



اثرات زیرکشنده حشره کش های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید روی فراسنجه های جدول *Diaeretiella rapae* (Hym.: Braconidae) زندگی زنبور پارازیتوئید

مریم فروزان^{۱*}<https://orcid.org/0000-0002-5440-3329>فرناز سیدی صاحباری^۲<https://orcid.org/0000-0001-6186-7722>حسین لطفعلی زاده^۳<https://orcid.org/0000-0002-7927-819X>آزاده جراحی^۴<https://orcid.org/0009-0006-9482-9187>

۱ و ۴- بخش تحقیقات گیاه پزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران، ۲- بخش تحقیقات گیاه پزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران، ۳- بخش تحقیقات رده بندی حشرات، موسسه تحقیقات گیاه-پزشکی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده: شته مومی کلم، *Brevicoryne brassicae* (L.)، یکی از خسارتزاترین آفات کلزا است و زنبور پارازیتوئید *Diaeretiella rapae* (McIntosh) به عنوان یکی از عوامل کلیدی کنترل زیستی آن در برنامه های مدیریت تلفیقی آفات (IPM) شناخته می شود. با توجه به اهمیت اثرات زیرکشنده آفت کش ها بر دشمنان طبیعی، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات غلظت کشنده ۲۵ درصد (LC₂₅) فلونیکامید و ایمیداکلوپراید بر فراسنجه های جدول زندگی این زنبور انجام شد. آزمایش ها در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی، به روش پاشش مستقیم بر حشرات روی دیسک های برگی انجام شد. داده ها با استفاده از روش جدول زندگی سن-مرحله دو جنسی تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد هر دو حشره کش سبب افزایش طول دوره نابالغ، کاهش طول عمر حشرات کامل و کاهش باروری زنبور شدند. همچنین شاخص های جمعیتی شامل نرخ ذاتی افزایش جمعیت (I)، نرخ متاهی افزایش جمعیت (λ)، نرخ خالص تولیدمثل (R₀) و نرخ ناخالص تولیدمثل (GRR) در هر دو تیمار نسبت به شاهد کاهش یافت، در حالی که میانگین طول یک نسل (T) افزایش پیدا کرد. ایمیداکلوپراید در مقایسه با فلونیکامید اثرات منفی شدیدتری بر بیشتر ویژگی های زیستی و جمعیتی زنبور داشت و کاهش بیشتری در زنده ماندن، تولیدمثل و رشد جمعیت ایجاد کرد. به طور کلی، نتایج نشان داد که هر چند هر دو حشره کش دارای اثرات زیرکشنده بر این دشمن طبیعی هستند، فلونیکامید در مقایسه با ایمیداکلوپراید سازگاری بیشتری با برنامه های مدیریت تلفیقی آفات دارد. بنابراین، در صورت ضرورت استفاده از این ترکیبات، انتخاب آفت کش، زمان بندی مناسب کاربرد و توجه به فعالیت دشمنان طبیعی برای حفظ کارایی کنترل زیستی ضروری است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۴/۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۶/۱۱

واژه های کلیدی: شته مومی کلم، مدیریت تلفیقی آفات، نئونیکوتینوئید، نرخ ذاتی افزایش جمعیت

Citation: Forouzan, M., Seyyedi Sahebari, F., Lotfalizadeh, H. & Jarrahi, A. (2026). Sublethal effects of flonicamid and imidacloprid insecticides on life table parameters of *Diaeretiella rapae* (McIntosh) (Hym.: Braconidae). *Plant Pest Research*, 16(2), 31-47. DOI: <https://doi.org/10.22124/iprj.2026.34055.1701>



*Corresponding author: maryam_fourouzan@yahoo.com

مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی جهان است که به دلیل ارزش غذایی بالا و کاربردهای گسترده در صنایع غذایی، دارویی و تولید سوخت‌های زیستی از جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی برخوردار است (Bhatia et al., 2011). با این حال، عوامل زیستی مختلف به‌ویژه حشرات آفت به طور قابل توجهی تولید و عملکرد این محصول را محدود می‌کنند. در میان این آفات، شته‌ها از مهم‌ترین عوامل خسارت‌زا محسوب می‌شوند که با تغذیه از شیره گیاهی، موجب اختلال در رشد، کاهش فتوسنتز و در نهایت افت عملکرد و کیفیت محصول می‌شوند (Bhattacharya et al., 2019).

شته مومی کلم، (*Brevicoryne brassicae* (L.)) (Hemiptera: Aphididae)، یکی از مهم‌ترین آفات گیاهان خانواده چلیپائیان (Brassicaceae) و از گونه‌های غالب در مزارع کلزا به شمار می‌رود. این آفت با استقرار و تغذیه روی برگ‌ها، گل‌آذین‌ها و غلاف‌ها، خسارت مستقیم قابل توجهی به گیاه وارد کرده و موجب کاهش عملکرد و کیفیت دانه می‌شود (Pal & Singh, 2013). علاوه بر این، تغذیه شته مومی کلم باعث بدشکلی برگ‌ها، قاشقی‌شدن حاشیه آن‌ها، کاهش رشد رویشی و افت بازارپسندی محصول می‌شود. در شرایط آلودگی شدید، افزایش جمعیت آفت می‌تواند به کاهش چشمگیر عملکرد و حتی نابودی کامل گیاه منجر شود (Pooyan et al., 2024). همچنین گزارش‌های متعدد نشان داده‌اند که آلودگی شدید شته مومی کلم علاوه بر کاهش عملکرد، موجب افت درصد روغن دانه و وارد آمدن خسارت اقتصادی قابل توجه به مزارع کلزا می‌شود (Javed et al., 2026).

خسارت‌های ناشی از شته مومی کلم تنها به آسیب‌های مستقیم محدود نمی‌شود، بلکه خسارت‌های غیرمستقیم آن نیز اهمیت بالایی دارد. این آفت با تولید عسلک در سطح گیاه، شرایط مناسبی را برای رشد قارچ‌های دوده فراهم می‌کند که در نتیجه آن، سطح فتوسنتز کاهش یافته و کیفیت گیاه افت می‌کند. افزون بر این، شته مومی کلم به‌عنوان ناقل حدود ۲۳ نوع عامل بیماری‌زای ویروسی شناخته شده است که می‌تواند طیف وسیعی از گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار دهد (Pal & Singh, 2013). از این رو، مدیریت مؤثر شته مومی کلم یکی از اجزای اساسی برنامه‌های مدیریت تلفیقی آفات (IPM) در مزارع کلزا محسوب می‌شود و توسعه راهکارهای پایدار برای کنترل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Bhattacharya et al., 2019).

کنترل شته مومی کلم به‌طور معمول بر استفاده مکرر از حشره‌کش‌های شیمیایی، متکی بوده است. با این حال، کاربرد گسترده و مستمر این ترکیبات در طول زمان موجب بروز و گسترش مقاومت در جمعیت‌های این شته نسبت به حشره‌کش‌ها شده است. همچنین، استفاده گسترده از آفت‌کش‌های شیمیایی می‌تواند پیامدهای نامطلوبی بر کیفیت خاک و آب، سلامت انسان، ایمنی مواد غذایی و جمعیت موجودات مفید داشته باشد (Rani et al., 2021). این موضوع ضرورت بازنگری در راهبردهای مدیریتی و کاهش وابستگی به روش‌های شیمیایی را برجسته می‌سازد (Ahmad & Akhtar, 2013). از این رو، کنترل زیستی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت تلفیقی آفات، نقش مهمی در کاهش مصرف آفت‌کش‌های شیمیایی و حفظ پایداری زیست‌بوم‌های کشاورزی ایفا می‌کند (Nawaz et al., 2021). در این میان، زنبور پارازیتوئید (*Diaeretiella rapae* (McIntosh)) (Hymenoptera: Braconidae) به عنوان یکی از مهم‌ترین دشمنان طبیعی شته‌ها، به‌ویژه شته مومی کلم، در بسیاری از مناطق جهان شناخته می‌شود. این پارازیتوئید درون‌زی با تخم‌گذاری در بدن پوره‌های شته و تکمیل رشد لاروی داخل میزبان، موجب مومیایی شدن و در نهایت کاهش جمعیت آفت می‌شود (Halder et al., 2014). کارایی این عامل کنترل بیولوژیک تحت تأثیر عوامل زیستی و غیرزیستی قرار دارد، اما حفاظت از دشمنان طبیعی می‌تواند با افزایش زنده‌مانی و فراوانی آن، نیاز به استفاده از آفت‌کش‌های شیمیایی را کاهش دهد (Nawaz et al., 2021).

ارزیابی سازگاری آفت‌کش‌ها با برنامه‌های مدیریت تلفیقی آفات نیازمند بررسی جامع اثرات آن‌ها بر دشمنان طبیعی و سایر موجودات غیرهدف است (Schmidt-Jeffris et al., 2021). از آنجا که شاخص‌های متداول سمیت، نظیر LC_{50} ، تنها بخشی از

اثرات آفت کش ها را نشان می دهند، توجه به پیامدهای زیرکشنده این ترکیبات بر ویژگی های زیستی و جمعیتی موجودات مفید از اهمیت ویژه ای برخوردار است (Desneux et al., 2007).

آفت کش ها علاوه بر اثرات کشندگی، ممکن است از طریق بروز اثرات زیرکشنده بر ویژگی های زیستی و رفتاری دشمنان طبیعی، از جمله کاهش طول عمر، توان تولیدمثلی و کارایی جست و جو و پارازیته کردن میزبان، اثربخشی آن ها را در برنامه های کنترل زیستی محدود کنند (Desneux et al., 2007). ارزیابی اثرات آفت کش ها در سطح جمعیت، به ویژه بر دشمنان طبیعی و سایر موجودات غیرهدف، از الزامات توسعه برنامه های پایدار مدیریت تلفیقی آفات است. در این راستا، رویکردهای جمعیت شناختی با در نظر گرفتن هم زمان شاخص های زنده مانی و تولیدمثل، امکان برآورد دقیق تر پیامدهای آفت کش ها بر پویایی جمعیت ها را فراهم می کنند (Stark & Banks, 2003).

