تحقیقات آفات گیاهی

علمی پژوهشی ۱۴۰۴ -۱۵(۴): ۵۹-۷۳	https://doi.org/10.22124/iprj.2026.31811.1660	pISSN:2322-2409 eISSN: 2538-6123

OPEN ACCESS

تأثیر زیرکشندگی تنش گرمایی بر فراسنجه‌های تولید مثلی و جلب جنسی *Plodia interpunctella*

ندا لاجوردی[۱]

https://orcid.org/0009-0001-8053-2167

مرتضی موحدی فاضل[۲*]

https://orcid.org/0000-0001-6361-2766

۱ و ۲-گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

عارف معروف[۳]

https://orcid.org/0000-0003-2280-5654

۳- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران

چکیده: تحقیق حاضر با هدف ارزیابی تاثیر گرمای حداقلی بر برخی از فعالیت‌های تولیدمثلی شب‌پره هندی *Plodia interpunctella* (Hübner, 1813) طراحی شد. حشرات کامل در سنین یک، سه و پنج روزگی به مدت ۱۸ دقیقه در دمای ۴۴ درجه سلسیوس قرار گرفتند. نتایج حاصل بیانگر تاثیر قابل توجه تنش گرمایی بر حشرات نر بود. بیشترین و کمترین میزان زادآوری در حشرات سه روزه تیمارهای شاهد و نرهای تنش‌دیده به‌ترتیب به میزان ۱۴۴/۴ و ۱۶ عدد تخم مشاهده شد که بیانگر کاهش حدود ۹۰٪ در تخمگذاری است. همچنین میزان درصد بارآوری در تیمار شاهد به میزان ۲±۸۸ ٪ و کمترین مقدار در تیمار نرهای تنش‌دیده به میزان ۱۲±۴۲٪ ثبت شد. تیمارهای گرمایی تاثیری بر فراوانی جفتگیری نداشتند، اما بر طول مدت جفتگیری در حشرات سه روزه تاثیرگذار بودند. همچنین تنش گرمایی، کاهش ۴۰ تا ۵۰٪ میزان جلب به سمت تله‌های فرمونی در درون تونل باد را نشان داد. به‌طوری‌که در تیمار شاهد و نرهای تنش‌دیده یک روزه درصد جلب به‌ترتیب ۳/۳±۹۶/۶۷٪ و ۳/۳±۵۳/۳۳٪ بود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کاهش همزمان ۹۰٪ زادآوری و نیز ۵۸٪ تفریخ تخم در تیمار نرهای تنش‌دیده در مقایسه با شاهد، کاهش ۹۶٪ نتاج خالص را به همراه داشته است. نتایج حاصله بیانگر آن است که اعمال تنش حرارتی زیرکشنده بر حشرات کامل شب‌پره هندی می‌تواند علاوه بر ایجاد اختلال در فعالیت‌های تولید مثلی، کاهش نتاج تولیدی را به‌همراه داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: بارآوری، زادآوری، طول عمر، فراوانی جفتگیری

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۷/۹

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۱۲/۲۴

***Citation*:** Lajvardi, N., Movahedy Fazel M. & Marouf, A. (2026). Sublethal effect of thermal stress on reproduction parameters and sexual attraction of *Plodia interpunctella*. *Plant Pest Research*, *15*(4), 59-73. **DOI: https://doi.org/10.22124/iprj.2026.31811.1660**

*Corresponding author: movahedi@znu.ac.ir

Journal of Plant Pest Research is published by University of Guilan
This journal is an open access journal licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International license (CC BY 4.0)

مقدمه

موجودات زنده دارای آشیانه دمایی[1] هستند (Van der Have, 2002) که عوامل مختلفی در انتخاب آن نقش دارند. یکی از عوامل تعیین‌کننده، محدودیت‌های دمایی زادآوری[2] است که در دامنه‌های بالا و پایین موجب عقیم شدن موجود زنده و یا توقف زادآوری می‌شود (Walsh *et al*., 2019; Parratt *et al*., 2021; van Heerwaarden & Sgrò, 2021). به عبارت دیگر، دما عامل کلیدی در مدیریت تغییرات بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و اکولوژیک موجودات است که به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم روی آنها تاثیرگذار است (Kontopoulos *et al*., 2018). خونسردی در حشرات باعث شده است که به‌راحتی تحت تاثیر تغییرات دمایی محیط قرار گرفته و دمای بدن آنها به‌سرعت تغییر نموده و به سطوح کشنده برسد. نتیجه این امر، تغییرات متابولیک سریع است که منجر به ایجاد نارسایی‌هایی شده که بر زنده‌مانی، زادآوری، تحرک، رقابت و نیز سلامت اسپرم‌ها اثر می‌گذارد (Parmesan, 2006; Sales *et al*., 2018; McAfee *et al*., 2020; Martinet *et al*., 2021). از طرفی، توقف زادآوری سلاحی کارآمد در کاهش جمعیت آفات می‌باشد. بر اساس گزارش‌های موجود، تنش‌های گرمایی می‌توانند اثرات سریع و کشنده‌ای بر حشرات داشته باشند (Hallman *et al*., 2005; Schou *et al*., 2014; Sales *et al*. 2021). پژوهش‌های انجام‌شده نشان دادند که حرارت موجب بالا رفتن اسیدیته یا افزایش یون‌ها می‌شود و یا می‌تواند اثرات تخریبی چشمگیری بر ماکروملکول‌هایی همچون پروتئین‌ها، DNA، RNA، چربی و کربوهیدرات و در ساختار سلول نیز غشای سلول، هسته، ریبوزوم و میتوکندری داشته باشد (Neven, 2000). بررسی‌های گوناگون نشان می‌دهند که بین تنش حرارتی و زادآوری (Hoffmann & Parsons, 1989) و نرخ رشد و نمو (Hoffmann & Parsons, 1993; Chippindale *et al*., 1998; Harshman *et al*., 1999) و کاهش اندازه بدن ارتباط وجود دارد (Bubliy & Loeschcke, 2005). همچنین تغییرات دمایی روی زادآوری افراد ماده و میزان جفت‌گیری افراد نر مؤثر است (Mahroof *et al*., 2005; Dahlhoff *et al*., 2008). با توجه به تاثیرات بیان‌شده، به‌نظر می‌رسد تیمارهای گرمایی بتوانند به‌عنوان سلاحی جایگزین برای کنترل آفات انباری و باغی مورد استفاده قرار گرفته و از این طریق بتوان میزان مصرف حشره‌کش‌ها و آثار مخرب زیست‌محیطی آنها را به کمترین میزان ممکن رساند (Zhu *et al*., 2017).

