

مطالعه مدل ریاضی رشد و نمو وابسته به دمای کفشدوزک *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant (Coleoptera: Coccinellidae)

حسین رنجبر اقدم

مؤسسه تحقیقات گیاه پزشکی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

مسئول مکاتبات: حسین رنجبر اقدم، پست الکترونیک: hrap1388@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۲۵

۷(۱)۹۳-۱۰۹

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۲۹

چکیده

کفشدوزک کریپتولموس، *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant به‌عنوان مؤثرترین عامل مه‌ار زیستی روی شپشک‌های آردآلود شناخته شده است. در پژوهش حاضر تأثیر دما روی روند رشد و نمو کفشدوزک مورد بررسی قرار گرفت. طول دوره رشد و نمو مراحل جنینی (تخم)، لاروی، شفیرگی و کل دوره نابالغ کفشدوزک یادشده، در اتاقک رشد در دامنه دمایی ۳۵-۱۵ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۶۰-۵۰ درصد و دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی ثبت شد. تجزیه واریانس نتایج طول دوره رشد و نمو مراحل کفشدوزک در دماهای مختلف نشان داد که بین میانگین طول دوره رشد و نمو هر یک از مراحل رشدی کفشدوزک در دماهای مورد بررسی از نظر آماری در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد و افزایش دما منجر به کاهش معنی‌دار طول دوره رشد و نمو کفشدوزک شد. در ادامه از مدل‌های ریاضی برای توصیف روند رشد و نمو مراحل مختلف رشدی کفشدوزک کریپتولموس در دماهای مختلف و برآورد شاخص‌های دمایی مربوطه استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مدل‌های بریر-۲ و لاکتین قادر به پیش‌بینی مطلوب روند رشد و نمو کفشدوزک در دامنه دمایی مورد بررسی بودند. بر اساس پیش‌بینی مدل‌های یادشده، دامنه دمایی رشد و نمو مراحل نابالغ کفشدوزک کریپتولموس ۳۳/۵۶-۱۰/۴۰ درجه سلسیوس و دمای بهینه رشد و نمو آن ۳۰/۰۸ درجه سلسیوس تعیین شد. این نتایج در بهبود شرایط محیطی در حشره‌خانه‌های پرورش انبوه کفشدوزک کریپتولموس و برنامه‌های کنترل بیولوژیک شپشک‌های آردآلود قابل استفاده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: دما، رشد و نمو، مدل ریاضی، کفشدوزک کریپتولموس

مقدمه

زیست و استقرار انتخاب می‌نمایند (Bodenheimer, 1951;

Meyerdik et al., 1979; Heidari & Copland, 1993).

کفشدوزک کریپتولموس با نام علمی، *C. montrouzieri* که در منابع علمی به نام Mealybug Destroyer و Mealybug Ladybird نیز گفته می‌شود به‌عنوان فعال‌ترین و موفق‌ترین شکارگر روی شپشک‌های آردآلود است (Al-khateeb & Raie, 2001). منشأ این حشره مفید استرالیا است که در سال ۱۸۹۲ توسط کوپیل به‌منظور کنترل شپشک آردآلود به کالیفرنیا و از آن به بعد به سراسر جهان منتقل شد (Clausen, 1978).

بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که کفشدوزک *C. montrouzieri* قادر است، علاوه بر تغذیه از شپشک آردآلود مرکبات *P. citri* و شپشک آرد آلود چای

شپشک آردآلود مرکبات *Planococcus* (Risso) *citri* برای اولین بار در ایران در سال ۱۳۲۶ توسط کریوخین حشره‌شناس روسی گزارش شده است (Behdad, 2002). چای، مرکبات، انجیر، انگور، توت، انار، به، زیتون، خربزه، خرزهره، ارکیده، چتریان، پیچک، داوودی، سرخس و کلم مهم‌ترین گیاهانی می‌باشند که مورد حمله این آفت قرار می‌گیرند (Gordon, 1985; Charles, 1993; Copland et al., 1993). این آفت تقریباً در سرتاسر جهان انتشار دارد. جمعیت این حشره در باغ‌هایی که در برابر باد محفوظ می‌باشند، بالا بوده و حشره ترجیح می‌دهد بخش‌های سایه‌انداز گیاه از جمله ساقه، میوه‌های جوان و جوانه‌های گل را برای

بررسی‌های Izhevsky & Orlinsky (1988) مشخص شد. رهاسازی کفشدوزک *C. montrouzieri* به‌منظور کنترل شپشک‌های آردآلود از قبیل شپشک آردآلود مرکبات سبب استقرار این دشمن طبیعی نمی‌شود، زیرا شرایط محیطی و آب و هوای معتدل ساحلی مناسب برای این کفشدوزک نبوده و این حشره قادر به تحمل سرما نیست.

سرعت رشد گیاهان و جانوران خونسرد تابع دمای محیط پیرامون آن‌ها است. گفته می‌شود، هر چه دمای محیط اطراف این موجودات بالا برود، سریعتر رشد می‌کنند. البته باید توجه داشت هنگامی که دما از یک حد مشخصی بالاتر برود، منجر به کاهش و حتی توقف رشد آن‌ها خواهد شد (Yang et al., 1996). دما یکی از فاکتورهای غیرزنده موثر بر تحرک کنه‌ها، حشرات و دشمنان طبیعی آن‌ها است (Huffaker et al., 1999). آفات و دشمنان طبیعی آن‌ها ممکن است در محدوده‌های دمایی متفاوت قادر به فعالیت باشند که شناخت آن دماها قبل از هر اقدامی ضروری می‌باشد (Roy et al., 2002). ویژگی‌های دمایی متفاوتی بین گونه‌ها (Honek, 1996; Frazer and McGregor, 1992) جمعیت‌ها (Lee and Elliot, 1998)، مراحل رشد و نمو (Honek and Kocourek, 1988) و دیگر عوامل اکولوژیکی مثل منابع غذایی وجود دارد. مطالعه اثر دماهای مختلف روی زیست‌شناسی، رفتار و کارایی دشمنان طبیعی در استفاده موفقیت‌آمیز از آن‌ها نقش اساسی دارد (Zamani et al., 2006).

مطالعات زیادی در مورد اثر دما روی رشد و نمو حشرات انجام شده است و نتایج حاصل نشان داده است که دوره رشدونمو حشرات با افزایش دما کاهش می‌یابد (Gilbert & Raworth, 1996). به‌طور کلی فرایندهای حیاتی تابع دما در حشرات (Temperature-Dependent Rate Phenomena) زمانی آغاز می‌شود که دما از یک آستانه خاصی که آستانه پایین رشدونمو نامیده می‌شود، بالاتر برود. آستانه‌ی پایین دمای رشدونمو بین گونه‌های مختلف حشرات متفاوت است. حتی جمعیت‌های مختلف یک گونه نیز به دلیل اینکه به شرایط آب و هوایی متفاوتی سازگار شده‌اند، دارای آستانه‌های دمایی مختلفی برای

سایر آفات چای *Pseudococcus viburni* Signoret همچون شته سیاه چای *Toxoptera aurantii* (Boyer de Fonscolombe) و کنه قرمز چای *Brevipalpus obovatus* Murray, 1978) را مورد حمله قرار دهد (Stoetzel, 1989; Banerjee, 1993; Donnadiu, 1978). دامنه میزبانی کفشدوزک کریپتولموس، شپشک‌های آردآلود جنس *Pseudococcus* و نیز جنس‌های وابسته نظیر *Ferrisia* و *Pulvinaria* نیز حمله می‌کند (Gordon, 1985). در ایتالیا فعالیت تغذیه‌ای کفشدوزک کریپتولموس روی *Saissetia olea* Olivier و *Linchtensia viburni* Signoret توسط Raspi (1988) گزارش شده است. Mani (1999b) & Krishnamoorthy کفشدوزک کریپتولموس را به‌عنوان یکی از شکارگران مؤثر شپشک *Coccus viridis* در باغ‌های لیمو و بالشتک *Chloropulvinaria polygonata* Cockerell در باغ‌های انبه هندوستان معرفی کردند. در ایران پژوهش‌های متعددی در مورد بررسی کارایی این کفشدوزک در کنترل شپشک‌های آردآلود روی محصولات مختلفی مانند مرکبات (Aghajanzadeh et al., 2016)، درختان و گل‌های زینتی (Ghorbanian et al., 2014; Ghorbanian et al., 2011) و مزارع چای (Malkeshi & Heidari, 2006) انجام شده است و همگی بر موفق بودن این عامل مهار زیستی در کنترل شپشک‌های آردآلود در عرصه‌های مختلف اذعان دارند.