شواهد پژوهشی حاکی از آن است که بسیاری از حشره کش های متداول، علاوه بر اثرات کشندگی، از طریق پیامدهای زیرکشنده بر زنده مانی، رفتار و توان پارازیتسم زنبور *D. rapae* تأثیر گذاشته و در نتیجه اثربخشی این دشمن طبیعی را در برنامه های کنترل زیستی کاهش می دهند (Hsieh & Allen, 1986; Abo El-Ghar & El-Sayed, 1992; Umoru et al., 1996; Umoru et al., 2002; Acheampong & Stark, 2004; Lin et al., 2007; Xu et al., 2013; Rezaei et al., 2018; Overton et al., 2023; Akbari et al., 2024; Kolac et al., 2024; McDougall et al., 2024; Pooyan et al., 2024; Samih, 2025).

ایمیداکلوپراید از جمله حشره کش های توصیه شده برای کنترل شته مومی در مزارع کلزا است (Nourbakhsh, 2025). همچنین، نتایج بررسی های پیشین نشان داده اند که فلونیکامید نیز از حشره کش های مؤثر در کنترل شته ها بوده و کارایی مطلوبی در کاهش جمعیت این آفات دارد (Morita et al., 2007; Cho et al., 2011; Koo et al., 2015; Gul et al., 2023; Gul et al., 2025). ایمیداکلوپراید، حشره کشی از گروه نئونیکوتینوئیدهاست که با اثر بر گیرنده های نیکوتینی استیل کولین (nAChRs) موجب اختلال در انتقال عصبی و از بین رفتن حشره می شود و در گروه 4A IRAC قرار دارد (Crossthwaite et al., 2017; IRAC, 2026). فلونیکامید، حشره کشی از گروه پریدین کربوکسامایدها است که بر اساس بررسی های اخیر، در گروه ۲۹ طبقه بندی IRAC، یعنی مهارکننده های نیکوتینامیداز اندام های کوردونال قرار می گیرد. متابولیت فعال آن ۴-تری فلونورومتیل نیکوتینامید (TFNA-AM)، با مهار آنزیم نیکوتینامیداز (Naam) در نورون های کوردونال، موجب اختلال در رفتار حشره می شود (Liu et al., 2025).

بررسی منابع علمی نشان می دهد که تاکنون مطالعه ای در خصوص اثرات زیرکشنده حشره کش فلونیکامید بر زنبور پارازیتوئید *D. rapae* گزارش نشده است. اگرچه تعداد محدودی پژوهش به ارزیابی اثرات زیرکشنده حشره کش ایمیداکلوپراید بر فراسنجه های جدول زندگی این پارازیتوئید پرداخته اند، اما از نظر روش شناسی، شرایط آزمایش و نحوه ارزیابی پاسخ های زیستی با مطالعه حاضر تفاوت های قابل توجهی دارند (Akbari et al., 2024; McDougall et al., 2024; Samih, 2025). از این رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثرات زیرکشنده دو شته کش پرکاربرد، فلونیکامید و ایمیداکلوپراید، بر فراسنجه های جدول زندگی زنبور پارازیتوئید *D. rapae* انجام شد تا سازگاری این ترکیبات با برنامه های مدیریت تلفیقی شته مومی کلم مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش ها

پرورش شته میزبان و زنبور پارازیتوئید

به منظور ایجاد کلونی آزمایشگاهی شته مومی کلم، نمونه های اولیه از مزارع کلم واقع در شهرستان ارومیه جمع آوری شدند. پس از شناسایی گونه، شته ها به اتاق رشد منتقل و در شرایط کنترل شده شامل دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس، رطوبت نسبی 60 ± 5 درصد و دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی نگهداری شدند. حشرات روی بوته های کلم سفید کشت شده در گلدان های پلاستیکی مستقر شدند و پیش از انجام آزمایش ها سه نسل روی میزبان آزمایشگاهی پرورش یافتند. برای ایجاد کلونی زنبور

پارازیتوئید *D. rapae*، از شته‌های مومیایی شده جمع‌آوری شده از مزرعه کلم استفاده شد. این شته‌های مومیایی در ظروف پلاستیکی دارای تهویه مناسب و با حجم ۲۰ میلی‌لیتر در شرایط اتاق رشد قرار گرفتند تا زنبورهای بالغ از آن‌ها خارج شوند. تمام مراحل پرورش و آزمایش‌ها در شرایط محیطی یکسان انجام گرفت.

حشره‌کش‌های مورد استفاده

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

زیست‌سنجی شته مومی کلم

برای تعیین مقادیر LC₂₅ و LC₅₀، ابتدا غلظت‌های مورد نیاز بر اساس میزان توصیه‌شده روی برچسب حشره‌کش‌ها انتخاب شدند. غلظت توصیه‌شده برای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید به ترتیب ۲۰۰ و ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام بود. پس از انجام آزمایش‌های مقدماتی، پنج غلظت از هر حشره‌کش برای انجام زیست‌سنجی انتخاب شد. غلظت‌های فلونیکامید شامل ۰/۳، ۱/۵، ۷/۷، ۳۹/۴ و ۲۰۰ پی‌پی‌ام و غلظت‌های ایمیداکلوپراید شامل ۲۰/۵، ۶۴/۴، ۲۰۲/۴، ۶۳۶/۲ و ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام بودند. تیمار شاهد نیز شامل آب مقطر حاوی ۰/۰۵ درصد روغن سیتوویت در نظر گرفته شد. در هر سطح غلظت، چهار تکرار اجرا شد و در هر تکرار ۱۰ عدد پوره یک‌روزه سن سوم شته مومی کلم به صورت تصادفی انتخاب شدند. سپس حشرات به روش پاشش مستقیم روی دیسک‌های برگی تیمار شدند (Forouzan et al., 2025). برای این منظور، پوره‌ها روی دیسک‌های برگی کلم سفید با قطر ۵ سانتی‌متر قرار داده شدند. عملیات محلول‌پاشی با استفاده از سمپاش دستی مدل ۶۰۰۲ RH (Ronix®) - از فاصله ۱۵ سانتی‌متری انجام شد تا پوشش یکنواختی از محلول حشره‌کش روی سطح برگ ایجاد شود. پس از تیمار، برگ‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در شرایط آزمایشگاهی قرار گرفتند تا خشک شوند. سپس دیسک‌های برگی به ظروف پتری ۸ سانتی‌متری حاوی کاغذ صافی منتقل شدند. به منظور تأمین تهویه مناسب، سوراخی به قطر تقریبی ۳ سانتی‌متر روی درب ظروف پتری ایجاد و با توری ارگانزا پوشانده شد. نمونه‌های تیمار شده تا پایان آزمایش در همان شرایط محیطی مورد استفاده برای پرورش نگهداری شدند و میزان مرگ‌ومیر حشرات ۲۴ ساعت پس از تیمار ثبت شد (Forouzan et al., 2025). با توجه به گزارش‌های پیشین مبنی بر اینکه بیشترین میزان ترجیح زنبور پارازیتوئید *D. rapae* مربوط به پوره‌های سن سوم شته مومی کلم است (Khakasa et al., 2016)، در تمام آزمایش‌های زیست‌سنجی از این مرحله رشدی شته استفاده شد.

اثر غلظت‌های زیرکشنده حشره‌کش‌ها بر فراسنجه‌های جدول زندگی زنبور پارازیتوئید *D. rapae*

به منظور بررسی اثرات زیرکشنده حشره‌کش‌های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید بر ویژگی‌های زیستی و تولیدمثلی زنبور پارازیتوئید، از غلظت‌های LC₂₅ این ترکیبات که در آزمایش‌های زیست‌سنجی روی شته مومی کلم تعیین شده بودند، استفاده شد. مقادیر LC₂₅ برای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید به ترتیب ۰/۹۹۷ و ۵/۶۱۲ پی‌پی‌ام بود. در هر تیمار، ۵۰ عدد پوره سن سوم پارازیت‌شده روی دیسک‌های برگی با قطر ۵ سانتی‌متر که روی کاغذ صافی مرطوب درون ظرف‌های پتری ۸ سانتی‌متری قرار داده شده بودند، با غلظت زیرکشنده مربوطه محلول‌پاشی شدند. به منظور حفظ رطوبت مناسب، کاغذهای صافی به صورت روزانه مرطوب شدند. پس از تیمار، پوره‌های پارازیت‌شده حاوی تخم زنبور پارازیتوئید، که در مطالعه جدول زندگی به عنوان سن صفر در نظر گرفته شدند، تا زمان ظهور حشرات کامل زنبور در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی نگهداری شدند. پس از ظهور حشرات کامل، هر زنبور ماده به صورت انفرادی روی یک دیسک برگی حاوی پوره‌های سن سوم میزبان رهاسازی شد و روزانه ۳۰ پوره سن سوم در اختیار آن قرار گرفت. حشرات کامل با محلول آب و عسل ۲۰ درصد تغذیه شدند. برای تعیین باروری روزانه، زنبورهای ماده هر ۲۴ ساعت با استفاده از آسپیراتور به ظرف‌های جدید منتقل شدند و روند رشد و نمو و تولیدمثل آن‌ها به صورت روزانه پایش و ثبت شد. علاوه بر این، طول دوره پیش‌ازبلوغ و سایر پارامترهای زیستی مورد نظر در مراحل مختلف رشد اندازه‌گیری و ثبت شد.

