using a direct spray method in bioassays (LC_{25} : flonicamid = 0.997 ppm and imidacloprid = 5.612 ppm). In the functional response experiment, different densities of aphid nymphs were exposed to a single female (≤ 24 h) wasp for 24 hours, and the nymphs were then maintained until mummification to determine the parasitism rate. The results showed that the functional response of *D. rapae* was type II in the control and flonicamid treatment, and type III in the imidacloprid treatment. The parameters of searching efficiency (a) and handling time (T_h) were affected by insecticide treatments; flonicamid (0.456 h^{-1}) had no significant effect on searching efficiency, whereas imidacloprid (0.00375 h^{-1}) significantly reduced it. In addition, handling time increased significantly in both treatments. The maximum attack rate in the flonicamid and imidacloprid treatments for *D. rapae* was 16.24 and 9.44 aphid nymphs, respectively. Therefore, flonicamid showed greater compatibility with *D. rapae* compared with imidacloprid and can be used in integrated management programs for the cabbage aphid. However, further studies are necessary on the effects of these insecticides on life table parameters and other behavioral characteristics of the parasitoid under laboratory and field conditions.

Keywords: Cabbage aphid, Functional response, *Diaeretiella rapae*, Integrated pest management