در مورد تاثیر عوامل غیرزنده روی جمعیت کفشدوزک کریپتولموس، بیش از هر عامل دیگری باید به شرایط آب و هوایی اشاره کرد (Coppel & Mertins, 1977; Bodenheimer, 1951). در پژوهش Bodenheimer (1951) عدم تطابق با شرایط آب و هوایی جدید یکی از عوامل محدودکننده جمعیت دشمنان طبیعی وارداتی و مهمترین عامل عدم موفقیت در برنامه‌های کنترل بیولوژیک بیان شده است. در مناطقی که به علت شرایط نامساعد جوی این حشرات از بین می‌روند، باید اقدام به نگهداری و پرورش آن‌ها در انسکتاریوم‌ها نمود (De Bach, 1973; Bodenheimer, 1951). بر اساس

های متفاوتی پیشنهاد شده است (Logan *et al.*, 1976; Briere *et al.*, 1999; Sharpe and DeMichile, 1977; Wagner *et al.*, 1984; Lamb, 1992; Lactin *et al.*, 1995). مدل‌های دمایی اغلب برای پیش بینی فعالیت و دینامیسم جمعیت آفات و دشمنان طبیعی آن‌ها در موقعیت‌های مزرعه‌ای به کار می‌رود (Frazer and McGregor, 1999; Lamb, 1992; Briere *et al.*, 1999). مدل‌ها به تعیین شرایط مناسب، به پرورش انبوه دشمنان طبیعی کمک می‌کنند (Rodriguez-Saona & Miller, 1999). با توجه به این که دما مهمترین عامل محیطی موثر روی روند رشد و نمو (Logan *et al.*, 1974; Campbell *et al.*, 1996; Gilbert & Raworth, 1996; al., 1976)، دینامیسم جمعیت و تغییر فعالیت‌های فصلی حشرات، کنه‌ها و دشمنان طبیعی آن‌ها (Huffaker *et al.*, 1999)، است، در پژوهش حاضر، تغییرات روند رشد و نمو کفشدوزک شکارگر کریپتولموس در دماهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت و بر اساس نتایج به دست آمده مناسب‌ترین مدل ریاضی توصیف کننده رشد و نمو تابع دمایی کفشدوزک یاد شده انتخاب و به منظور تخمین شاخص‌های دمایی رشد و نمو کفشدوزک کریپتولموس مورد استفاده قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

کلنی اولیه حشرات مورد بررسی

کلنی اولیه شپشک آردآلود *P. citri* و کفشدوزک *C. montrouzieri* از آزمایشگاه کنترل بیولوژیک آمل-موسسه تحقیقات گیاه پزشکی کشور تهیه شد. نمونه‌های اولیه برای تشکیل کلنی یاد شده از باغات چای استان مازندران جمع‌آوری شده بود.

پرورش شپشک آردآلود در اتاق پرورش حشرات

به منظور پرورش و تکثیر شپشک آرد آلود از کدو تنبل‌های با قطر همسان و دارای شیارهای طولی استفاده شد. آلوده‌سازی بر اساس وزن تقریبی کدوها انجام شد و دو عدد کیسه تخم شپشک آردآلود به ازای هر کدوی دو کیلویی روی آن‌ها قرار داده شد. پرورش شپشک‌های آردآلود در اتاقک رشد حشرات با دمای ثابت با دمای $1 \pm$

رشدونمو می‌باشد (Casey, 1992). بعد از این آستانه، با بالا رفتن دما، نرخ رشدونمو حشرات به صورت خطی افزایش یافته تا این که در دمایی خاصی که دمایی بهینه نامیده می‌شود، به بالاترین مقدار خود می‌رسد، با تجاوز دما از دمایی بهینه، نرخ رشد و نمو به سرعت کاهش می‌یابد تا این که در دمایی آستانه بالایی رشدونمو به صفر رسیده و متوقف می‌شود. در دماهای بالاتر از آستانه‌ی رشدونمو میزان مرگ و میر حشره صد در صد است و در واقع در دمایی آستانه بالایی رشد و نمو، ساختارهای پروتئینی حشرات تخریب می‌شود (Huffaker & Gutierrez, 1999; Sinclair *et al.*, 2003).

فعالیت دشمنان طبیعی نیز تحت تاثیر دما تغییر می‌یابد. البته در دماهای بالا طول عمر حشرات کامل کاهش یافته و از این طریق ممکن است از کارایی آن‌ها کاسته شود (Huffaker & Gutierrez, 1999). نگهداری حشرات در دماهای پایین نیز مزایای خاص خود را دارد. مهمترین فایده این است که در دماهای پایین متابولیسم حشرات با مقدار کمی انرژی انجام می‌شود و بنابراین در زمان‌هایی که منابع غذایی محدود باشند حشرات می‌توانند مدت زمان بیشتری را در حالت گرسنگی سپری نمایند (Huffaker & Gutierrez, 1999). البته گاهی در دماهای پایین بقای حشرات با خطر بیشتری مواجه می‌شود، زیرا در دماهای پایین طول دوره مراحل پیش از بلوغ افزایش می‌یابد و خطر مرگ و میر ناشی از دشمنان طبیعی و عوامل بیماری‌زا افزایش می‌یابد و در این صورت افرادی که سریعتر دوره زندگی خود را تکمیل می‌کنند، موفق‌تر خواهند بود (Casey, 1992).

نرخ رشد، بصورت عکس زمان بکار رفته، برای تغییر از یک مرحله به مرحله بعدی رشد بیان می‌شود (Cossins and Bowler, 1987) که در دمایی آستانه پایین، برابر صفر است و با دما، افزایش یافته و دمایی بهینه، سطحی را تشکیل می‌دهد و سپس به سرعت تا آستانه دمایی بالا، کاهش می‌یابد. این رابطه تا حدی غیرخطی است اما در دماهای متوسط تقریباً خطی است (Wagner *et al.*, 1984). برای توصیف رابطه بین دما و رشد و نمو بندپایان توابع یا مدل

۲۴ ساعت عمر داشتند) از نتایج نسل دوم آزمایشگاهی کلنی انتخاب و به صورت دسته‌ای داخل ظروف پتری حاوی تخم یعنی بدون جداسازی تخم‌ها از ظرف پتری بدلیل کاهش خطای ناشی از آسیب وارده به تخم‌ها در اثر جداسازی از پتری، داخل اتاق‌های رشد در هر یک از دماهای یاد شده منتقل شدند. روند رشدونمو هر فرد به طور روزانه تا ظهور کفشدوزک‌های بالغ در هر یک از دماهای مورد بررسی ثبت شد. به این ترتیب که ظروف پتری هر روز با استفاده از استریو میکروسکوپ بررسی و زمان تفریح تخم‌ها (طول دوره جنینی هر فرد) ثبت شد. سپس هر یک از لاروهای سن یک نو ظهور به یک ظرف پتری مجزا انتقال داده شدند. هر روز مراحل مختلف سنی شپشک آردآلود به عنوان غذا در اختیار لاروهای کفشدوزک قرار داده شدند و ضمن تجدید غذا، تغییرات رشدی هر فرد مانند تغییر سنین لاروی یا شفیره شدن به طور روزانه ثبت شد. در ادامه بعد از رسیدن افراد به دوره شفیرگی، ضمن بازید روزانه به محض ظهور افراد بالغ، طول دوره شفیرگی افراد ثبت شد. بر اساس داده‌های ثبت شده در هر یک از دماهای مورد بررسی، طول دوره رشدی مراحل جنینی (تخم)، لاروی، شفیرگی و کل دوره رشدونمو نابالغ کفشدوزک کریپتولموس تعیین شد.

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس یک سویه (One-way ANOVA)، از نظر آماری معنی دار بودن تفاوت بین طول دوره رشدونمو هر یک از مراحل رشدی کفشدوزک کریپتولموس در دماهای مورد بررسی مشخص شد. برای مقایسه میانگین طول دوره رشدونمو کفشدوزک در دماهای مورد بررسی از آزمون توکی استفاده شد. تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS ver. 13 انجام شد.