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های حاصل از آزمایش بر پایه روش جدول زندگی سن-مرحله دو جنسی (Age-Stage, Two-Sex Life Table) تجزیه و تحلیل شدند (Chi & Liu, 1985; Chi, 1988). برای محاسبه فراسنجه‌های زیستی و جمعیتی از نرم‌افزار-TWOSEX MSChart نسخه ارائه شده توسط چی (Chi, 2018) استفاده شد. در این روش، سن افراد از زمان تولد (روز صفر) در نظر گرفته شد و نرخ ذاتی افزایش جمعیت (r) به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های رشد جمعیت برآورد شد (Goodman, 1982). به منظور تعیین دقت برآورد فراسنجه‌های جدول زندگی، خطای معیار میانگین‌ها با استفاده از روش بازنمونه‌گیری بوت‌استرپ (Bootstrap) و ۱۰۰,۰۰۰ تکرار محاسبه شد (Huang & Chi, 2012). برای تشکیل جدول زندگی، اطلاعات مربوط به تمام افراد از زمان تولد تا مرگ، شامل مدت رشد و نمو، تغییرات مراحل رشدی، زنده‌مانی، مرگ و میر و باروری روزانه به صورت مستمر ثبت و مورد استفاده قرار گرفت (Chi, 1988). فراسنجه‌های اختصاصی جدول زندگی شامل نرخ زنده‌مانی ویژه سن (l_x)، باروری ویژه سن (m_x) و نرخ زنده‌مانی ویژه سن-مرحله (s_{xj})؛ که در آن x بیانگر سن و j نشان‌دهنده مرحله رشدی است، محاسبه شدند. همچنین، شاخص‌های جمعیتی شامل نرخ ذاتی افزایش جمعیت (r)، نرخ متناهی افزایش جمعیت (λ)، نرخ خالص تولیدمثل (R_0)، نرخ ناخالص تولیدمثل (GRR) و میانگین طول یک نسل (T) بر اساس روابط ریاضی ارائه شده در روش جدول زندگی سن-مرحله دو جنسی برآورد شدند (Chi, 1988).

نتایج

بر اساس نتایج زیست‌سنجی، حشره‌کش‌های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید به ترتیب در غلظت‌های ۱۱/۹۶ و ۳۸/۲۴ پی‌پی‌ام موجب ۵۰ درصد مرگ و میر در جمعیت شته مومی کلم شدند (جدول ۱).

جدول ۱- تجزیه پروبیت حشره‌کش‌های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید روی شته مومی کلم، *Brevicoryne brassicae*

Table 1. Probit analysis of flonicamid and imidacloprid insecticides on cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae*

Insecticide	LC ₂₅ (ppm) (95% fiducial limits)	LC ₅₀ (ppm) (95% fiducial limits)	Slope±S.E.	χ^2 (df)	Number
Flonicamid	0.997 (0.276-2.235)	11.96 pp (5.96-25.84)	0.625 ± 0.101	0.671 (3)	240
Imidacloprid	5.612 ppm (1.297-12.398)	38.24 ppm (19.22-64.92)	0.809 ± 0.142	2.442 (3)	240

نتایج تجزیه آماری داده‌های مربوط به اثر دو حشره‌کش فلونیکامید و ایمیداکلوپراید بر طول دوره نابالغ و حشرات کامل زنبور در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس مقایسه میانگین فراسنجه‌های مورد بررسی، هر دو حشره‌کش موجب افزایش طول دوره نابالغ شته نسبت به شاهد شدند. بیشترین طول دوره نابالغ در زنبورهای حاصل از شته‌های پارازیت‌شده تیمار شده با ایمیداکلوپراید (۱۳/۹۲ ± ۰/۲۰ روز) مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار مربوط به تیمار شاهد (۱۰/۶۵ ± ۰/۲۴ روز) بود. نتایج همچنین نشان داد که طول عمر حشرات کامل زنبور تحت تأثیر غلظت LC₂₅ هر دو حشره‌کش قرار گرفت، به طوری که تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید موجب کاهش طول عمر حشرات کامل نسبت به شاهد شدند. نرخ زنده‌مانی پیش از بلوغ در تیمار ایمیداکلوپراید (۶۵/۰ ± ۷۹/۰۷ درصد) با شاهد (۸۹/۴۷ ± ۰/۰۵ درصد) تفاوت معنی‌داری داشت، در حالی که تیمار فلونیکامید (۷۸/۹۵ ± ۰/۰۶ درصد) با شاهد و تیمار ایمیداکلوپراید تفاوت معنی‌داری نشان نداد. بررسی میزان باروری نسل F1 نشان داد که غلظت زیرکشنده حشره‌کش‌ها اثر معنی‌داری بر تولیدمثل داشته است. تعداد نتاج تولیدشده توسط زنبورهای تیمار شده با فلونیکامید (۲۹/۷۶ ± ۱/۰۶)

و ایمیداکلوپراید ($1/26 \pm 20/28$) در مقایسه با شاهد ($1/43 \pm 40/13$) کاهش یافت. طول دوره تخمیزی زنبور *D. rapae* نیز به طور معنی داری تحت تاثیر غلظت‌های زیر کشنده حشره‌کش‌های مورد مطالعه قرار گرفت. این فراسنجه در مقایسه با شاهد ($6/0 \pm 22/27$) در هر دو تیمار حشره‌کش کاهش یافت؛ به طوری که میزان کاهش در تیمار ایمیداکلوپراید ($3/22 \pm 0/32$ روز) بیشتر از فلونیکامید ($5/14 \pm 0/3$) روز بود. دوره پیش از تخمیزی کل در هر دو تیمار حشره‌کش، به طور معنی داری نسبت به شاهد ($11/0 \pm 22/29$) روز افزایش یافت؛ در حالی که دوره پیش از تخمیزی حشرات کامل در تیمارهای ایمیداکلوپراید ($14/0 \pm 5/3$) روز و فلونیکامید ($13/05 \pm 0/42$) روز، تفاوت معنی داری با یکدیگر و شاهد نداشتند (جدول ۲).

جدول ۲- اثرات زیر کشنده (LC_{25}) حشره‌کش‌های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید روی ویژگی‌های زیستی زنبور پارازیتوئید

Diaeretiella rapae

Table 2. Sublethal effects (LC_{25}) of flonicamid and imidacloprid insecticides on biological properties of parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae*

Parameters	Control	Flonicamid	Imidacloprid
Developmental time (day)	10.65±0.24 ^{c*}	12.23±0.31 ^b	13.92±0.2 ^a
Female adult (day)	7.48±0.34 ^a	6.71±0.37 ^a	4.61±0.33 ^b
Male adult (day)	5.36±0.22 ^a	3.89±0.39 ^b	2.43±0.2 ^c
Preadult survival rate (%)	89.47±0.05 ^a	78.95±0.06 ^{ab}	65.79±0.07 ^b
Fecundity (eggs/female)	40.13±1.43 ^a	29.76±1.06 ^b	20.28±1.26 ^c
Oviposition Period (days)	6.22±0.27 ^a	5.14±0.3 ^b	3.22±0.32 ^c
TPOP (days)	11.22±0.29 ^c	13.05±0.42 ^b	14.5±0.3 ^a
APOP (days)	0.17±0.08 ^a	0.38±0.13 ^a	0.39±0.14 ^a

*Different letters in each row indicate significant differences between treatments at the 5% level based on the bootstrap method with 100,000 repetitions; (TPOP: Total pre-oviposition period; APOP: Adult pre-oviposition period)

نتایج مقایسه میانگین فراسنجه‌های جدول زندگی زنبور پارازیتوئید *D. rapae* در جدول ۳ نشان داده شده است. کمترین نرخ خالص تولیدمثل (R_0) در تیمار ایمیداکلوپراید ($1/74 \pm 9/60$ نتاج) مشاهده شد؛ باین حال، این مقدار با شاهد ($3/28 \pm 24/28$ نتاج) و تیمار فلونیکامید ($2/46 \pm 16/44$ نتاج) تفاوت معنی داری داشت. همچنین، نرخ ناخالص تولیدمثل (GRR) در تیمار ایمیداکلوپراید برابر با $2/08 \pm 21/89$ نتاج به ازای هر ماده بود که با شاهد ($2/91 \pm 39/34$ نتاج) و تیمار فلونیکامید ($4/82 \pm 33/37$ نتاج) تفاوت معنی داری داشت.

نرخ ذاتی افزایش جمعیت (r)، به عنوان مهم‌ترین فراسنجه در شاخص‌های رشد جمعیت پایدار نیز تحت تأثیر هر دو حشره‌کش کاهش یافت؛ به طوری که کمترین مقدار آن در تیمار ایمیداکلوپراید ($0/11 \pm 0/136$) و بیشترین مقدار آن در شاهد ($0/01 \pm 0/216$) ثبت شد. همچنین نرخ متناهی افزایش جمعیت (λ) در تیمارهای حشره‌کش نسبت به شاهد ($0/12 \pm 1/24$ بر روز) کاهش یافت و کمترین مقدار آن در تیمار ایمیداکلوپراید ($0/13 \pm 1/14$ بر روز) مشاهده شد. این شاخص بیانگر نسبت افزایش روزانه جمعیت در شرایط پایدار است. مدت زمان یک نسل (T) در تیمارهای ایمیداکلوپراید ($0/32 \pm 16/51$ روز) و فلونیکامید ($0/47 \pm 15/77$) روز تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند، در حالی که هر دو تیمار با شاهد ($0/26 \pm 14/7$ روز) تفاوت معنی داری داشتند.