شب‌پره هندی *Plodia interpunctella* (Hübner, 1813) (Lepidoptera: Pyralidae) یکی از مهم‌ترین آفات انباری است که در اغلب نقاط جهان (به‌جز قطب جنوب) یافت می‌شود. دامنه میزبانی این آفت به‌نسبت وسیع و فعالیت آن از ۱۷۹ غذای مختلف از ۴۸ کشور جهان گزارش شده است (Hagstrum, 2013). میزان رشد و نمو، زنده‌مانی و تولیدمثل این آفت تحت تاثیر غذای لاروها و نیز شرایط محیطی می‌باشد (Defilippo *et al*., 2019). تاثیر دمای پرورش بر رفتار تولیدمثلی و نیز نوع اسپرم‌های تولیدی توسط نرهای شب‌پره هندی بررسی شده است (Iossa *et al*., 2019). حشرات کامل این آفت به‌طور معمول در زمان ظهور در بخش‌های بالای انبار و با فاصله از محصول تجمع می‌نمایند و می‌توان از این فرصت برای تیمار گرمایی کوتاه مدت اقدام نمود، به‌گونه‌ای که آثار سوء کمتری بر محصول داشته باشد. در این تحقیق تاثیر تنش گرمایی زیرکشنده بر رفتار تولیدمثلی شب‌پره هندی به‌عنوان یک روش کنترلی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

پرورش حشرات

حشرات کامل شب‌پره هندی از روی خرمای آلوده جمع‌آوری و شناسایی شدند. لاروها روی رژیم غذایی حاوی سبوس گندم (۱۰۰گرم)، گلیسرول (۱۰ گرم)، مخمر آبجو (۱۰ گرم) (Cook, 1999) و فروکتوز (به مقدار ۱۰٪ نسبت به کل ماده) و در شرایط دمایی ۱±۲۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰±۵۰٪ درون اتاقک رشد پرورش یافتند. ظروف پلاستیکی به حجم حدود ۳/۵ لیتر

[1]. Thermal nich
[2]. Thermal fertility limit

(۵×۲۰×۳۵ سانتیمتر) حاوی حدود ۴۰۰ گرم غذا به‌منظور پرورش ۴۰۰ تخم منظور شدند (Huang & Subramanyam, 2003). لاروهای نر و ماده در سن پنجم لاروی بر اساس لکه رنگی موجود در حلقه پنجم شکمی نرها، تفکیک و به ظروف مجزای حاوی غذا منتقل شدند (Cook, 1999). شفیره‌ها پس از ظهور به ظروف پلکسی‌گلس (۲ لیتری) مخصوص پرورش حشرات کامل منتقل شدند. حشرات کامل پس از ظهور و ثبت زمان خروج، با آب عسل ۵٪ تغذیه شدند. از حشرات کامل نوظهور برای انجام آزمون‌ها و نیز استمرار پرورش کلنی استفاده شد.

آزمون‌های مقدماتی

به‌منظور تعیین اثرات تنش گرمایی بر فعالیت‌های زیستی و تولیدمثلی، از منحنی‌های دما-زمان استفاده شد. بر این اساس در ابتدا دمای تنش ۵۰٪ [1] (KTe50) محاسبه و سپس مدت زمان لازم برای فرواندازی ۳۰٪ (KTi30) جمعیت حشره زمانی که تحت تاثیر دمای KT50 قرار می‌گیرند، تعیین شد.