تاثیر دما بر نرخ رشدونمو کفشدوزک C. montrouzieri و استفاده از مدل‌های ریاضی برای توصیف آن

برای توصیف رشدونمو کفشدوزک مذکور در دماهای مختلف و تعیین شاخص‌های دمایی هدف از ۶ مدل ریاضی پر کاربرد در این حوزه استفاده شد. بدین منظور ابتدا نرخ رشدونمو مراحل رشدی کفشدوزک کریپتولموس در

۲۷ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی 10 ± 60 درصد و دوره نوری ۱۶:۸ (L:D) ساعت انجام شد.

پرورش کفشدوزک کریپتولموس

بعد از تثبیت و افزایش جمعیت شپشک‌های آردآلود روی کدوها، حشرات کامل کفشدوزک C. montrouzieri روی آن‌ها رها شدند. پرورش کفشدوزک در داخل قفسه‌های آلومینیومی با جداره‌های توری به ابعاد تقریبی $100 \times 80 \times 70$ سانتیمتر در اتاق پرورش حشرات در دمای 1 ± 27 درجه سلسیوس، رطوبت نسبی 10 ± 60 درصد و دوره نوری ۱۶:۸ (L:D) ساعت انجام شد. پرورش کفشدوزک‌ها تا دو نسل به منظور تثبیت کلنی آزمایشگاهی ادامه یافت و برای انجام آزمایشات از تخم‌های گذاشته شده توسط کفشدوزک‌های نسل دوم آزمایشگاهی استفاده شد. بدین منظور هر جفت از حشرات کامل کفشدوزک بعد از ظهور به منظور جفت‌گیری و تخم‌ریزی در ظروف پتری دیش به قطر ۹ سانتی‌متر که کف آن‌ها با یک لایه محافظ بچه (یک لایه پارچه نازک با تار و پود مشخص) پوشیده شده بود، منتقل شدند. علت استفاده از محافظ بچه این بود که کفشدوزک‌های ماده در حاشیه‌های پارچه و در بین تار و پود آن تخم گذاشته و تخم‌ها هم محفوظ بودند، از سوی دیگر با این روش تخم‌های کفشدوزک به سهولت از تخم‌های شپشک قابل تشخیص و قابل شمارش بودند. برای تغذیه کفشدوزک‌ها از تخم و پوره‌های سنین مختلف شپشک استفاده شد. تخم‌های گذاشته شده توسط کفشدوزک‌های ماده از ظروف یاد شده به طور روزانه تفکیک و شمارش شدند و کفشدوزک‌ها به پتری دیش مشابه جدید انتقال داده شد تا در هر ظرف پتری، تخم‌های یک روزه با عمر کمتر از ۲۴ ساعت قابل استحصال باشد.

بررسی تاثیر دما روی روند رشدونمو کفشدوزک C. montrouzieri

روند رشدونمو کفشدوزک C. montrouzieri در ۷ دمای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۲۷، ۳۰، ۳۳ و ۳۵ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی 10 ± 60 درصد و دوره نوری ۱۶:۸ ساعت (تاریکی : روشنایی) در اتاقک رشد بررسی شد. به همین منظور حدود ۳۰۰-۱۰۰ عدد تخم یک روزه (که کمتر از

که در این مدل پراسنجه مدل، t_{max} آستانه بالای دمای رشد و نمو، T دما و t_{min} آستانه پایین دمای رشد و نمو است. از ویژگی‌های ارزشمند این مدل توان آن در برآورد دماهای بحرانی آستانه پایین دمای رشد و نمو t_{min} ، دمای بهینه رشد و نمو t_{opt} و آستانه بالای دمای رشد و نمو t_{max} است.

۲- مدل بریر-۲ (Briere-2)

این مدل نیز توسط Briere et al. (1999) ارائه شده و به صورت زیر است:

$$\frac{1}{D} = aT(T - t_{min})(T_{max} - T)^2$$

تفاوت این مدل با مدل بریر-۱ در این است که در این مدل عدد ریشه (d) به عنوان یک پراسنجه در نظر گرفته شده است و بر خلاف مدل بریر-۱ در این مدل ریشه دوم رابطه-ی $T_{max} - T$ مورد نظر نمی‌باشد. سایر پراسنجه‌ها در این مدل نیز مانند مدل بریر-۱ هستند.

۳- مدل لاکتین (Lactin)

این مدل توسط Lactin et al. (1995) ارائه شده است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{1}{D} = e^{\rho T} - e^{\left(\rho T_L - \left(\frac{T_L - T}{\Delta T}\right)\right)} + \lambda$$

در این مدل T دمای پرورش حشره، ρ میزان رشد و نمو در دمای بهینه رشد و نمو، T_L و ضرایب مدل می‌باشد که ضمن برازش مشاهدات روی مدل تخمین زده خواهند شد. با استفاده از این مدل نیز می‌توان آستانه‌های پایین، بالا و دمای بهینه رشد و نمو را برآورد کرد.

۴- مدل لوگان-۶ (Logan-6)

این مدل توسط Logan et al. (1976) ارائه شده و به صورت زیر است:

$$\frac{1}{D} = \psi \left[e^{\rho T} - e^{\left(\rho t_{max} - \frac{t_{max} - T}{\Delta}\right)} \right]$$

در این مدل ψ مقدار بیشینه نرخ رشد و نمو، T دمای پرورش حشره، ρ میزان رشد و نمو در دمای بهینه، t_{max} آستانه‌ی بالای دما و دامنه تغییرات دما می‌باشد. منحنی این مدل در سمت چپ محور دما را قطع نمی‌کند، بنابراین قادر به برآورد t_{min} نمی‌باشد، ولی t_{opt} با استفاده از این مدل قابل تخمین است.

۵- مدل لوگان-۱۰ (Logan-10)

دماهای مورد بررسی بر اساس داده‌های طول دوره رشد و نمو (Jervis & Copland, 1996) محاسبه شد و در مرحله بعد از مدل‌های ریاضی مورد نظر برای توصیف روند تغییرات نرخ رشد و نمو مراحل مختلف رشدی کفشدوزک و برآورد شاخص‌های دمایی رشد و نمو استفاده شد.

شاخص‌های دمایی هدف

الف- آستانه پایین دمای رشد و نمو (Lower Temperature Threshold) (t_{min})

آستانه پایین دمای رشد و نمو، حداقل دمایی است که در دماهای پایین‌تر از آن رشد و نمو خیلی کند انجام شده و یا متوقف می‌شود (Kontodimas et al., 2004).

ب- دمای بهینه رشد و نمو (Optimum Temperature Threshold) (t_{opt}) (دمای اپتیمم)

دمایی است که در آن سرعت رشد و نمو گونه مورد بررسی به بیشترین مقدار خود می‌رسد (Kontodimas et al., 2004).

ج- آستانه‌ی بالای دمای رشد و نمو (Upper Temperature Threshold) (t_{max})

در آستانه بالای دمای رشد و نمو، نرخ رشد و نمو حشره به صفر می‌رسد یا اینکه رشد و نمو آن برای مدت زمان طولانی نمی‌تواند ادامه یابد. بیشتر مدل‌های غیرخطی می‌توانند این دما را تخمین بزنند (Kontodimas et al., 2004).

مدل‌های ریاضی مورد ارزیابی:

مدل‌های غیر خطی

مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای پیش‌بینی روند رشد و نمو مراحل مختلف رشدی کفشدوزک کریپتولموس در دامنه دمایی مورد بررسی به شرح زیر بودند. این مدل‌ها بر اساس توان آنها در پیش‌بینی روند رشد و نمو حشرات در پژوهش‌های قبلی و پتانسیل آنها برای برآورد شاخص‌های دمایی مرتبط با رشد و نمو حشرات انتخاب شدند (Howell & Neven, 2000; Roy et al., 2002; Kontodimas et al., 2004; Ranjbar Aghdam et al. 2009).

۱- مدل بریر-۱ (Briere-1)

این مدل توسط Briere et al. (1999) ارائه شده است و به شکل رابطه زیر است:

$$\frac{1}{D} = aT(T - t_{min})\sqrt{(t_{max} - T)}$$

هرچه مقدار ضریب تبیین به دست آمده به یک نزدیک تر باشد نشان دهنده برازش بهتر داده‌ها با مدل است.