جدول ۳- اثرات زیر کشنده (LC_{25}) حشره کش های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید بر فراسنجه های جدول زندگی (میانگین $\pm$ خطای

معیار) زنبور پارازیتوئید *Diaeretiella rapae*

Table 3. Sublethal effects (LC_{25}) of flonicamid and imidacloprid insecticides on population growth parameters (mean $\pm$ standard error) of parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae*

Parameters	Control	Flonicamid	Imidacloprid
R_0 (offspring)	24.28 $\pm$ 3.28 ^a	16.44 $\pm$ 2.46 ^a	9.60 $\pm$ 1.74 ^b
GRR (offspring)	39.34 $\pm$ 2.91 ^a	33.37 $\pm$ 2.48 ^a	21.89 $\pm$ 2.080 ^b
r (d^{-1})	0.2169 $\pm$ 0.0104 ^a	0.1775 $\pm$ 0.0116 ^b	0.1369 $\pm$ 0.0116 ^c
λ (d^{-1})	1.24 $\pm$ 0.012 ^a	1.19 $\pm$ 0.013 ^b	1.14 $\pm$ 0.013 ^c
T (d)	14.7 $\pm$ 0.26 ^b	15.77 $\pm$ 0.47 ^a	16.51 $\pm$ 0.32 ^a

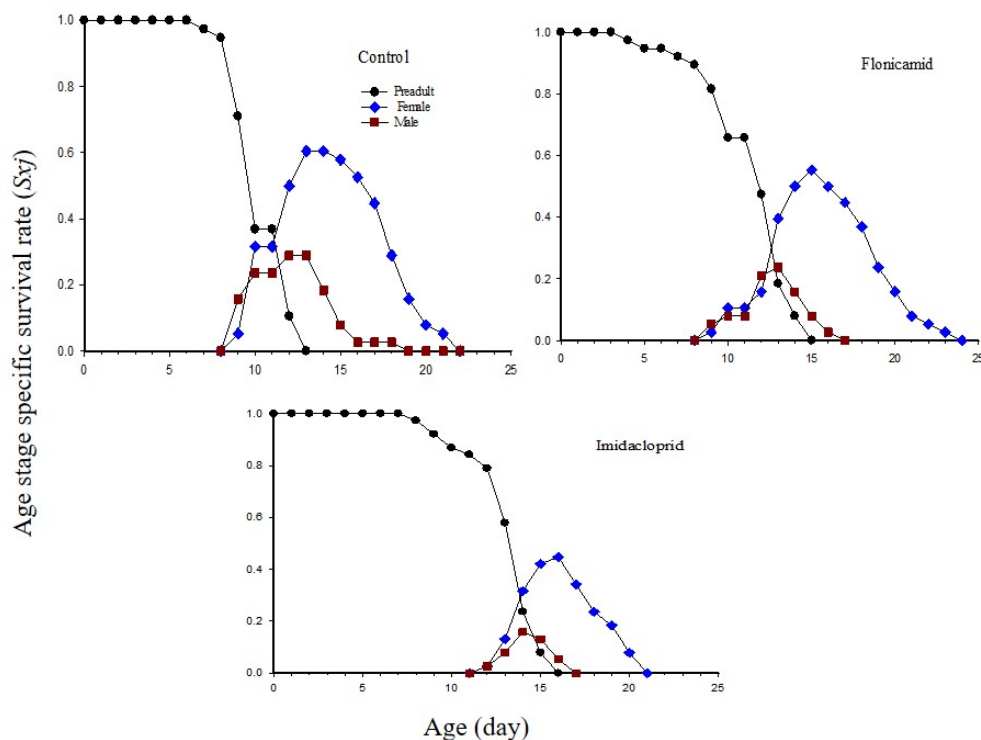
Different letters in each row indicate significant differences between treatments at the 5% level based on the bootstrap method with 100,000 repetitions, (R_0 : Net reproductive rate, GRR : Gross reproductive rate, r : Intrinsic rate of increase, λ : Finite rate of population increase, T : Mean generation time)

منحنی های مربوط به نرخ زنده ماندنی ویژه سن -مرحله زیستی زنبور (s_{xj}) تحت تأثیر تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید و شاهد در شکل ۱ ارائه شده اند. این فراسنجه علاوه بر توصیف نرخ زنده ماندنی، الگوی تغییرات رشد و نمو در میان افراد مختلف را نیز نشان می دهد و امکان تطبیق مراحل مختلف زیستی را در طول دوره رشد فراهم می سازد. در واقع، تفکیک نرخ زنده ماندنی به مراحل زیستی مختلف از ویژگی های روش جدول زندگی دو جنسی ویژه سن -مرحله زیستی است که در روش های سنتی تحلیل جدول زندگی وجود ندارد. به طور کلی، کاهش نرخ زنده ماندنی مرحله ماده بالغ در غلظت های زیر کشنده حشره کش های مورد بررسی نسبت به شاهد مشاهده شد. منحنی امید به زندگی ویژه سن -مرحله رشدی زنبور در شکل ۲ نشان داده شده است. این منحنی بیانگر مدت زمانی است که یک فرد در سن x و مرحله رشدی j انتظار زنده ماندن دارد. امید به زندگی حشرات کامل در تیمار ایمیداکلوپراید نسبت به شاهد کاهش نشان داد؛ به طوری که این مقدار در تیمار ایمیداکلوپراید ۶/۷ روز و در شاهد ۹/۵۲ روز بود.

بررسی منحنی های زادآوری ناخالص ویژه سنی (m_x) و زادآوری خالص ویژه سنی ($l_x m_x$) نشان داد که تیمار ایمیداکلوپراید موجب اثرات منفی بر حشرات بالغ زنبور شده و شروع تخم ریزی را نسبت به شاهد به تأخیر می اندازد (شکل ۳). بیشترین نرخ زادآوری ناخالص (m_x) و خالص ($l_x m_x$) ویژه سنی در تیمار فلونیکامید به ترتیب برابر با ۵/۳۵ تخم و ۳/۰۲ نتاج مشاهده شد. در تیمار ایمیداکلوپراید این مقادیر به ترتیب ۵/۳۱ تخم و ۲/۶۵ نتاج به دست آمد، در حالی که گروه شاهد با مقادیر ۵/۶ تخم و ۴/۴۲ نتاج بالاترین میزان m_x و $l_x m_x$ به را نشان داد. در مجموع، هر دو تیمار حشره کش موجب کاهش میزان زادآوری نسبت به شاهد شدند.

نمودارهای ارزش تولیدمثلی زنبور در تیمارهای مختلف که نقش افراد را در تشکیل جمعیت نسل بعد نشان می دهند، در شکل ۴ ارائه شده اند. همان طور که مشاهده می شود، در تمام تیمارها افراد ماده بیشترین نقش را در تشکیل جمعیت نسل آینده داشته و بیشترین مشارکت آن ها در زمان اوج تخم ریزی رخ داده است. از آنجا که افراد نر قادر به تخم ریزی نیستند، ارزش تولیدمثلی برای آن ها محاسبه نشده است. بیشترین ارزش تولیدمثلی مربوط به شاهد (۱۷/۲۲ تخم در روز دوازدهم) بود، در حالی که این مقدار در تیمار ایمیداکلوپراید (۷/۰۹ تخم در روز چهاردهم) و فلونیکامید (۱۱/۲۹ تخم در روز دوازدهم) ثبت شد. نتایج نشان داد که تیمارهای مورد بررسی موجب کاهش ارزش تولیدمثلی نسبت به شاهد شده اند.

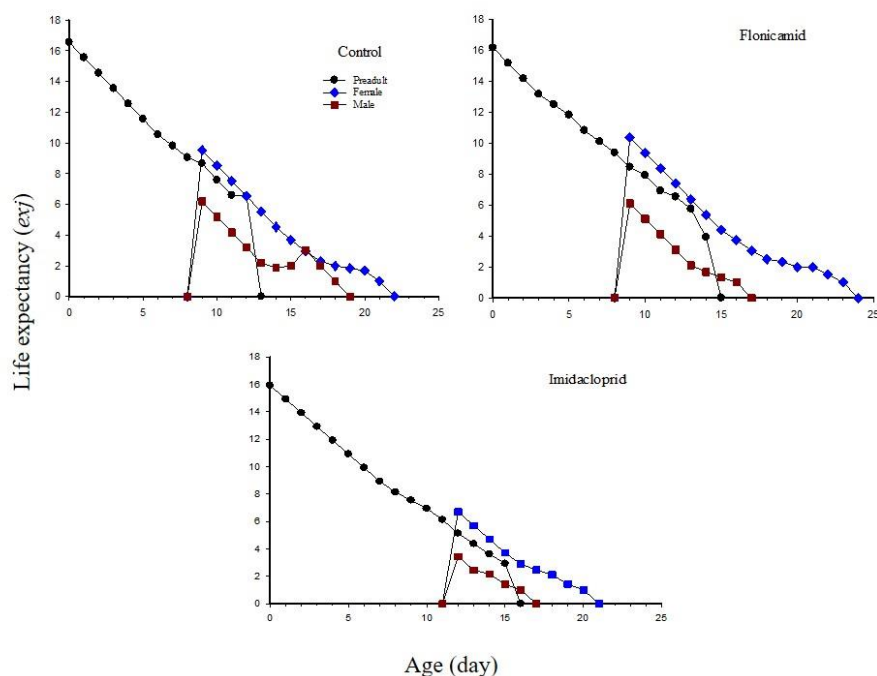
شکل ۵ اثرات تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید را بر تغییرات و پیش بینی رشد جمعیت زنبور پارازیتوئید به تفکیک مراحل سنی طی ۶۰ روز نشان می دهد. نتایج نشان داد که در شرایط عدم تیمار (شاهد)، اندازه جمعیت به علت بالا بودن نرخ ذاتی افزایش جمعیت پس از دو ماه به بیشترین مقدار خود می رسد، در حالی که در معرض تیمارهای فلونیکامید و ایمیداکلوپراید، رشد جمعیت به طور قابل توجهی کاهش می یابد. شکل ۶ روند رشد جمعیت کل زنبور پارازیتوئید را در تیمارهای مختلف نشان می دهد. بیشترین سرعت رشد جمعیت در شاهد و کمترین آن در تیمار ایمیداکلوپراید مشاهده شد.