تعیین دمای تنش ۵۰٪ (KTe50)

به منظور تعیین دمای تنش، بر اساس روش گیل کریست و همکاران (Gilkrist *et al.*, 1997) اقدام شد. ۳۰ عدد حشره نر و ۳۰ عدد حشره ماده فعال انتخاب و پس از بی حس شدن در دمای ۵ درجه به مدت ۱۵ دقیقه از یکدیگر تفکیک و به طور جداگانه و در قالب سه تکرار به لوله‌های آزمایش (با حجم ۱۵۰ میلی متر) منتقل شدند. برای سهولت حرکت حشرات درون لوله آزمایش، یک عدد نوار کاغذی به ابعاد (۵×۱ سانتیمتر) درون لوله‌های آزمایش قرار داده شد. لوله‌های آزمایش حاوی حشرات، درون جا لوله‌ای مخصوص درون حمام آب گرم (بن‌ماری) قرار گرفتند. زمانی که دمای حمام به ۲۸ درجه سلسیوس رسید، لوله آزمایش حاوی حشرات کامل به درون آب منتقل شد. دمای حمام به‌طور متوسط به میزان یک درجه سلسیوس بر دقیقه در حال افزایش بود. با توجه به افزایش دمای آب به محض فرواندازی حشرات کامل به ته لوله، تعداد آن‌ها و دمایی که در آن فرواندازی انجام گرفته است ثبت شد. افزایش دما تا فرواندازی [2] آخرین حشره ادامه یافت. دمای درون لوله‌ها توسط دیتا لاگر CHY-502A1 با سنسور پرتابل نوع K و با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. پس از ثبت داده‌ها، منحنی ارتباط بین درجه حرارت و میزان فرواندازی حشرات کامل ترسیم و بر اساس معادله به‌دست‌آمده، دمایی که ۵۰ درصد از جمعیت را فرواندازی نموده بود، تعیین شد.

تعیین مدت زمان لازم برای فرواندازی ۳۰٪ (KTi30)

حشرات نر و ماده به تفکیک طبق روال اشاره‌شده درون لوله‌های آزمایش قرار گرفتند. دمای حمام آب گرم بر اساس نتایج به‌دست آمده از مرحله قبل، روی ۴۴ درجه سلسیوس تنظیم و لوله‌های آزمایش حاوی حشرات درون آن قرار داده شدند. میزان فرواندازی حشرات کامل به ته لوله به فواصل ۲ دقیقه یک‌بار ثبت شد. این آزمون در سه تکرار انجام شد و در هر تکرار از ۱۰ عدد حشره استفاده شد. پس از ثبت داده‌ها، منحنی رگرسیونی نوع اول بر اساس زمان و میزان فرواندازی حشرات کامل برازش داده شد. بر این اساس، درجه حرارت-زمانی که باعث ۳۰٪ فرواندازی حشرات کامل شود، محاسبه و به‌عنوان دمای تنش در تمام آزمایش‌ها استفاده شد. بر اساس اطلاعات محاسباتی، دمای تنش به‌طور میانگین ۴۴ درجه سلسیوس به مدت ۱۸ دقیقه تعیین شد.

آزمون‌های اصلی

به‌منظور بررسی اثرات تنش گرمایی روی برخی از پارامترهای زیستی و تولیدمثلی حشرات کامل شب پره هندی، سه نوع آزمون طراحی شد. در آزمون اول، نرها در سنین یک، سه و پنج روزگی تحت تاثیر تنش گرمایی قرار گرفته و ماده سالم تنش‌ندیده هم‌سن در اختیار آنها قرار گرفت. در آزمون دوم، ماده‌ها در سنین ۱، ۳ و ۵ روزگی تحت تاثیر تنش گرمایی قرار گرفته و نر سالم تنش‌ندیده هم‌سن در اختیار آنها قرار گرفت. در آزمون سوم حشرات نر و ماده هم‌سن در سنین یک، سه و پنج روزگی که به‌طور هم‌زمان تحت تنش قرار گرفته بودند، ارزیابی شدند. به‌منظور ایجاد تنش گرمایی حشرات کامل انتخابی به آون با دمای ۴۴ درجه سلسیوس منتقل

[1]. Knock down temperature 50%
[2]. Knock down

و به مدت ۱۸ دقیقه در این دما نگهداری شدند. دمای درون ظروف حاوی حشرات کامل کماکان توسط دیتالاگر کنترل شد. همچنین برای هر آزمون، تیمار شاهد شامل حشراتی بودند که به هیچ وجه تنش حرارتی ندیده بودند. هر آزمون در قالب ۱۰ جفت حشره کامل انجام گرفت. حشرات کامل به ظروف پتری با قطر شش سانتی‌متر منتقل و رفتارهای تولیدمثلی آنها از جمله شروع جفتگیری، طول مدت جفتگیری، فراوانی جفتگیری، مدت زمان قبل از جفتگیری و همچنین فراسنجه‌هایی نظیر زادآوری[1]، درصد بارآوری[2]، طول مدت تخمریزی، طول عمر تولید مثلی ماده (از زمان شروع تخمریزی تا اتمام آن) و طول عمر ماده و نر ثبت شد. با توجه به انجام جفتگیری در فاز تاریکی، برای آماربرداری از مراحل جفتگیری و فراسنجه‌های مربوطه از نور قرمز استفاده شد. برای انجام جفتگیری، کمی قبل از شروع فاز تاریکی، حشرات نر و ماده در یک ظرف قرار داده شده و کمی قبل از شروع فاز روشنایی از یکدیگر جدا شده و در ظروف مجزا نگهداری شدند. طی آزمون هر نر تنها با ماده خود قابلیت جفتگیری داشت. برای ثبت طول مدت جفتگیری، هر دو دقیقه یک‌بار ظروف پتری پایش شدند. بر اساس تجربه‌های به‌دست‌آمده، هر جفتگیری که کمتر از ۵ دقیقه به‌طول می‌انجامید، به‌عنوان مورد ناموفق[3] ثبت و از آمار حذف شد.