الف-۲- مجموع مربعات باقیمانده‌ها (Residual sum of squares): این معیار با شاخص RSS نشان داده می‌شود. این معیار میزان انحراف داده‌ها از مدل را نشان می‌دهد، بنابراین، مقدار کمتر RSS نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها با مدل خواهد بود.

الف-۳- معیار اطلاعات آکائیکه (Akaike information criterion): این معیار با شاخص AIC نشان داده می‌شود. بر اساس این معیار، مدلی که دارای پایین‌ترین مقدار AIC باشد، مدلی است که کمترین خطا را دارد (Akaike, 1974; Burnham and Anderson, 2002; Vucetich et al., 2006; Angilletta, 2006). مقدار عددی این شاخص آماری با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$AIC = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + 2p$$

که در آن n تعداد مشاهدات، تعداد پراسنجه‌های مدل که شامل عرض از مبدا نیز می‌شود و SSE مجموع مربعات خطا می‌باشد.

از بین شاخص‌های یاد شده، شاخص AIC از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چون مقدار عددی این شاخص اثر تغییر تعداد پراسنجه مدل‌های مختلف را تصحیح می‌کند و بنابراین دارای دقت بالاتری است، ولی مقادیر R^2 و RSS شاخص‌های وابسته به تعداد پراسنجه مدل می‌باشند (Ranjbar Aghdam et al., 2009).

برازش، تجزیه و تحلیل داده‌ها، برآورد پراسنجه‌های مدل-های غیرخطی و ترسیم گراف‌های مربوطه با استفاده از نرم افزارهای SPSS ver. 16.0، JMP ver. 4.0.2 و Excel 2007 انجام شد.

ب- معنی‌داری زیستی

بر اساس اهداف و مفروضات اولیه پروژه، یک مدل خوب باید قادر به برآورد شاخص‌های مهم دمایی رشدنمو از قبیل t_{min} و t_{opt} یا دست کم t_{min} و t_{opt} باشد. از سوی دیگر مدل‌هایی که برآورد بهتری از پراسنجه‌های زیستی را ارائه دهند و مقادیری که پیش‌بینی می‌کنند با مشاهدات اولیه

این مدل نیز توسط Logan et al. (1976) ارائه شده است:

$$\frac{1}{D} = a \left[\frac{1}{1 + ke^{-\rho T}} - e^{-\left(\frac{T - T_L}{\Delta}\right)} \right]$$

T ، و همانند پراسنجه‌های لوگان- ρ می‌باشند، K و T_L نیز پراسنجه‌هایی هستند که باید برآورد شوند. این مدل نیز مانند لوگان- ρ قادر به برآورد t_{min} نمی‌باشد، ولی t_{opt} و t_{max} با استفاده از این مدل قابل تخمین است.

۶- مدل پلی‌نومیال (Polynomial 3rd Order)

این مدل اولین بار توسط Harcourt and Yee (1982) برای پیشگویی روند رشدنمو حشرات در دماهای مختلف به کار رفته است و به این دلیل در برخی منابع معتبر علمی مثل Kontodimas et al. (2004) به نام مدل هارکورت (Harcourt) نیز از آن یاد شده است. بر اساس پیش‌بینی این مدل سرعت رشدنمو حشرات در قسمت میانی منحنی خطی است و در دو انتهای منحنی از حالت خطی خارج می‌شود، بر این اساس مدل سه جمله‌ای زیر ارائه شد:

$$\frac{1}{D} = aT^3 + bT^2 + cT + d$$

a ، b ، c و d پراسنجه‌هایی مدل هستند و T نیز دمای محیط است. منحنی این مدل محور دما را در سمت چپ قطع نمی‌کند، بنابراین نمی‌تواند t_{min} را برآورد کند، ولی توان برآورد t_{max} و t_{opt} را دارد.

معیارهای انتخاب مدل

در انتخاب یک مدل برای توصیف روند رشدنمو تابع دمای یک حشره، از دو معیار استفاده می‌شود، اول معیارهای آماری، که نشانگر میزان برازش مشاهدات روی مدل‌های مورد ارزیابی است و دوم شاخص‌های زیستی (معنی‌داری زیستی) که نشانگر قابل تفسیر بودن واقعی نتایج بدست آمده از مدل در شرایط واقعی می‌باشد.

الف- معیارهای آماری

معیارهای آماری زیر برای ارزیابی میزان برازش داده‌ها روی مدل‌ها استفاده شد:

الف-۱- ضریب تبیین (Coefficient of determination): ضریب تبیین با شاخص R^2 نشان داده می‌شود. هرچه مقدار ضریب تبیین بالاتر باشد، بیانگر افزایش دقت مدل خواهد بود. بالاترین مقدار ضریب تبیین، یک می‌باشد، بنابراین

مدل‌های غیر خطی

در پژوهش حاضر رابطه بین دما و نرخ رشد و نمو مراحل مختلف رشدی کفشدوزک کریپتولموس به وسیله ۶ مدل غیرخطی مهم و پرکاربرد مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر بدست آمده برای پراسنجه‌های قابل برآورد هر مدل و شاخص‌های دمایی برآورد شده برای رشد و نمو تابع دمای کفشدوزک یاد شده در جدول ۲ ارائه شده است.

از نظر آماری، ارزیابی میزان نیکویی برازش هر مدل بر اساس معیارهای آماری ضریب تبیین (R^2)، معیار حفظ اطلاعات آکائیکه (AIC) و مجموع مربعات باقیمانده‌ها (RSS) انجام شد. مقادیر بدست آمده برای شاخص‌های یاد شده برای توصیف سرعت رشدونمو مراحل رشدی تخم، لارو، شفیره و کل مراحل نابالغ کفشدوزک کریپتولموس با استفاده از هر مدل در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، همگی مدل‌های مورد استفاده از نظر آماری توان قابل قبولی در پیش‌بینی روند رشدونمو مراحل مختلف رشدی کفشدوزک کریپتولموس در دامنه‌ی دمایی مورد بررسی داشتند.

در همین راستا شکل ۱- برازش مدل‌های مورد ارزیابی روی داده‌های به دست آمده از بررسی روند رشد و نمو کل دوره رشدی کفشدوزک کریپتولموس در دماهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود برازش مطلوبی از مقادیر نرخ رشدونمو روی مدل‌های ریاضی انتخاب شده مشاهده می‌شود که این موضوع با عنایت به شاخص‌های آماری نیز تایید می‌شود.

در تعارض نباشند در پیشگویی و مدل‌سازی مناسب‌تر خواهند بود.

نتایج

رشدونمو تابع دمای کفشدوزک کریپتولموس

طول دوره رشدونمو مراحل زیستی جنینی (تخم)، لاروی، شفیرگی و کل دوره رشدونمو نابالغ کفشدوزک کریپتولموس در ۷ دمای ثابت ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۲۷، ۳۰، ۳۳ و ۳۵ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بدست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. به دلیل اینکه در دمای ۳۵ درجه سلسیوس تمام تخم‌های مورد مطالعه از بین رفتند، نتایج مربوط به این دما در جدول ارائه نشده است. در دمای ۳۳ درجه سلسیوس نیز فقط دو فرد تا مرحله لارو سن ۴ پیش رفتند و بقیه افراد بررسی شده از بین رفتند.

تجزیه واریانس داده‌های طول دوره رشدونمو مراحل مختلف زیستی کفشدوزک کریپتولموس در قالب طرح آزمایشی کاملاً تصادفی نامتعادل، وجود اختلاف معنی‌دار بین طول دوره رشدونمو در طول دوره‌های رشدونمو جنینی ($F_{4, 327}=2269.79, P<0.001$)، لاروی ($F_{5, 427}=1442.40, P<0.001$) و کل دوره نابالغ ($F_{4, 316}=707.66, P<0.001$) و کل دوره نابالغ ($F_{4, 316}=4899.90, P<0.001$) در دماهای مختلف را در سطح اطمینان ۹۹ درصد اثبات کرد. بر این اساس، مقایسه میانگین طول دوره رشد و نمو مراحل مختلف رشدی کفشدوزک مورد بررسی با آزمون توکی در دماهای مختلف انجام و گروه‌بندی تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد (جدول ۱). بر اساس نتایج حاصل مشخص شد با افزایش دما از ۱۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس طول دوره رشدونمو مراحل مختلف رشدی کفشدوزک کریپتولموس کاهش می‌یابد. بر این اساس طولانی‌ترین دوره رشدونمو در دمای ۱۵ درجه سلسیوس و کوتاهترین طول دوره رشدونمو کفشدوزک در دمای ۳۰ درجه سلسیوس مشاهده شد.