شکل ۱- اثرات زیرکشننده حشره کش های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید روی نرخ زنده ماننی ویژه سن-مرحله رشدی (S_{xj}) زنبور

پارازیتوئید *Diaeretiella rapae*

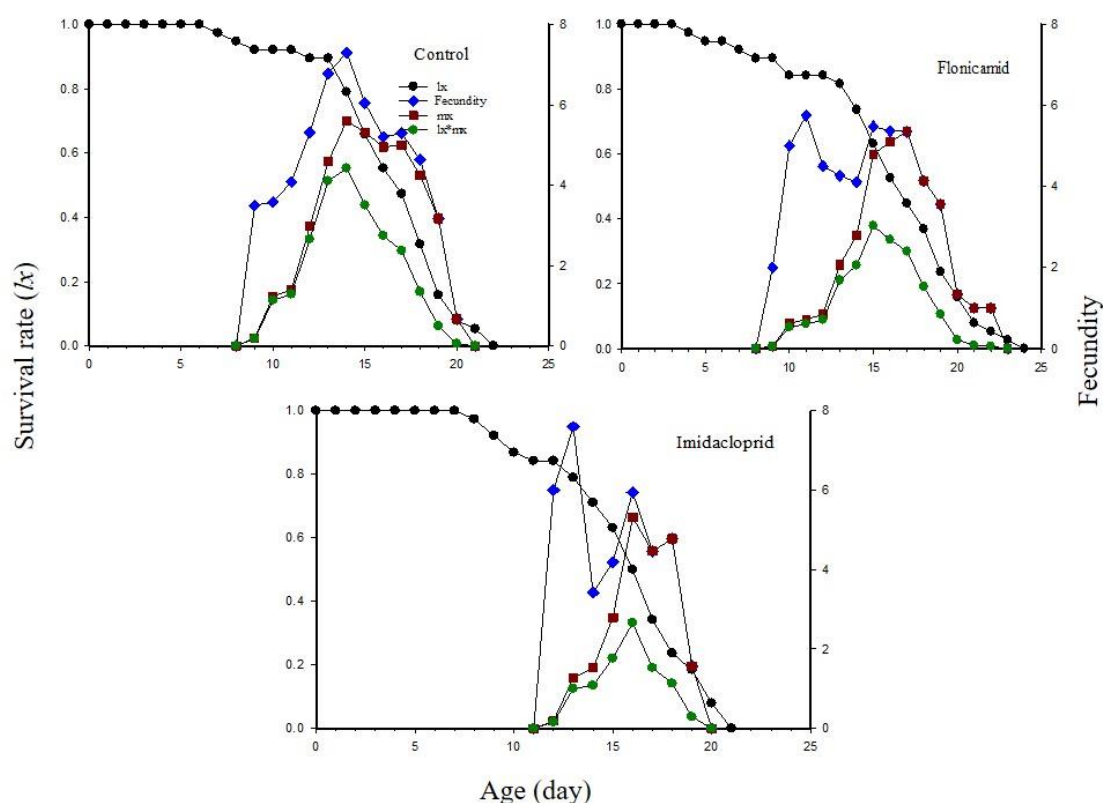
Figure 1. Sublethal effects of flonicamid and imidacloprid on age-stage specific survival rate (S_{xj}) of parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae*



شکل ۲- اثرات زیرکشننده حشره کش های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید روی منحنی امید به زندگی سن-مرحله رشدی (e_{xj}) زنبور

پارازیتوئید *Diaeretiella rapae*

Figure 2. Sublethal effects of flonicamid and imidacloprid on age-stage life expectancy curve (e_{xj}) of parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae*



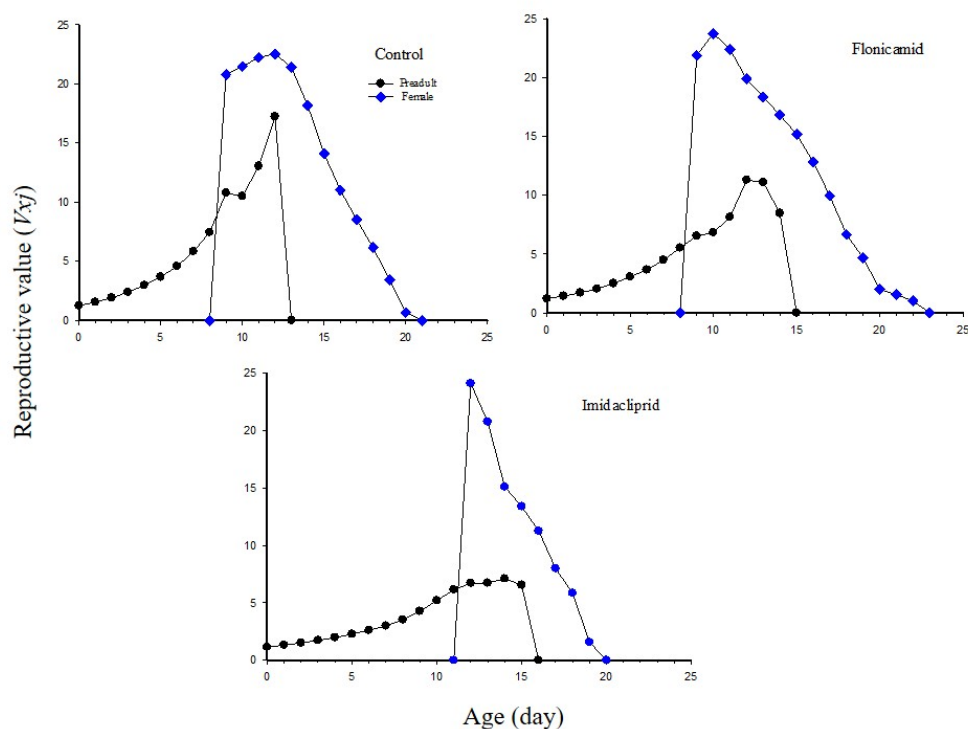
شکل ۳- اثرات زیرکشنده حشره کش های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید روی منحنی های نرخ زندهمانی ویژه سنی (l_x)، باروری ویژه

سن-مرحله رشدی (m_x) و زادآوری ویژه سنی ($l_x m_x$) زنبور پارازیتوئید *Diaeretiella rapae*

Figure 3. Sublethal effects of flonicamid and imidacloprid on age-specific survival (l_x), age-stage specific fertility (m_x) and age-specific fertility ($l_x m_x$) curves of parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae*

بحث

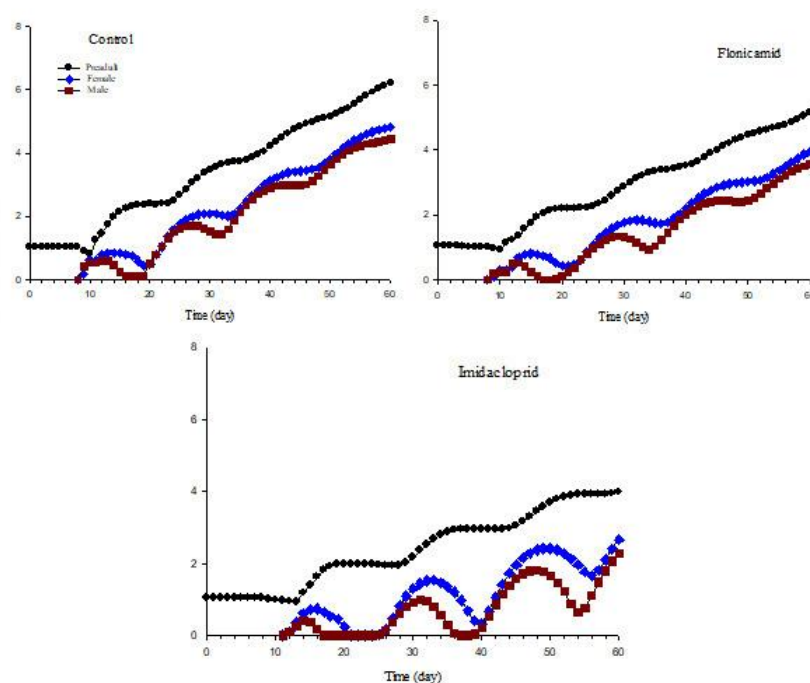
بررسی های پیشین نشان داده اند که تماس مستقیم با آفت کش های شیمیایی می تواند بیشترین اثرات زیرکشنده کوتاه مدت را بر دشمنان طبیعی وارد کند (Amarasekare et al., 2016). این اثرات اغلب به صورت تغییر در شاخص های زیستی نظیر زندهمانی، رشد، باروری، طول عمر و رفتار ظاهر شده و در نهایت موجب کاهش کارایی این عوامل مفید در برنامه های کنترل زیستی می شوند (Desneux et al., 2007). در این راستا، ارزیابی اثرات آفت کش ها بر اساس فراسنجه های جدول زندگی، به دلیل تلفیق شاخص های جمعیتی و ویژگی های زیستی در طول چرخه زیستی، رویکردی جامع تر و دقیق تر نسبت به روش های متداول ارائه می دهد که ضمن آشکارسازی اثرات پنهان و بلندمدت این ترکیبات، تصویری واقع بینانه تر از پیامدهای آنها بر پویایی جمعیت دشمنان طبیعی فراهم می کند (Stark & Banks, 2003). از این رو، تحلیل جدول زندگی به عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی خطرات اکولوژیک آفت کش ها و تعیین میزان سازگاری آنها با برنامه های مدیریت تلفیقی آفات (IPM) مورد توجه ویژه قرار گرفته است (Stark et al., 2004).