جلب فرومونی

در این قسمت نیز حشرات نر و ماده از سن پنجم لاروی از یکدیگر جدا شده و ادامه چرخه زندگی خود را در آون‌هایی مجزا سپری نمودند. نرها پس از خروج از جلد شفیرگی در سنین یک و پنج روزگی تحت تنش گرمایی قرار گرفته و واکنش آنها به سمت منبع فرومونی ماده درون تونل باد مورد ارزیابی قرار گرفت (Jones *et al*., 1981). تونل باد استفاده شده استوانه‌ای شکل به طول دو متر و قطر ۵۵ سانتی‌متر بود. جداره بیرونی آن توسط پلاستیک‌های پی‌وی‌سی پوشانیده شده بود. جریان باد ورودی و خروجی آن توسط دو عدد فن به‌ترتیب با قطرهای ۲۴ و ۱۹ سانتی‌متر و سرعت جریان باد ۰/۱۵ متر/ثانیه تأمین شد. در ابتدا و انتهای تونل باد دو عدد یکنواخت‌کننده جریان باد هم‌قطر تونل باد وجود داشت. در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از محل یکنواخت‌کننده خروجی، صفحه‌ای فلزی در ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری از سقف تونل به‌منظور محل رهایش حشرات نر پاسخ‌دهنده تعبیه شده بود. در طرف مقابل با همان فاصله بخش آورنده بوی ماده‌ها قرار گرفته بود. آزمون‌های تونل باد در اتاق رشد[4] با شرایط دمایی ۵±۲۸ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۱۰±۵۰٪ و میزان روشنایی ۱۰ لوکس انجام شد.

در این تونل از فرمون طبیعی حشره ماده استفاده شد. در هر تکرار، انتهای شکم پنج ماده یک روزه توسط قیچی تشریح جدا و روی کاغذ صافی شماره یک متلاشی شد. کاغذهای صافی داخل تله‌های فرمونی دلتا مجهز به چسب فرمون قرار داده شدند. نرهای تنش‌دیده کمی قبل از شروع دوران تاریکی در یک طرف تونل رها شدند. در شروع دوران روشنایی تعداد حشرات نر جلب‌شده به تله‌ها شمارش شد. در تیمار شاهد تنها نرهای سالم تنش‌ندیده رهاسازی شدند. این آزمون در سه تکرار و با حداقل ۱۰ حشره نر انجام شد.

آزمون‌های آماری

با توجه به آنکه برخی از فراسنجه‌های محاسباتی وابسته به انجام جفتگیری در حشرات کامل بودند و در صورت عدم انجام آن، حشره نتاجی را تولید نمی‌کردند، امکان تجزیه آماری به‌صورت آزمون فاکتوریل مهیا نشد. بنابراین، کل داده‌ها پس از بررسی پراکنش نرمال، بر اساس طرح کاملاً تصادفی و با نرم‌افزار مینی‌تب نسخه ۱۶[5] تجزیه و تحلیل شدند. داده‌های مربوط به زادآوری و فراوانی جفتگیری به‌دلیل نرمال نبودن و عدم تاثیر تبدیل داده در نرمال شدن آنها، با آزمون Kruskal-Wallis تجزیه و گروه‌بندی

[1]. Fecundity
[2]. Fertility
[3]. Reject
[4]. Walk in growth room
[5]. Mini-Tab v. 16

آنها با آزمون Mann-Whitney و با اعمال ضریب بن–فرونی انجام شد. درصد بارآوری و نیز میزان جلب نرها به تله‌های فرمونی پس از تبدیل به $\text{Arc sin}\sqrt{x}$ تجزیه و میانگین‌ها با آزمون توکی–کرامر گروه‌بندی شدند.

نتایج

آزمون‌های زیست‌سنجی مقدماتی

بر اساس نتایج حاصل از زیست‌سنجی‌های دمایی، معادله‌های مربوط به دمای فرواندازی حشرات ماده و نر به‌ترتیب:

$\%KTe= -381.2+9.679\ Temperature\ (R^2 = 87.5\%, F_{1, 60}=419.42, P<0.000)$ (females)
$\%KTe= - 509.5+12.92\ Temperature\ (R2= 92.4\% , F_{1, 55}= 664.37, P< 0.000)$ (males)

و معادله زمان لازم برای فرواندازی در دمای ۴۴ درجه سلسیوس برای حشرات ماده و نر به‌ترتیب:

$\%KTi=16.54+0.7\ Time\ (R^2=93.5\% , F_{1,61}=880.93 , P<0.000)$ (females)
$\%KTi= 17.96+0.68\ Time\ (R^2=94.6\%, F_{1, 61}=1037.18, P<0.000)$ (males)

هستند. بر اساس معادله‌های بالا دمای ۴۴ درجه سلسیوس در مدت ۱۸ دقیقه می‌تواند ۳۰٪ از حشرات کامل را فرواندازی نماید.