جدول ۱- مقایسه طول دوره رشد و نمو مراحل نابالغ کفشدوزک *Cryptolaemus montrouzieri* در دماهای مورد بررسی

Table 1. Comparison developmental time of *Cryptolaemus montrouzieri* immature stages in examined temperatures.

Developmental stage	Temperature (°C)	No. of individuals	Developmental time (day)		
			Min.	Max.	Mean ± SE
Incubation Period	15	81	11	16	13.76 ± 0.17 a
	20	97	8	11	9.23 ± 0.09 b
	25	70	5	6	5.41 ± 0.05 c
	27	102	4	5	4.15 ± 0.07 d
	30	67	4	6	4.19 ± 0.05 d
	33	16	4	5	4.37 ± 0.12 d
Larval Period	15	56	41	58	51.37 ± 0.68 a
	20	78	23	33	26.76 ± 0.25 b
	25	62	14	18	15.88 ± 0.10 c
	27	79	13	18	14.63 ± 0.14 d
	30	57	11	17	14.05 ± 0.18 d
	33	0	0	0	0
Pupal Period	15	53	17	30	14.52 ± 0.43 a
	20	72	11	20	14.80 ± 0.27 b
	25	61	7	11	9.65 ± 0.10 c
	27	78	6	10	7.49 ± 0.09 d
	30	57	5	9	6.75 ± 0.17 e
	33	0	0	0	0
Total Immature Stages	15	53	76	97	87.07 ± 0.76 a
	20	72	46	55	50.48 ± 0.33 b
	25	61	28	34	31.13 ± 0.15 c
	27	78	24	28	26.28 ± 0.11 d
	30	57	22	30	24.96 ± 0.21 e
	33	0	0	0	0

* میانگین‌های طول دوره رشد و نمو هر یک از مراحل رشدی که دارای حروف متفاوت هستند، از نظر آماری دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند (آزمون توکی، $P < 0.05$).

* Developmental time means with different letters have statistically significant difference in each developmental stage (Tukey, $P < 0.05$).

به توان ذاتی مدل‌های ریاضی برمی‌گردد، ولی به منظور برآورد هر چه دقیق‌تر هر یک از این شاخص‌های دمایی، به دلیل اهمیت و تاثیر آن‌ها در پیش‌بینی روند رشد و نمو گونه‌های مورد بررسی در شرایط مشابه، لازم است مدل‌های مهم مورد استفاده توسط متخصصین امر در شرایط همسان ارزیابی شده و بهترین مدل یا مدل‌ها از بین آن‌ها انتخاب شوند.

استفاده از مدل‌های غیرخطی در تخمین شاخص‌های مهم دمایی رشد و نمو

شاخص‌های دمایی مهمی که مدل‌های غیرخطی قادر به برآورد آن‌ها می‌باشند، شامل آستانه پایین، دمای بهینه و آستانه بالای دمای رشد و نمو می‌باشد. هر چند باید به این موضوع نیز توجه داشت که همگی مدل‌ها قادر به برآورد تمامی شاخص‌های دمایی یاد شده نمی‌باشند و این موضوع

جدول ۲- مقادیر برآورد شده برای پراسنجه‌های مدل‌های مورد ارزیابی به منظور توصیف رشد و نمو تابع دما و شاخص‌های دمایی مراحل رشدی کفشدوزک *Cryptolaemus montrouzieri*

Table 2. Values of the parameters for evaluated descriptive models of temperature-dependent development and thermal indices of *Cryptolaemus montrouzieri*.

Model	Parameters	Developmental stages			
		Incubation period	Larval period	Pupal period	Total immature stages
Briere-1	a	18.98×10^{-5}	5.29×10^{-5}	8.16×10^{-5}	2.81×10^{-5}
	t_{min}	11.34	10.12	9.02	10.03
	t_{opt}	29.60	29.20	31.11	29.54
	t_{max}	35.26	35.00	37.64	35.40
Briere-2	a	2.66×10^{-4}	1.10×10^{-4}	1.25×10^{-4}	0.43×10^{-5}
	t_{min}	6.16	7.05	6.31	7.55
	t_{max}	33.84	30.87	37.08	33.56
	t_{opt}	31.10	29.00	33.20	30.08
Lactin	d	5.09	6.83	3.80	3.76
	T_l	2.06	1.18	0.21	0.14
	t_{min}	0.01	0.004	0.006	0.002
	t_{max}	1.11–	1.04–	1.06–	1.02–
Logan-6	T_L	38.98	35.39	31.53	30.79
	t_{min}	9.93	10.57	9.34	10.40
	t_{opt}	30.56	29.00	30.10	34.26
	t_{max}	35.99	32.43	31.09	30.33
Logan-10	a	0.032	0.031–	0.008	0.002
	T_L	0.162	0.187	0.111	0.108
	t_{max}	36.605	34.164	36.714	32.725
	t_{opt}	5.816	5.394	3.650	1.868
Polynomial 3 rd order (Harcourt)	a	30.57	28.80	31.14	29.00
	a	1.249	0.243	0.717	0.475
	T_L	0.147	0.168	0.135	0.111
	k	40.016	37.722	39.604	35.806
	t_{opt}	6.740	6.977	4.200	1.695
	t_{max}	109.895	93.622	128.887	213.867
Polynomial 3 rd order (Harcourt)	a	1.16×10^{-4} –	0.30×10^{-4} –	0.39×10^{-4} –	0.17×10^{-4} –
	T_L	0.008	0.002	0.003	0.001
	k	0.16–	0.036–	0.059–	0.022–
	t_{opt}	1.155	0.232	0.420	0.151
Polynomial 3 rd order (Harcourt)	k	38.66	37.73	43.43	38.42
	t_{opt}	30.26	28.99	33.00	29.76

قبولی از نظر مطلوبیت میزان برآزش داشتند، ولی با توجه به معیارهای زیستی بر پایه مشاهدات و داده‌های ثبت شده تخمین شاخص‌های دمایی و مدل‌های ریاضی ارائه شده توسط دو مدل بریر-۲ و لاکتین تایید شد.

بر این اساس، در پژوهش حاضر نیز ۶ مدل غیرخطی پرکاربرد برای معرفی بهترین مدل ریاضی توصیف کننده رشد و نمو هر یک از مراحل رشدی کفشدوزک کریپتولموس مورد ارزیابی قرار گرفت. هر چند تمامی مدل‌های مورد ارزیابی از نظر معیارهای آماری قابل