شکل ۴- اثرات زیرکشنده حشره کش های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید روی ارزش تولیدمثل ویژه سنی - مرحله رشدی (V_{xj}) زنبور

پارازیتوئید *Diaeretiella rapae*

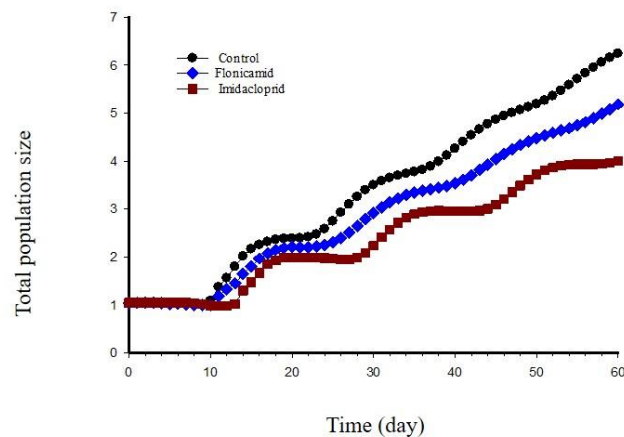
Figure 4. Sublethal effects of flonicamid and imidacloprid on age-stage specific reproductive value (v_{xj}) of parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae*



شکل ۵- پیش بینی پتانسیل رشد جمعیت و ساختار مرحله زنبور پارازیتوئید، *Diaeretiella rapae* تیمار شده با فلونیکامید و

ایمیداکلوپراید در مقایسه با شاهد در طول ۶۰ روز

Figure 5. Projection of population growth potential and stage structure of the parasitoid wasp *Diaeretiella rapae* treated with flonicamid and imidacloprid compared with control over 60 days



شکل ۶- پیش‌بینی رشد جمعیت کل *Diaeretiella rapae* تیمار شده با فلونیکامید و ایمیداکلوپراید در مقایسه با شاهد در طول ۶۰ روز

Figure 6. Population projection of *Diaeretiella rapae* treated with flonicamid and imidacloprid compared with control over 60 days

نتایج این پژوهش نشان داد که قرارگیری زنبور پارازیتوئید *D. rapae* در معرض غلظت زیرکشنده (LC_{25}) حشره‌کش‌های فلونیکامید و ایمیداکلوپراید، اثرات نامطلوبی بر فراسنجه‌های جدول زندگی این گونه دارد. به‌طور کلی، ایمیداکلوپراید تأثیر منفی شدیدتری بر شاخص‌های جمعیتی زنبور داشت؛ به‌گونه‌ای که موجب کاهش معنی‌دار باروری متوسط، دوره تخم‌گذاری و طول عمر حشرات بالغ شد. اگرچه فلونیکامید نیز روند مشابهی را نشان داد، اما در برخی از شاخص‌های جمعیتی شامل نرخ خالص تولیدمثل (R_0) و نرخ ناخالص تولیدمثل (GRR) اختلاف معنی‌داری نسبت به شاهد مشاهده نشد. این یافته‌ها بیانگر آن است که شدت اثرات زیان‌بار فلونیکامید بر پویایی جمعیت *D. rapae* کمتر از ایمیداکلوپراید است. علاوه بر این، نرخ ذاتی افزایش جمعیت (r) و نرخ متناهی افزایش جمعیت (λ) در هر دو تیمار حشره‌کش به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. از آنجا که این دو شاخص از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی رشد و پایداری جمعیت محسوب می‌شوند، کاهش آن‌ها نشان‌دهنده تأثیر منفی قابل توجه هر دو ترکیب بر توان بالقوه رشد جمعیت این دشمن طبیعی است. بنابراین، حتی در غلظت‌های زیرکشنده، فلونیکامید و به‌ویژه ایمیداکلوپراید می‌توانند با اختلال در ویژگی‌های زیستی و تولیدمثلی *D. rapae*، کارایی این پارازیتوئید را در برنامه‌های مدیریت تلفیقی آفات تحت تأثیر قرار دهند.

کاهش نرخ ذاتی افزایش جمعیت (r) می‌تواند ناشی از تغییر در مؤلفه‌های اصلی بقا و تولیدمثل باشد. در این پژوهش، افزایش دوره پیش از تخم‌ریزی (APOP) شروع تولیدمثل را به تأخیر انداخته و در کنار کاهش زنده‌مانی پیش از بلوغ و کاهش باروری، تعداد و زمان‌بندی نتاج واردشونده به نسل بعد را تحت تأثیر قرار داد؛ مجموعه این تغییرات در نهایت به کاهش مقدار r منجر شد. همچنین، طول دوره یک نسل (T) در تیمارهای حشره‌کش در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که می‌توان آن را به افزایش طول دوره‌های رشد و نمو و کاهش نرخ ذاتی افزایش جمعیت (r) نسبت داد؛ زیرا T با r رابطه معکوس دارد.

یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های پیشین درباره اثرات نامطلوب حشره‌کش‌های شیمیایی بر ویژگی‌های زیستی و رفتاری زنبور پارازیتوئید *D. rapae* هم‌خوانی دارد. به عنوان مثال، در یک مطالعه آزمایشگاهی که با هدف ارزیابی اثر پنج حشره‌کش بر این زنبور پارازیتوئید انجام شد مشخص شد که دیازینون بیشترین تاثیر را در جلوگیری از خروج زنبورها از میزبان‌های مومیایی شده داشته است. پس از آن، به ترتیب مالاتیون، پرمترین، متومیل و آسفیت در رتبه‌های بعدی از نظر میزان اثرگذاری قرار گرفتند (Hsieh & Allen, 1986). همچنین، برخی ترکیبات مانند آسفیت و پرمترین موجب کاهش معنی‌دار زنده‌مانی حشرات کامل در روز نخست پس از ظهور شدند، هرچند اثر معنی‌داری بر طول عمر و باروری افراد زنده‌مانده مشاهده نشد. در مطالعه‌ای دیگر، اثر انتخابی پنج حشره‌کش بر شته مومی کلم و زنبور پارازیتوئید آن، *D. rapae* ارزیابی شد. نتایج نشان داد که پاپروتوئیدهای مصنوعی ترالومتترین و سایپرمتترین بیشترین اثر را بر شته و پارازیتوئیدهای درون شته‌های مومیایی شده داشتند، در حالی که متومیل کمترین سمیت را نشان داد. تمام حشره‌کش‌ها در غلظت‌های توصیه‌شده مزرعه‌ای موجب کاهش ۵۵ تا ۹۷ درصدی خروج پارازیتوئیدهای بالغ شدند و زنده‌مانی و طول عمر افراد خارج‌شده نیز به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. علاوه‌براین، متومیل و سایپرمتترین در نسل F1 موجب کاهش حدود ۷۵ درصدی باروری شدند. اگرچه درصد خروج نسل F1 تحت تأثیر قرار نگرفت، اما زنده‌مانی و طول عمر حشرات کامل در بیشتر تیمارها کاهش یافت. این اثرات در نسل F2 نیز ادامه داشته و باروری ماده‌ها همچنان کمتر از شاهد بود (Abo El-Ghar & El-Sayed, 1992). این نتایج با یافته‌های پژوهش حاضر در خصوص اثرات منفی حشره‌کش‌ها بر عملکرد زیستی *D. rapae* مطابقت دارد. بررسی‌های متعددی نیز اثرات زیرکشنده حشره‌کش‌ها بر رفتار جست‌وجوگری و توانایی پارازیته کردن این زنبور را تأیید کرده‌اند. مشخص شده است که حشره‌کش پیریمیکارب موجب کاهش مدت زمان جست‌وجو و افزایش رفتارهای اجتنابی در زنبور پارازیتوئید *D. rapae* می‌شود (Umoru et al., 1996). همچنین، گزارش شده است که پیریمیکارب و دیمتوات، از طریق تأثیر بر میزبان آلوده، سبب کاهش کارایی زنبور پارازیتوئید *D. rapae* شدند (Umoru et al., 2002). دیمتوات با ایجاد دافعه شیمیایی در سطح شته‌های تیمار شده، رفتار تخم‌گذاری را مختل کرده و نرخ حمله و تشکیل مومیایی را کاهش داد. در مقابل، پیریمیکارب موجب افت موفقیت تولیدمثلی، کاهش میزان پارازیته کردن و تغییر نسبت جنسی نتاج به نفع نرها شد (Umoru et al., 2002). این نتایج نشان می‌دهد که حتی در غلظت‌های زیرکشنده حشره‌کش‌ها می‌توانند عملکرد کنترل زیستی پارازیتوئیدها را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهند. به‌طور مشابه، کاربرد غلظت‌های زیرکشنده برخی حشره‌کش‌ها بر شته خردل، *Lipaphis erysimi* (Kalt) موجب کاهش معنی‌دار میزان تشکیل مومیایی توسط زنبور *D. rapae* شده است (Lin et al., 2007). این یافته با نتایج پژوهش حاضر، مبنی بر کاهش زنده‌مانی و توان تولیدمثلی زنبور در مواجهه با غلظت‌های زیرکشنده حشره‌کش‌ها همسو است. اثر منفی ترکیبات غیرحشره‌کش نیز بر این پارازیتوئید گزارش شده است. به‌طوری‌که علفکش پاراکوات در غلظت مزرعه‌ای موجب مرگ‌ومیر کامل *D. rapae* شده و در غلظت‌های زیرکشنده نیز درصد ظهور، طول عمر، توان پارازیته کردن و رفتارهای مرتبط با تخم‌گذاری را به‌طور معنی‌داری کاهش داده است (Xu et al., 2013). این نتایج بیانگر حساسیت بالای این پارازیتوئید به ترکیبات شیمیایی مختلف است. در زمینه اثرات جمعیتی، مشخص شده است که تیماتوکسام و پیریمیکارب موجب کاهش نرخ ذاتی افزایش جمعیت (r)، نرخ خالص تولیدمثل (R_0)، نرخ متناهی افزایش جمعیت (λ)، طول عمر حشرات کامل، دوره تخم‌ریزی و باروری *D. rapae* می‌شوند. پیریمیکارب نیز روند مشابهی را نشان داده است، هرچند اثر معنی‌داری بر طول نسل مشاهده نشده است (Rezaei et al., 2018). همچنین، گزارش شده است که دینوتفوران موجب کاهش نرخ تولیدمثل خالص و ناخالص، نرخ ذاتی افزایش جمعیت و درصد ظهور حشرات کامل در این پارازیتوئید می‌شود (Pooyan et al., 2024). این یافته‌ها با نتایج تحقیق حاضر در مورد کاهش ویژگی‌های جمعیتی و توان تولیدمثلی *D. rapae* مطابقت دارند. با این حال، تمام حشره‌کش‌ها اثرات مشابهی بر پارازیتوئیدها ندارند. به‌طوری‌که، پی‌متروزین در غلظت مورد آزمایش نه تنها اثر سمی قابل توجهی بر *D. rapae* نداشت، بلکه موجب افزایش نرخ ذاتی رشد جمعیت نسبت به شاهد نیز شد (Acheampong & Stark, 2004). این تفاوت احتمالاً ناشی از تفاوت در نحوه اثر، گروه شیمیایی و ویژگی‌های اختصاصی