تاثیر تنش گرمایی بر زادآوری[1]

در این تحقیق تأثیر تنش گرمایی ۴۴ درجه سلسیوس به مدت ۱۸ دقیقه بر میزان زادآوری حشرات کامل یک، سه و پنج روزه در قالب سه تیمار نر تنش‌دیده + ماده سالم، ماده تنش‌دیده+ نر سالم، نر و ماده تنش‌دیده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر تأثیر معنی‌دار تنش‌های دمایی بر میزان زادآوری حشرات ماده در سنین یک ($H_{3,0.05}$ =10.29) و سه روزگی ($H_{3, 0.01}$=15.22) بود، اما بر زادآوری حشرات پنج روزه تاثیری نداشت. در حشرات یک روزه بیشترین زادآوری در تیمارهایی که حشرات نر و ماده هر دو تنش گرمایی دیدند و کمترین میزان زادآوری در تیمارهایی که فقط نرها تحت تنش گرمایی قرار گرفتند، مشاهده شد (شکل ۱). در حشرات سه روزه بیشترین و کمترین میزان زادآوری به‌ترتیب در تیمارهای شاهد با میانگین ۱۴۴/۱۴ عدد تخم و تیمار نرهای تنش‌دیده به میزان ۱۶ عدد ثبت شد (شکل ۱). تنش گرمایی بر زادآوری حشرات پنج روزه تاثیر معنی‌داری نداشت. مقایسه‌های انجام‌شده بین سنین مختلف نشان داد که بین تیمار نرهای تنش‌دیده یک، سه و پنج روزه اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۱). همچنین بین ماده‌های یک، سه و پنج روزه نیز تفاوت معنی‌داری در میزان زادآوری مشاهده نشد (شکل ۱). تنها در تیماری که نر و ماده هر دو تحت تنش بوده‌اند، تفاوت معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که بیشترین زادآوری با میزان ۹۱/۶ در یک روزه‌ها و در پنج روزه‌ها، هیچگونه تخمریزی مشاهده نشد (شکل ۱). همچنین تنش گرمایی فقط بر میانگین تخمریزی روزانه در حشرات یک روزه ($F_{3,36}$=5.01, P<0.01) و سه روزه ($F_{3,36}$=3.82, P<0.05) تاثیر معنی‌داری داشت. بیشترین میزان تخمریزی روزانه در حشرات یک روزه تیمار نر و ماده‌های تنش‌دیده با میانگین ۱۳/۰۷±۲/۷ و کمترین مقدار در تیمار نرهای تنش‌دیده با میانگین ۱/۰±۹۳/۱ عدد تخم مشاهده شد. در حشرات سه روزه، بیشترین و کمترین میزان تخمریزی روزانه به‌ترتیب در تیمارهای شاهد و نرهای تنش‌دیده با میانگین‌های ۱۶/۳۵±۱/۶۳ و ۳/۲۱±۰/۲ ثبت شد.

تاثیر تنش بر بارآوری[2]