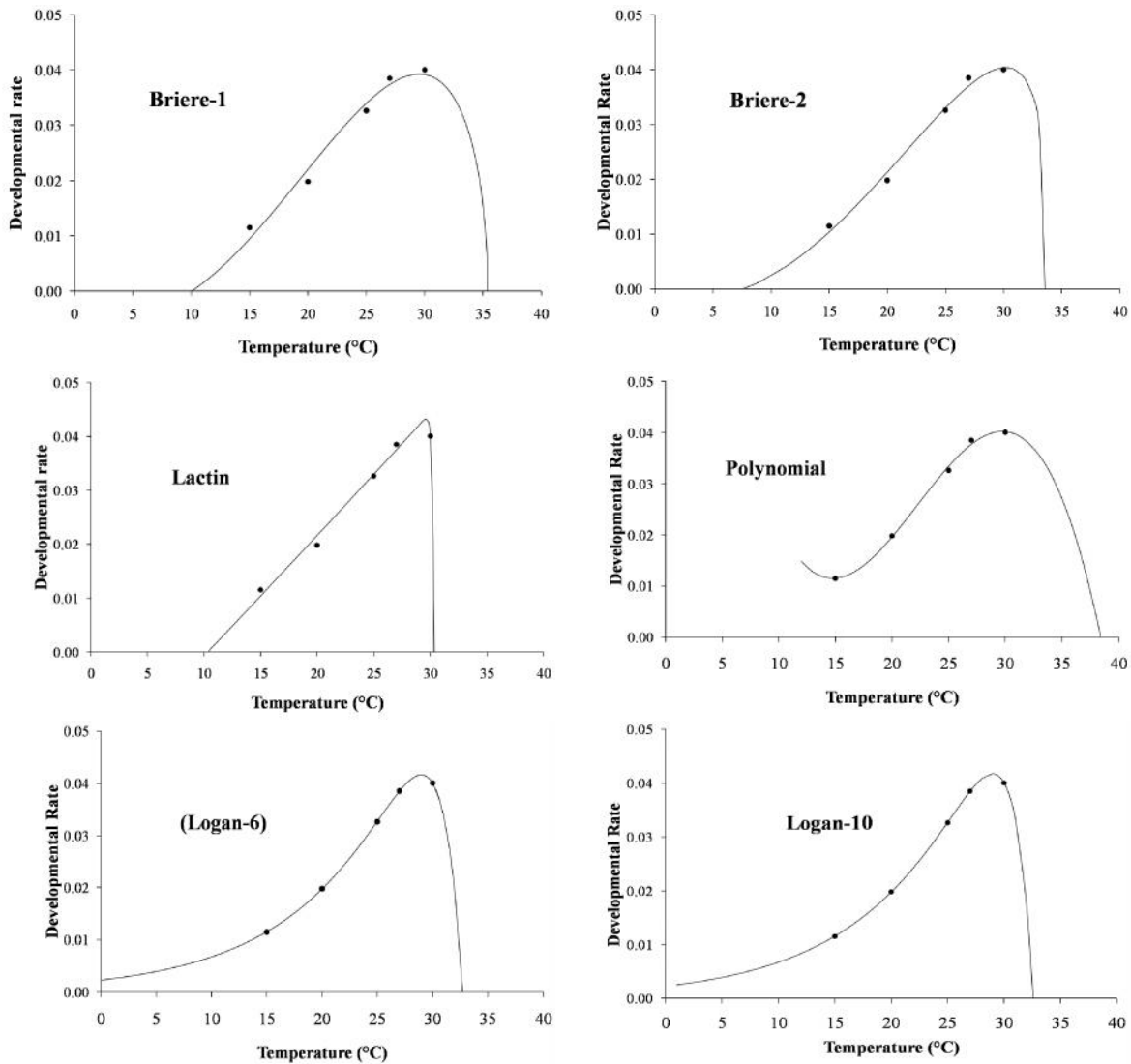
جدول ۳- مقادیر برآورد شده برای شاخص‌های آماری مورد استفاده به منظور ارزیابی مدل‌های غیرخطی برای توصیف روند رشد و نمو مراحل مختلف رشدی کفشدوزک *Cryptolaemus montrouzieri* در دماهای مورد بررسی.

Table 3. Values of applied statistical criteria for evaluation of mathematical models to describe temperature-dependent development of *Cryptolaemus montrouzieri* in examined temperatures.

Developmental stage	Model	No. of parameteres	R^2	$RSS (*10^{-4})$	AIC
Incubation Period	Briere-1	3	0.9990	23.16	41.16-
	Briere-2	4	0.9629	9.72	44.36-
	Lactin	4	0.9598	10.85	43.70-
	Logan-6	4	0.9680	10.53	43.94-
	Logan-10	5	0.9698	8.83	49.94-
	Polynomial	4	0.9978	0.014	67.55-
Larval Period	Briere-1	3	0.9995	0.15	57.49-
	Briere-2	4	0.9971	0.06	60.35-
	Lactin	4	0.9949	0.10	57.47-
	Logan-6	4	0.9978	0.11	57.02-
	Logan-10	5	0.9985	0.03	63.07-
	Polynomial	4	0.9995	0.01	69.63-
Pupal Period	Briere-1	3	0.9521	3.74	41.49-
	Briere-2	4	0.9747	2.05	42.50-
	Lactin	4	0.9724	2.15	42.27-
	Logan-6	4	0.9865	1.04	45.89-
	Logan-10	5	0.9852	1.32	44.73-
	Polynomial	4	0.9873	0.97	46.24-
Total Immature Stages	Briere-1	3	0.9796	0.13	58.37-
	Briere-2	4	0.9905	0.05	60.29-
	Lactin	4	0.9910	0.05	60.57-
	Logan-6	4	0.9999	0.0002	89.19-
	Logan-10	5	0.9934	0.06	59.90-
	Polynomial	4	0.9978	0.01	67.55-

معیارهای آماری، جزو بهترین مدل‌های ارزیابی شده برای پیش‌بینی روند رشد و نمو مراحل مختلف رشدی کریپتولموس به حساب می‌آیند، ولی این دو مدل نیز برای شاخص آستانه بالای دمای رشد و نمو مراحل رشدی جنینی، لاروی و شفیرگی کفشدوزک کریپتولموس مقادیری که تخمین زده بودند بالاتر از ۳۴ درجه‌ی سلسیوس و در تعارض با مشاهدات به عمل آمده در دماهای مشابه بود (جدول ۲).

برای مثال مشاهدات ثبت شده با در نظر گرفتن معیارهای آماری ارزیابی مدل، بهترین برازش را روی مدل پلی‌نومیال داشتند، ولی این مدل از یک سو مقادیری که برای شاخص‌های دمایی آستانه‌ی بالای دما و دمای بهینه رشد و نمو برآورد کرده بود، بالاتر از مشاهدات و پیش‌بینی‌های اولیه بود. به عبارت دیگر معنی داری زیستی آن‌ها تایید نشد. از سوی دیگر این مدل در دماهای پایین قادر به ارائه‌ی تخمین درستی از روند رشد و نمو کفشدوزک کریپتولموس نبود (شکل ۱). یا دو مدل لوگان ۶- و لوگان ۱۰-، هرچند از نظر



شکل ۱- برازش مدل های غیر خطی روی مقادیر مشاهده شده نرخ رشد و نمو کل دوره نابلغ کفشدوزک *Cryptolaemus montrouzieri* در دماهای مورد بررسی، بر حسب درجه سلسیوس. نقاط سیاه رنگ مشخص کننده مقادیر مشاهده شده است.

Figure 1. Fitting nonlinear models to observed values of developmental rates (1/d) of *Cryptolaemus montrouzieri* overall immature stages at studied temperatures (°C). Black dots present observed data.

کفشدوزک کریپتولموس با مشاهدات اولیه آزمایشگاهی بیشتر همخوانی داشت. بر این اساس پیش بینی روند رشد و نمو کفشدوزک کریپتولموس در دماهای نزدیک به آستانه پایینی دمای رشد و نمو و تخمین آستانه پایینی دمای رشد و نمو با بکارگیری مدل لاکتین بیشتر مورد تایید می باشد. در مقابل در دماهای بالاتر در حول و حوش دمای بهینه رشد و نمو و آستانه بالای دمای رشد و نمو، مدل بریر-۲ قادر به پیش بینی دقیق تر سرعت رشد و نمو و تخمین شاخص های دمایی یاد شده بود (جدول ۲).

بر این اساس، ۳ مدل بریر-۱، بریر-۲ و لاکتین برای تخمین دقیق شاخص های دمایی هدف باقی ماندند. در بین ۳ مدل یاد شده نیز بهترین برازش از نظر معیارهای آماری مربوط به دو مدل بریر-۲ و لاکتین بود (جدول ۳). ولی هرچند دو مدل انتخاب شده قادر به پیش بینی روند رشد و نمو در دماهای نزدیک به دمای آستانه پایینی رشد و نمو و همچنین برآورد شاخص دمایی یاد شده بودند، ولی در مقایسه با مدل بریر-۲ پیش بینی های مدل لاکتین برای تغییرات روند نرخ رشد و نمو مراحل مختلف رشدی

بحث

در گذشته پژوهش‌های متعددی در مورد بررسی طول دوره رشد و نمو مراحل مختلف رشدی کفشدوزک کریپتولموس و زیست‌شناسی این شکارگر ارزشمند در شرایط محیطی و روی میزبان‌های مختلف انجام شده بود. از آن جمله می‌توان به تحقیقات قربانیان (۱۳۸۹)، خدامان (۱۳۷۱)، قاری‌زاده (۱۳۸۱)، قدیمی مؤذنی (۱۳۸۳)، Ehsan (1998)، Al-Mani & Krishnamoorthy (1999a)، khateeb & Raie (2001) و Mani & Krishnamoorthy (2001) اشاره کرد. در تمام این پژوهش‌ها مشخص شده بود که شرایط مختلف محیطی و نوع میزبان مورد استفاده برای تغذیه روی روند رشد و نمو کفشدوزک کریپتولموس مؤثر است. تفاوت‌های مشاهده شده بدلیل تفاوت در سازگاری-های بوم‌شناختی جمعیت‌های مختلف، شرایط محیطی آزمایش‌ها و میزبان مورد استفاده برای تغذیه آن‌ها حادث شده باشد. در تخمین دماهای بحرانی مؤثر بر رشد و نمو و سایر فعالیت‌های زیستی کفشدوزک مورد بررسی، Bodenheimer (1951) گزارش کرده است که رشد و نمو کفشدوزک *C. montrouzieri* در دمای ۱۰/۳ درجه‌ی سلسیوس متوقف می‌شود. در این پژوهش نیز دمای آستانه پایین رشد و نمو کل مراحل رشدی کفشدوزک ۱۰/۴۰ درجه سلسیوس برآورد شد. همچنین Gautam (1996) اعلام کرده بود که گونه‌های گرمسیری کفشدوزک