حشره کش مورد استفاده باشد. نتایج بررسی ها در مورد فلونیکامید نیز یکسان نبوده است. گزارش شده است که فلونیکامید، آفیدوپروپین و گاما-سای هالوترین اگرچه دارای سمیت حاد پائینی بودند، اما اثرات زیرکشنده ای نظیر کاهش باروری در برخی پارازیتوئیدهای شته از جمله *Aphidius colemani* (Viereck) و *Aphelinus abdominalis* (Dalman) ایجاد کردند (McDougall et al., 2024). در مقابل، فلونیکامید و آفیدوپروپین از کم خطرترین حشره کش ها برای *D. rapae* و سایر پارازیتوئیدهای مهم شته ها نظیر *A. colemani* و *A. abdominalis* معرفی شده اند (Overton et al., 2023). همچنین، در شرایط مزرعه ای اثر معنی داری از فلونیکامید بر درصد پارازیتسم زنبور *D. rapae* روی شته خردل مشاهده نشد (Chaudhary et al., 2016). این اختلاف نتایج احتمالاً به تفاوت در نوع میزبان مورد مطالعه مربوط می شود. در مورد ایمیداکلوپراید، نتایج پژوهش حاضر با گزارش های متعددی همسو است. نشان داده شده است که این حشره کش در غلظت های بالا موجب ۸۰ تا ۹۰ درصد مرگ و میر در جمعیت *D. rapae* می شود (Nawaz et al., 2021). همچنین، غلظت زیرکشنده (LC_{25}) ایمیداکلوپراید باعث کاهش طول عمر، باروری و فراسنجه های جدول زندگی شامل R_0 ، r ، λ و T و افزایش مدت زمان دو برابر شدن جمعیت (DT) می شود (Akbari et al., 2024). در مقابل، گزارش شده است که ایمیداکلوپراید و اسپیروتترامات در مقایسه با سیانترانیلیپرول اثر بازدارندگی کمتری بر فراسنجه های جمعیتی *D. rapae* دارند (Samih, 2025). این تفاوت می تواند ناشی از تفاوت در شرایط محیطی، جمعیت مورد مطالعه، غلظت های آزمایشی و روش های ارزیابی باشد. علاوه بر این، بررسی اثرات کشنده و زیرکشنده اسپیروتترامات، ایمیداکلوپراید و مخلوط آن ها بر شفیره های *D. rapae* نشان داد که ایمیداکلوپراید از غلظت نصف مقدار توصیه شده مزرعه ای به بعد موجب کاهش بیش از ۳۰ درصدی خروج حشرات کامل و افزایش مدت رشد درون میزبانی می شود. با این حال، برخلاف نتایج پژوهش حاضر، هیچ یک از تیمارها اثر معنی داری بر طول عمر حشرات کامل، نسبت جنسی و درصد پارازیتسم در نسل در معرض تماس نداشتند (Kolac et al., 2024). این اختلاف می تواند ناشی از تفاوت در مرحله رشدی مورد بررسی، شرایط آزمایشگاهی و نوع شاخص های ارزیابی شده باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که فلونیکامید و ایمیداکلوپراید، با وجود کارایی مطلوب در کنترل شته مومی کلم، می توانند بر عملکرد زیستی و برخی فراسنجه های جدول زندگی زنبور پارازیتوئید *D. rapae* به عنوان یکی از دشمنان طبیعی مهم این آفت، اثرات نامطلوبی داشته باشند. در مقایسه بین دو حشره کش مورد مطالعه، فلونیکامید اثرات منفی خفیف تری بر نرخ ذاتی افزایش جمعیت (r) به عنوان بنیادی ترین و مهم ترین فراسنجه جدول زندگی نشان داد و از این نظر می تواند گزینه ای کم خطرتر برای استفاده در برنامه های مدیریت تلفیقی آفات در حضور *D. rapae* باشد. با این حال، مشاهده اثرات زیرکشنده نشان می دهد که ارزیابی سازگاری این حشره کش ها با دشمنان طبیعی نباید فقط بر اساس مرگ و میر مستقیم انجام شود و پیامدهای آن ها بر رشد، تولیدمثل و پویایی جمعیت پارازیتوئید نیز باید مورد توجه قرار گیرد. بر این اساس، استفاده سازگارانه از فلونیکامید و ایمیداکلوپراید در برنامه های مدیریت تلفیقی آفات مستلزم انتخاب دقیق زمان کاربرد و کاهش هم زمانی آن با دوره های فعالیت حشرات کامل *D. rapae* است. اگرچه کاربرد حشره کش ها در دوره های کم فعالیت پارازیتوئید یا زمانی که بخش عمده جمعیت در مرحله مومیایی قرار دارد، می تواند احتمال مواجهه مستقیم را کاهش دهد، اما امکان مواجهه حشرات کامل با بقایای حشره کش پس از خروج از مومیایی های در معرض تیمار همچنان وجود دارد و می تواند به بروز اثرات زیرکشنده منجر شود. بنابراین، پیش از ارائه توصیه های نهایی برای کاربرد مزرعه ای، انجام بررسی های تکمیلی در شرایط نیمه صحرایی و مزرعه ای ضروری است. این پژوهش ها باید با تمرکز بر ارزیابی اثرات زیرکشنده، تعیین دوره باقیمانده اثر حشره کش و شناسایی زمان بندی بهینه کاربرد، به تعیین میزان سازگاری این ترکیبات با *D. rapae* کمک کنند. در مجموع، یافته های حاضر بر ضرورت انتخاب حشره کش های کم خطرتر و تلفیق ملاحظات مربوط به دشمنان طبیعی در برنامه های کنترل آفات کلزا تأکید دارد و فلونیکامید را، در مقایسه با ایمیداکلوپراید، به عنوان گزینه ای امیدوارکننده تر برای استفاده سازگار با این پارازیتوئید مطرح می کند.

این پژوهش با حمایت مادی و معنوی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی در قالب پروژه تحقیقاتی به انجام رسیده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می شود.

References

- Abo El-Ghar, G. E. S., & El-Sayed, A. E. G. M. (1992). Long-term effects of insecticides on *Diaeretiella rapae* (M'Intosh), a parasite of the cabbage aphid. *Pesticide Science*, 36(2–3), 109–114
- Acheampong, S., & Stark, J. D. (2004). Effects of the agricultural adjuvant Sylgard 309 and the insecticide pymetrozine on demographic parameters of the aphid parasitoid, *Diaeretiella rapae*. *Biological Control*, 31(2), 133–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.03.002>
- Ahmad, M., & Akhtar, S. (2013). Development of insecticide resistance in field populations of *Brevicoryne brassicae* (Hemiptera: Aphididae) in Pakistan. *Journal of Economic Entomology*, 106(2), 954–958. DOI: <https://doi.org/10.1603/ec12233>
- Akbari, S., Aramideh, S., Mirfakhraie, S., & Safaralizadeh, M. H. (2024). Compatibility of entomopathogenic fungi and imidacloprid (Confidor®) on biological characteristics and life table of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae), a parasitoid of *Brevicoryne brassicae* (Hemiptera: Aphididae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 44, 2927–2938. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42690-024-01389-0>
- Amarasekare, K. G., Shearer, P. W., & Mills, N. J. (2016). Testing the selectivity of pesticide effects on natural enemies in laboratory bioassays. *Biological Control*, 102, 7–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.10.015>
- Bhatia, V., Uniyal, P. L., & Bhattacharya, R. (2011). Aphid resistance in Brassica crops: Challenges, biotechnological progress and emerging possibilities. *Biotechnology Advances*, 29(6), 879–888. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.07.005>
- Bhattacharya, S., Khajuria, C., Dhaliwal, M. S., & Singh, J. (2019). Brassica–aphid interaction: Challenges and prospects of genetic engineering for integrated aphid management. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 108, 101442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2019.101442>
- Brown, J., McCaffrey, J. P., Harmon, B. L., Davis, J. B., Brown, A. P., & Erickson, D. A. (1999). Effect of late season insect infestation on yield, yield components and oil quality of *Brassica napus*, *B. rapa*, *B. juncea* and *Sinapis alba* in the Pacific Northwest region of the United States. *The Journal of Agricultural Science*, 132(3), 281–288. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859699006413>
- Chaudhary, R. I., Zala, M. B., Thumar, R. K., & Dindor, M. U. (2016). Effect of some insecticides against natural enemies on mustard (*Brassica juncea*) in field condition. *International Journal of Agricultural Science and Research (IJASR)*, 6(5), 219–226.
- Chi, H. (1988). Life-table analysis incorporating both sexes and variable development rate among individuals. *Environmental Entomology*, 17, 26–34.
- Chi, H. (2018). TWSEX-MSChart: A computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. DOI: <http://140.120.197.173/Ecology/Download/Twosex-MSChart.zip>
- Chi, H., & Liu, H. (1985). Two new methods for the study of insect population ecology. *Bulletin of the Institute of Zoology, Academia Sinica*, 24, 225–240
- Cho, S. R., Koo, H. N., Yoon, C., Kim, G. H., & Kim, G. H. (2011). Sublethal effects of flonicamid and thiamethoxam on green peach aphid, *Myzus persicae* and feeding behavior analysis. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 54(6), 889–898. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03253177>
- Crossthwaite, A. J., Bigot, A., Camblin, P., Goodchild, J., Lind, R. J., Slater, R., & Maienfisch, P. (2017). The invertebrate pharmacology of insecticides acting at nicotinic acetylcholine receptors. *Journal of Pesticide Science*, 42(3), 67–83. DOI: <https://doi.org/10.1584/jpestics.D17-019>
- 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>
- Forouzan, M., Seyyedi Sahebari, F., Lotfalizadeh, H. & Jarrahi, A. (2025). Sublethal effect of the insecticides Flonicamid and Imidacloprid on the functional response of the parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae* to the cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae*. *Biocontrol in Plant Protection*, 12(2), 65–79 DOI: <https://doi.org/10.22092/bcpp.2026.372146.414>