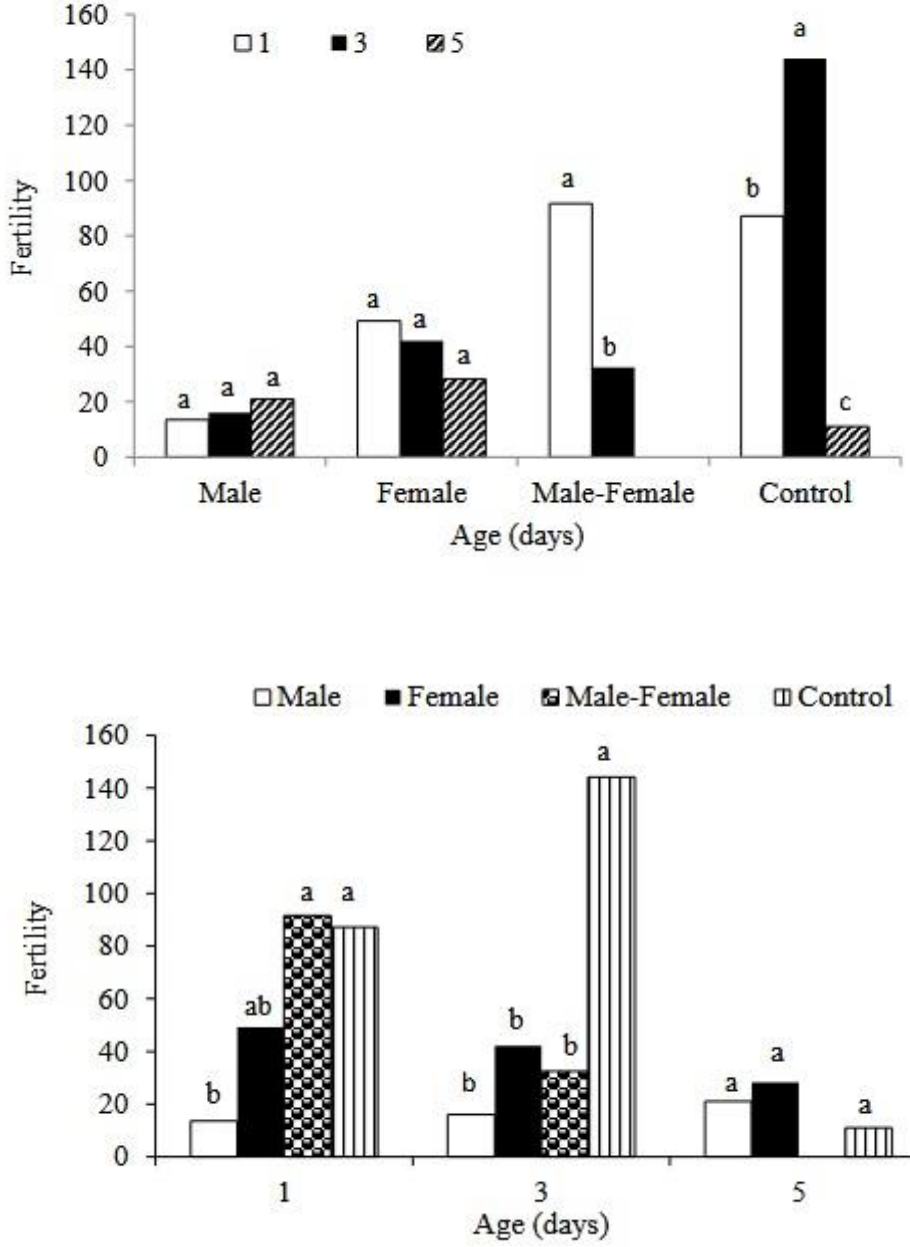
تنش گرمایی بر میزان بارآوری حشرات تیمار شده یک روزه ($F_{3,21}$=3.84, p<0.05) و سه روزه ($F_{3,20}$=4.58, p<0.05) تاثیر معنی داری داشت، اما بر حشرات پنج روزه بی تاثیر بود. بیشترین و کمترین درصد بارآوری به‌ترتیب در تیمارهای شاهد و نرهای تنش‌دیده با مقادیر ۸۸±۲٪ و ۱۲ ±۴۲٪ ثبت شد (شکل ۲).

تاثیر تنش بر تاخیر در جفت‌گیری

نتایج بیانگر تأثیر معنی‌دار تنش گرمایی بر مدت زمان قبل ازجفت‌گیری حشرات تیمار شده یک روزه ($F_{3,28}$=18.6, P<0.01) و سه روزه ($F_{3,27}$=5.94, P<0.01) بود. بیشترین تاخیر در جفتگیری در تیمار ماده‌های یک روزه تنش‌دیده با میانگین ۱۳/۴±۸۳/۷۵

[1]. Fertility
[2]. Fecundity

دقیقه و کمترین آن در حشرات ماده شاهد بود، به‌طوری‌که جفتگیری بدون هیچگونه وقفه‌ای شروع شد. همچنین بیشترین تاخیر در حشرات نر سه روزه تنش‌دیده با میانگین ۹/۸±۳۳/۳ دقیقه و کمترین آن در حشرات نرشاهد سه روزه با ۱/۳±۱/۸۸ دقیقه مشاهده شد. تنش گرمایی تأثیر معنی‌داری بر حشرات تیمار شده پنج روزه نداشت (شکل ۳).

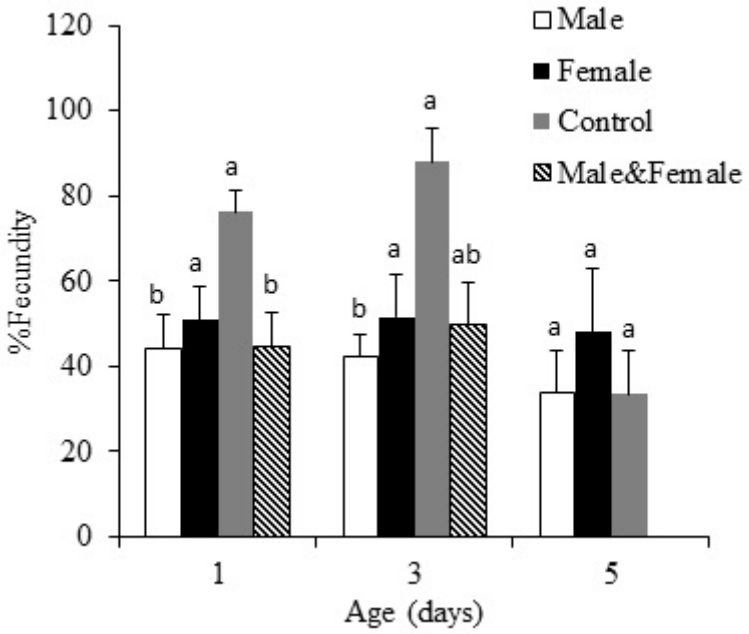


شکل ۱- تأثیر سنین مختلف و جنسیت حشرات کامل شب‌پره هندی بر کارایی تنش گرمایی بر تغییرات زادآوری ماده‌ها در تیمار-های نر تنش‌دیده، ماده تنش‌دیده، نر و ماده تنش‌دیده و شاهد. حروف متفاوت در هر سنی (نمودار پایین) و هر تیمار دمایی (نمودار بالا) بیانگر تفاوت معنی‌دار بین تیمارهای مختلف در سطح احتمال ۵٪ است (آزمون من‌ویتنی با اعمال ضریب بن‌فرونی).