C. montrouzieri در دمای ۲۰-۱۵ درجه سلسیوس غیر فعال می‌باشند و کمترین دما برای تغذیه و تخم‌ریزی آن‌ها ۲۱ درجه سلسیوس می‌باشد. البته باید به این نکته نیز توجه داشت که بدلیل وجود تفاوت در سازگاری‌های بوم‌شناختی جمعیت‌های مختلف یک گونه که در مناطق مختلف جغرافیایی مستقر شده‌اند نمی‌توان انتظار داشت شاخص‌های دمایی جمعیت مورد مطالعه با شاخص‌های دمایی جمعیت‌های دیگری از همین گونه که توسط سایر پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است همسان باشد، این موضوع در گذشته توسط Lee & Haffaker *et al.* (1999)، Elliot (1998) و Ranjbar Aghdam *et al.* (2009) نیز تأیید شده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، به نظر می‌رسد، پژوهش حاضر اولین تلاش برای توصیف روند رشد و نمو تابع دمای مراحل مختلف رشدی کفشدوزک کریپتولموس با استفاده از مدل‌های ریاضی غیر خطی و نیز برآورد دقیق شاخص‌های مهم دمایی رشد و نمو (دماهای بحرانی) شامل آستانه پایین دما، دمای بهینه، آستانه بالای دما و نیاز گرمایی باشد. یافته‌های این پژوهش در راستای افزایش راندمان و سرعت تولید کفشدوزک کریپتولموس در حشره‌خانه‌ها (انسکتاریوم‌ها) و همینطور در برنامه‌های کنترل بیولوژیک شپشک‌های آردآلود قابل استفاده خواهد بود.

References

- Abdollahi Ahi, Gh., Afshari, A., Baniameri, V., Dadpour Moghanloo, H., Asadeh, Gh. & Yazdaniyan, M. 2012. Functional response of *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant (Col.; Coccinellidae) to citrus mealybug, *Planococcus citri* (Risso) (Hom., Pseudococcidae) under laboratory conditions. *Plant Protection*, 35(1): 1-14.
- Aghajanzadeh, S., Halagisani, M. & Gholamian, E. 2016. Study on efficiency of *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant for control of *Pulvinaria aurantii* Cockerell. *Plant Pests Research*, 5(4): 1-12.
- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Autom. Control* AC 19: 716-723.
- Analytis, S. 1977. Uber die relation zwischen biologischer entwicklung und temperature bei phytopathogenen Pilzen. *Phytopathology and Zoology*, 90: 64-76.

- Al-Khateeb, N. & Raie, A. 2001. A study of some biological parameters of the predator *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant introduced to *Planococcus citri* (Risso) in Syria, and estimate of its predation rate in the laboratory. *Plant Protection*, 19(2): 131–134.
- Angilletta, M.J. 2006. Estimating and comparing thermal performance curves. *Journal of Thermal Biology*, 31: 541–545.
- Badii, M.H., McMurtry, G.A. & Flores, A.E. 1999. Rates of development, survival, and predation of immature stages of *Phytoseiulus longipes* (Acari: phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology*, 23: 611–621.
- Banerjee, B. 1993. Tea production and processing. Oxford and IBH publishing. 336 pp.
- Behadad, H. 2002. Introductory entomology and important plant pests in Iran, Yadbood Pub., Isfahan, Iran. 848 pp.
- Bodenheimer, F.S. 1951. Citrus entomology in the Middle East with special reference to Egypt, Iran, Iraq, Palestine, Syria, Turkey. W. Junk, The Hague. 663 pp.
- Briere, J.F., Pracros, P., Roux, A.Y.le. & Pierre, J.S. 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environmental Entomology*, 28: 22–29.
- Burnham, K.P. & Anderson, D.R. 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. Springer, New York.
- Campbell, A., Frazer, B.D., Gilbert, N., Gutierrez, A.P. & Makauer, M. 1974. Temperature requirements of some aphids and their parasites. *Journal of Applied Ecology*, 11: 431–438.
- Casey, T.M. 1992. Biophysical ecology and heat exchange in insect. *American Zoologist*, 32: 225–237.
- Charles, J.G. 1993. A survey of mealybugs and their natural enemies in horticultural crops in North Island, New Zealand, with implications for biological control. *Biocontrol Science and Technology*. 3(4): 405–418.
- Clausen, C.P. 1978. Introduced parasites and predators of arthropod pests and weeds: a world review. *Agr. Handb. No. 48*, U. S. Dept. Agric., Wash., D.C. 545 pp.
- Copland, M.J.W., Perera, H.A.S. & Heidari, M. 1993. Influence of host plant on the biocontrol of glasshouse mealybug. *Bulletin OILB SROP*. 16(8): 44–47.
- Coppel, H.C. & Mertins, J.W. 1977. Biological insect pest suppression. Germany, Springer-Verlag, 314 pp.
- Cossins, A.R. & Bowler, K. 1987. Temperature biology of animals. Chapman and Hall, London.
- De Bach, P. 1973. Biological control of insect pest and weed. Chapman and Hall, New York. 434 pp.
- DeClerq, P. & Degheele, D. 1992. Development and survival of *Podisus maculiventris* (Say) and *Podisus sagitta* (Fab.) (Het.: Pentatomidae) at various constant temperatures. *Canadian Entomologists*, 124: 125–133.
- Ehsan, S. 1998. View about Predator *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant. [http:// www.arabscientist.org/english/page/11/](http://www.arabscientist.org/english/page/11/).
- Gautam, R.D. 1996. Reports on the use of coccinellid predators for the management of hibiscus (pink) mealybug in the Caribbean. Centeno (Trinidad and Tobago): Ministry of Agriculture, Land and Marine Resources Central Experiment Station. vp. (07774/H10.G3)
- Ghadimi-Moazeni, M. 2004. Study on biology and probability of mass rearing of *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant, predatory coccinellid of citrus mealy bug, M.Sc. dissertation. Islamic Azad University, Tehran Researches and Science Branch, 67 pp. (In Persian).