- Goodman, D. (1982). Optimal life histories, optimal notation, and the value of reproductive value. *American Naturalist*, 119, 803–823. DOI: <https://doi.org/10.1086/283956>
- Gul, H., Güncan, A., Ullah, F., Desneux, N., & Liu, X. (2024). Intergenerational sublethal effects of flonicamid on cotton aphid, *Aphis gossypii*: An age-stage, two-sex life table study. *Insects*, 15(7), Article 529. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects15070529>
- Gul, H., ul Haq, I., Ullah, F., Wang, Q., Desneux, N., & Liu, X. (2023). Impact of sublethal concentrations of flonicamid on key demographic parameters and feeding behavior of *Schizaphis graminum*. *Ecotoxicology*, 32(5), 756–767. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-023-02682-3>
- Halder, J., Rai, A. B., & Kodandaram, M. H. (2014). Parasitization preference of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae) among different aphids in vegetable ecosystem. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 84(11), 1431–1433. DOI: <https://doi.org/10.56093/ijas.v84i11.44663>
- Hsieh, C. Y., & Allen, W. W. (1986). Effects of insecticides on emergence, survival, longevity, and fecundity of the parasitoid *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Aphididae) from mummified *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology*, 79(6), 1599–1602. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/79.6.1599>
- Huang, Y., & Chi, H. (2012). Age-stage, two-sex life tables of *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) (Diptera: Tephritidae) with a discussion on the problem of applying female age-specific life tables to insect populations. *Insect Science*, 19, 263–273. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7917.2011.01424.x>
- IRAC (International Resistance Action Committee). (2026). *IRAC mode of action classification scheme*. <https://irac-online.org/mode-of-action/>
- Javed, M. W., ul-Hasan, M., Sagheer, M., & Sahi, S. T. (2026). Field assessment of aphid-mediated losses in canola: Estimation of yield components, nutrient chemicals, and phenolic compounds. *International Journal of Pest Management*, Online first, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1080/09670874.2026.2624551>
- 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>
- Kong, F. -B., Cui, L. -L., Jiang, Y. -T., Lv, Y. -P., Li, R. -J., Wang, Y., Li, X. -A., Zhang, B. -Z., & Liu, R. -Q. (2025). Sublethal effects of flonicamid on the population growth of the grain aphid *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera: Aphididae). *Bulletin of Entomological Research*, 115(2), 166–174. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007485325000045>
- Koo, H. -N., Lee, S. -W., Yun, S. -H., Kim, H. K., & Kim, G. -H. (2015). Feeding response of the cotton aphid, *Aphis gossypii*, to sublethal rates of flonicamid and imidacloprid. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 154(2), 110–119. DOI: <https://doi.org/10.1111/eea.12260>
- Lin, Y. W., Wu, G., & Miyata, T. (2007). Insecticide susceptibility of surviving *Cotesia plutellae* (Hymenoptera: Braconidae) and *Diaeretiella rapae* (M'Intosh) (Hymenoptera: Aphididae) as affected by sublethal insecticide dosages on host insects. *Pest Management Science*, 63(9), 841–850. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.1402>
- Liu, T., Niu, J., Gao, Y., Liu, X., & Su, J. (2025). Comparative assays revealed distinct toxicity characterizations between pymetrozine and flonicamid. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 209, 106319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106319>
- McDougall, R., Mata, L., Ward, S., Hoffmann, A., & Umina, P. A. (2024). Assessing the sub-lethal impacts of insecticides on aphid parasitoids through laboratory-based studies. *Austral Entomology*, 63(1), 119–129. <https://doi.org/10.1111/aen.12679>
- Morita, M., Ueda, T., Yoneda, T., Koyanagi, T., & Haga, T. (2007). Flonicamid, a novel insecticide with a rapid inhibitory effect on aphid feeding. *Pest Management Science*, 63(10), 969–973. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.1423>
- Nourbakhsh, S. (2025). List of important pests, diseases and weeds of major agricultural crops: Pesticides and recommended methods for their control. Pest Control Division, Plant Protection Organization of Iran, Ministry of Agriculture Jihad
- Overton, K., Ward, S. E., Hoffmann, A. A., & Umina, P. A. (2023). Lethal impacts of insecticides and miticides on three agriculturally important aphid parasitoids. *Biological Control*, 178, 105143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105143>

- Pal, M., & Singh, R. (2013). Biology and ecology of the cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus) (Hemiptera: Aphididae): A review. *Journal of Aphidology*, 27, 59–78
- Rani, L., Thapa, K., Kanojia, N., Sharma, N., Singh, S., Grewal, A. S., Srivastav, A. L., & Kaushal, J. (2021). An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657>
- Rezaei, N., Mossadegh, M. S., Kochevli, F., Talebi Jahromi, K., & Kavousi, A. (2018). Sub-lethal effects of thiamethoxam and pirimicarb on life-table parameters of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae), parasitoid of *Lipaphis erysimi* (Hemiptera: Aphididae). *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 12(10), 321-328
- Samih, M. A. (2025). Impact of Some Pesticides on *Diaeretiella rapae* and *Diadegma semiclausum* in Cabbage Production. *Iranian Plant Protection Research*, 39(3), 229-248. DOI: <https://doi.org/10.22067/jpp.2025.87745.1184>
- 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>
- Stark, J. D., & Banks, J. E. (2003). Population-level effects of pesticides and other toxicants on arthropods. *Annual Review of Entomology*, 48, 505–519. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.48.091801.112621>
- Stark, J. D., Banks, J. E., & Acheampong, S. (2004). Estimating susceptibility of biological control agents to pesticides: Influence of life history strategies and population structure. *Biological Control*, 29(3), 392–398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2003.07.003>
- Umoru, P. A., Powell, W., & Clark, S. J. (1996). Effect of pirimicarb on the foraging behaviour of *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae) on host-free and infested oilseed rape plants. *Bulletin of Entomological Research*, 86(2), 193–201. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007485300052445>
- Umoru, P. A., Powell, W., & Clark, S. J. (2002). Sub-lethal effects of the insecticides pirimicarb and dimethoate on the aphid parasitoid *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Braconidae) when attacking and developing in insecticide-resistant hosts. *Biocontrol Science and Technology*, 12(5), 605–614. DOI: <https://doi.org/10.1080/0958315021000016261>
- Xu, R., Mortimer, P. E., Kuang, R. P., He, J., Zhang, W. D., & Yin, F. (2013). Sublethal impact of paraquat on the life span and parasitic behavior of *Diaeretiella rapae* M'Intosh. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 48(8), 651–657. DOI: <https://doi.org/10.1080/03601234.2013.778597>

Sublethal effects of flonicamid and imidacloprid insecticides on life table parameters of *Diaeretiella rapae* (Hym.: Braconidae)

M. Forouzan^{1*}, F. Seyyedi Sahebari², H. Lotfalizadeh³ and A. Jarrahi⁴

1 & 4. Plant Protection Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran, 2. Plant Protection Research Department, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, AREEO, Tabriz, Iran, 3. Department of Insect Taxonomy Research, Iranian Research Institute of Plant Protection (IRIPP), AREEO, Tehran, Iran.

✉ maryam_fourouzan@yahoo.com

✉ f_seyyedi_sahebari@areeo.ac.ir

✉ h.lotfalizadeh@areeo.ac.ir

✉ a.jarrahi@areeo.ac.ir

 <https://orcid.org/0000-0002-5440-3329>

 <https://orcid.org/0000-0001-6186-7727>

 <https://orcid.org/0000-0002-7927-819X>

 <https://orcid.org/0009-0006-9482-9187>

Received: 29 June 2026 | Accepted: 3 September 2026 |

Abstract

The cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae* (L.), is one of the most destructive pests of canola and the parasitoid wasp *Diaeretiella rapae* (McIntosh) is recognized as a key biological control agent in integrated pest management (IPM) programs. Considering the importance of the sublethal effects of insecticides on natural enemies, this study evaluated the effects of the LC₂₅ concentrations of flonicamid and imidacloprid on the life table parameters of *D. rapae*. Experiments were conducted under controlled laboratory conditions using direct spraying on insects on leaf discs. Data were analyzed using the age-stage, two-sex life table approach. The results showed that both insecticides significantly prolonged the immature developmental period while reducing adult longevity and fecundity of the parasitoid. Additionally, both insecticide treatments exhibited significantly lower values for the intrinsic rate of increase (r), finite rate of increase (λ), net reproductive rate (R_0), and gross reproductive rate (GRR) compared to the control, while the mean generation time (T) showed significant increase. In comparison to flonicamid, imidacloprid demonstrated significantly stronger negative impacts on most biological and demographic parameters, resulting in more substantial declines in survival, reproduction, and population growth. Overall, although both insecticides exhibited sublethal effects on this beneficial parasitoid, flonicamid was more compatible with integrated pest management programs compared to imidacloprid. Consequently, when the application of these insecticides is unavoidable, careful insecticide selection, appropriate application timing, and consideration of natural enemy activity are essential to preserve the effectiveness of biological control.

Key words: *Brevicoryne brassicae*, integrated pest management, intrinsic rate of increase, Neonicotinoid

Citation: Forouzan, M., Seyyedi Sahebari, F., Lotfalizadeh, H. & Jarrahi, A. (2026). Sublethal effects of flonicamid and imidacloprid insecticides on life table parameters of *Diaeretiella rapae* (McIntosh) (Hym.: Braconidae). *Plant Pest Research*, 16(2), 31-47. DOI: <https://doi.org/10.22124/iprj.2026.34055.1701>



*Corresponding author: maryam_fourouzan@yahoo.com