Figure 1. The effect of different ages and sexes of adult Indian meal moths on the efficiency of heat stress on changes in female fertility in stressed male, stressed female, stressed male-female, and control treatments. Different letters at each age (lower graph) and each heat shock treatment (upper graph) indicate a significant difference between different treatments at the 5% level (Mann-Whitney test with Bonferroni coefficient).

تاثیر تنش گرمایی بر فراوانی و طول مدت جفت‌گیری

فراوانی جفت‌گیری حشرات یک روزه (P=0.056 و H=7.57) و سه روزه (P=0.081 و H=6.72) تحت تاثیر تنش گرمایی قرار نگرفت، ولی تاثیر معنی‌دار آن بر حشرات پنج روزه مشاهده شد (P=0.011 و H=11.11). در حشرات تنش‌دیده پنج روزه بیشترین میزان جفتگیری در تیمار مربوط به ماده‌های تنش‌دیده با مقدار ۰/۸±۰/۲ بار و کمترین آن مربوط به تیمار حشرات نر و ماده تنش‌دیده بود که هیچگونه جفتگیری مشاهده نشد. همچنین تنش گرمایی تنها بر طول مدت جفتگیری در حشرات سه روزه تاثیر معنی داری داشت ($F_{3,25}$=5.67, P<0.05). طولانی‌ترین و کوتاه‌ترین مدت جفت‌گیری به‌ترتیب در تیمارهای شاهد و نر و ماده تنش‌دیده با میانگین‌های ۱۴/۷±۸۹/۵ و ۵/۴۴±۴۲/۵ دقیقه مشاهده شد (شکل ۴).

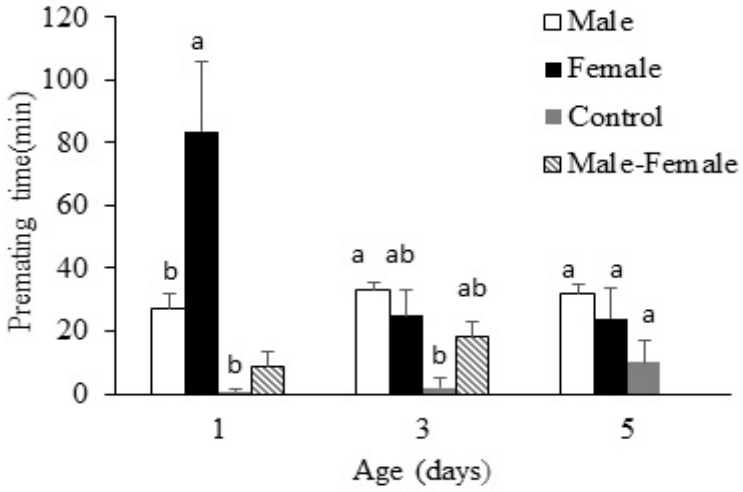


شکل ۲- تاثیر تنش گرمایی بر تغییرات درصد بارآوری حشرات کامل شب‌پره هندی در قالب تیمارهای: نر تنش‌دیده، ماده تنش‌دیده، نر و ماده تنش‌دیده و شاهد در سنین مختلف (میانگین‌هایی که در هر سن با حروف متفاوت نشان داده شده‌اند در سطح ٪۵ تفاوت معنی‌دار داشته‌اند).

Figure 2. The effect of heat stress on variations of % fecundity of adult Indian meal moths in treatments: stressed males, stressed females, stressed males and females, and control at different ages (The means shown with different letters at each age were significantly different at the 5% level).