- Gharizadeh, E. 2002. Comparison of biological characters of predatory coccinellid, *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant on *Pulvinaria aurantii* Cockerell and *Planococcus citri* (Risso) in laboratory conditions, M.Sc. dissertation. Isfahan University of Technology, 102 pp. (In Persian with English summary).
- Ghorbanian, S. 2010. Biology and efficacy of *Cryptoleamus montrouzieri* Mulsant (Coleoptera: Coccinellidae) against *Planococcus citri* (Risso) (Hemiptera: Pseudococcidae) on *Solenostemon scutellarioides* (L.) Codd (*Coleus blumeri* (Bentham)), M.Sc. Thesis. University of Tehran. 97 pp. (In Persian with English summary).
- Ghorbanian, S., Ranjbar Aghdam, H. & Ghajarieh, H. 2014. Efficacy of *Cryptolaemus montrouzieri* in Biological Control of *Planococcus citri* on *Solenostemon scutellarioides* under greenhouse Conditions. Iranian Journal of Plant Protection Science, 44(2): 235–241.
- Ghorbanian, S., Ranjbar Aghdam, H., Ghajarieh, H. Malkeshi, S.H. 2011. Life Cycle and Population Growth Parameters of *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant (Col.: Coccinellidae) Reared on *Planococcus citri* (Risso) (Hem.: Pseudococcidae) on *Coleus*. Journal of the Entomological Research Society, 13(2): 53–59.
- Gilbert, N. & Raworth, D.A. 1996. Insects and temperature, a general theory. The Canadian Entomologist, 128: 1–13.
- Gordon, R. D. 1985. The Coccinellidae (Coleoptera) of America, North of Mexico. Journal of New York Entomological Society, 93: 1–912.
- Harcourt, D.C. & Yee, J.M. 1982. Polynomial algorithm for predicting the duration of insect life stages. Environmental Entomology, 11: 581–584.
- Heidari, M. & Copland, M.J.W. 1993. Honeydew: a food resource or arrestant for the mealybug predator *Cryptolaemus montrouzieri*. Entomophaga, 38(1): 63–68.
- Howell, J.F. & L.G. Neven. 2000. Physiological development time and zero development temperature of the codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). Environmental Entomology, 29: 766–772.
- Huffaker, C.B. & Gutierrez, A.P. 1999. Ecological Entomology, Jhon Wiley & Sons, Inc., USA.
- Huffaker, C.B., Berryman, A. & Turchin, P. 1999. Dynamics and regulation of insect populations, In: C.B. Huffaker and A.P. Gutierrez (eds.), Ecological Entomology, 2nd ed. Wiley, New York. 269–305.
- Izhevsky, S.S. & Orlinsky, A.D. 1988. Life history of the imported *Scymnus* (*Nephus*) *reunioni* (Col.: Coccinellidae) predator of mealybugs. Entomophaga, 33(1): 101–114.
- Jervis, M.A. & Copland, M.J.W. 1996. The life cycle, In: M. Jervis & N. Kidd (eds.), Insect natural enemies; practical approaches to their study and evaluation. Chapman and Hall, London. 63–161.
- Khodaman, A. 1993. Biological study of mealybug *Nipaecoccus viridis* and possibility of its biological control, by crypt ladybird and other available coccinellids in Khuzestan province (southwest Iran). M.Sc. Thesis. Shahid Chamran University.
- Kontodimas, D.C., Eliopoulos, P.A., Stathas, G.J. & Economou, L.P. 2004. Comparative temperature-dependent development of *Nephus includens* (Kirsch) and *Nephus bisignatus* (Boheman) (Coleoptera: Coccinellidae) preying on *Planococcus citri* (Risso) (Homoptera: Pseudococcidae): evaluation of a linear and various non-linear models using specific criteria. Environmental Entomology, 33: 1–11.
- Lactin, D.J., Holliday, N.J., Johnson, D.L. & Craigen, R. 1995. Improved rate model of temperature-dependent development by arthropods. Environmental Entomology, 24: 68–73.

- Lee, J.H. & Elliott, N.C. 1998. Comparison of developmental response to temperature in *Aphelinus asychis* (Walker) from two different geographic regions. *Southwest Entomology*, 23: 77–82.
- Logan, J. A., Wollkind, D. J., Hoyt, S.C. & Tanigoshi, L.K. 1976. An analytical model for description of temperature dependent rate phenomena in arthropods. *Environmental Entomology*, 5: 1133–1140.
- Malkeshi, S.H. & Heidari, H. 2006. *Chrytolaemus montrouzieri* The predator of mealy bugs, Ministry of Jihad–e–Agriculture, Agriculture Research & Education Organization, Plant Pests & Disease Research Institute, Biological Control Research Department, 16 pp.
- Mani, M. & Krishnamoorthy, A. 1999a. Predatory potential and development of the Australian ladybird beetle, *Cryptolaemus montrouzieri* Muls. (Col.:Coccinellidae) on the spiraling whitefly, *Aleurodicus disperses*. *Russel Entomology*, 24 (2): 197–198.
- Mani, M. & Krishnamoorthy, A. 1999b. *Maconellicoccus hirsutus* on acid lime in India. *Insect Environment*. 5(2): 73–74.
- Mani, M. & Krishnamoorthy, A. 2001. Suppression of *Maconellicoccus hirsutus* (Green) on guava. *Insect Environment*, 6(4): 125.
- Meyerdik, D.E., French, G.V., Hart, W.G., & chandler, L.D. 1979. Citrus mealybug effect of pesticide residue on adults of the natural enemy complex. *Journal of Economic Entomology*, 72: 893–895.
- Murray, D.A. 1978. Effect of fruit fly sprays in the abundance of the abundance of the citrus mealybug *Planococcus citri* (Risso), and its predator, *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant on Passion fruit in south eastern Queensland. *Journal of Agriculture and Animal Science*, 35(2): 143–147.
- Ranjbar Aghdam, H., Fathipour, Y., Radjabi, Gh. & Rezapanah, M. 2009. Temperature–dependent development and temperature thresholds of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Iran. *Environmental Entomology*, 38(3): 885–895.
- Raspi, A. 1988. Preliminary notes on Entomophagus insect of *Saisselia oleae* and *Lichtensia vibroni* in olive groves of the Tuscan and West Ligurian coast. *Frustula Entomolica*, 113–128.
- Rodriguez–Saona, C. & Miller, J.C. 1999. Temperature–dependent effect on development, mortality, and growth of *Hippodamia convergens* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 28: 518–522.
- Roy, M., Brodeur, J. & Cloutier, C. 2002. Relationship between temperature and developmental rate of *Stethorus punctillum* (Coleoptera: Coccinellidae) and its prey *Tetranychus mcdanieli* (Acari: Tetranychidae). *Environmental Entomology*, 31(1): 177–187.
- Sinclair, B.J., Vernon, P., Jacoklok, C. & Chown, S.L. 2003. Insect at low temperatures: An ecological perspective. *Trend in Ecology and Evaluation*, 18: 250–257.
- Stoetzel, M.B. 1989. Common names of insects and related organisms. *Entomological Society of America*, 195 pp.
- Vucetich, J.A., Peterson, R.O. & Schaefer, C.L. 2002. The effect of prey and predator densities on wolf predation. *Ecology*, 83: 3003–3013.
- Wagner, T.L., Wu, H.I., Sharpe, P.J. H., Schoolfield, R.M. & Coulson, R.N. 1984. Modeling insect development rates: A literature review and application of a biophysical model. *Annals of the Entomological Society of America*, 77: 208–225.

- Yang, X., Shen, M., Xiong, J. & Guo, Z. 1996. Approaches to enhance the effectiveness of biocontrol of *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae) with *Stethorus punctillum* (Coleoptera: Coccinellidae) in citrus orchards in Guizhou. *Systematic and Applied Acarology*, 1: 21–27.
- Zamani, A.A., Talebi, A.A., Fathipour, Y. & Baniameri, V. 2006. Temperature dependent functional response of two aphid parasitoids, *Aphidius colemani* and *Aphidius matricariae* (Hymenoptera: Aphidiae), on the cotton aphid. *Journal Pest Science*, 79: 183–188.

**Study on mathematical model for temperature–dependent development of *Cryptolaemus montrouzieri*
Mulsant (Coleoptera: Coccinellidae)**

Hossein Ranjbar Aghdam

Iranian Research Institute of Plant Protection. Agricultural, Research, Education and Extension Organization (ARREO), Tehran, Iran

Corresponding author: Ranjbar Aghdam, email: hrap1388@gmail.com

Received: Oct., 21, 2019

7(1) 93-109

Accepted: Mar., 15, 2020

Abstract

The mealybug destroyer, *Cryptoleamus montrouzieri* Mulsant is known as the most effective biological control agent of the mealybugs. The effect of temperature on developmental rate of *C. montrouzieri* was studied. Developmental times of incubation period, larval, pupal, and overall immature stages of the mealybug destroyer were recorded at temperatures ranging 15–35°C, 50–60% RH, and a photoperiod of (L:D) 16:8h. According to the ANOVA, temperature affected significantly developmental time of the mealybug destroyer at 1% of probability level and increasing temperature lead to decreasing developmental time. In order to describe temperature–dependent development and to estimate related thermal indices, developmental rate of *C. montrouzieri* modeled as a function of temperature using mathematical models. The results showed Briere–2 and Lactin non–linear models had the best performance to predict developmental rate of *C. montrouzieri* in the studied temperature range. According to the non–linear models, thermal tolerance for development of the overall immature stages of the mealybug destroyer was 10.40–33.56°C and optimal temperature was 30.08°C. Obtained results can be used for improving environmental conditions of the mealybug destroyer mass rearing instectariums and biological control programs.

Keywords: temperature, development, mathematical model, mealybug destroyer