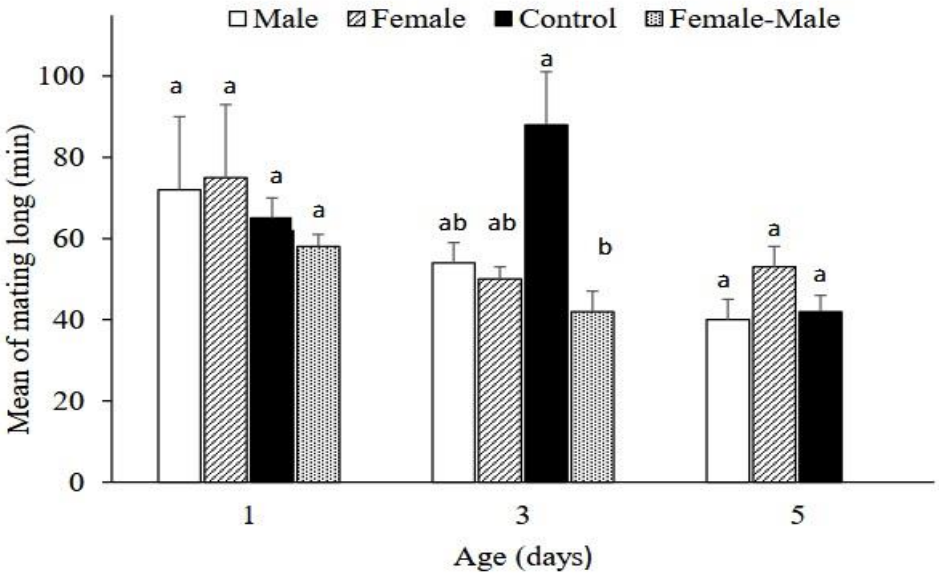
تاثیر تنش گرمایی بر طول عمر

نتایج به‌دست‌آمده بیانگر تأثیر معنی‌دار تنش گرمایی بر طول عمر نرهای سه روزه ($F_{3,46}$=16.21, P<0.01) و پنج روزه ($F_{3,34}$=13.72, P<0.01) و ماده‌های پنج روزه ($F_{3,36}$=13.88, P<0.01) بود. در حشرات سه روزه تحت تیمار، نرهای تیمار شاهد با میانگین عمر ۰/۲۹±۴/۳ روز طولانی‌ترین و نرهای تیمار حشرات نر و ماده با میانگین ۰/۴۱±۱/۹ روز کوتاه عمر ترین نرها را تشکیل داده‌اند (شکل-۵). همچنین در حشرات پنج روزه بیشترین طول عمر نرها مربوط به تیمار نرهای تنش‌دیده با میانگین ۰/۳۴±۴ و کمترین طول عمر در تیمار حشرات نر و ماده با مقدار ۰/۲۷±۱/۲ روز مشاهده شد. به‌علاوه طول عمر ماده ها در حشرات پنج روزه، بیشترین و کمترین مقدار به‌ترتیب در تیمارهای ماده‌های تنش دیده و نر و ماده‌های تنش‌دیده با مقادیر ۰/۳۴±۳/۸ و ۰/۲۷±۱/۱ روز ثبت شد (شکل ۵).



شکل ۳- تغییرات میانگین تاخیر در جفت‌گیری در اثر تنش گرمایی وارد شده بر حشرات کامل شب‌پره هندی در قالب چهار تیمار: نر تنش‌دیده، ماده تنش‌دیده، نر و ماده تنش‌دیده و شاهد در سنین مختلف (میانگین‌هایی که در هر سن با حروف متفاوت نشان داده شده‌اند در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌دار داشته‌اند).

Figure 3. Variations in the average delay in mating due to heat stress on adult Indian meal moths with four treatments: stressed males, stressed females, stressed males and females, and control at different ages. (The averages shown with different letters at each age were significantly different at the 5% level).

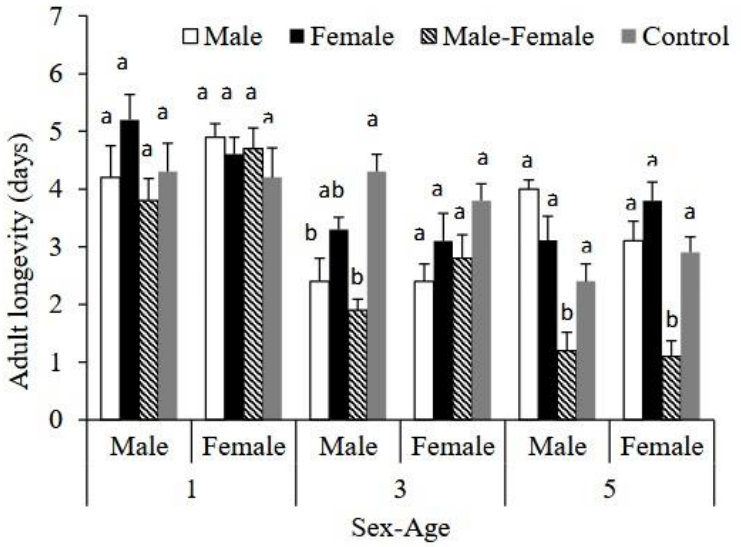


شکل ۴- تغییرات میانگین طول مدت جفت‌گیری شب‌پره هندی در اثر اعمال تنش گرمایی در قالب چهار تیمار: نر تنش‌دیده، ماده تنش‌دیده، نر و ماده تنش‌دیده و شاهد در سنین مختلف (میانگین‌هایی که در هر گروه تیماری با حروف متفاوت نشان داده شده‌اند در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهند)

Figure 4. Variations in the average duration of mating in Indian meal moths due to heat stress in four treatments: stressed male, stressed female, stressed male and female, and control at different ages (means shown in each treatment group with different letters indicate significant differences at the 5% level).

تاثیر تنش بر جلب نرها به فرمون جنسی

تاثیر تنش گرمایی بر پاسخ نرها به فرمون جنسی ماده ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر تفاوت معنی‌دار بین حشرات تحت تنش و تیمار شاهد بود؛ به‌طوری‌که در حشرات یک روزه با میانگین جلب ۳/۳±۵۳/۳۳ ٪ در مقایسه با شاهد با میزان جلب ۳/۳±۶۷/۳ ٪، بیش از ۴۰٪ کاهش جلب را نشان داد (T= -9.19, df=4, p<0.01). در حشرات سه روزه تحت تنش، میزان جلب در تیمار با میانگین ۴/۹±۳۰/۳۳ ٪، بیش از ۵۰٪ کاهش جلب نسبت به شاهد با میزان ۶/۷±۸۶/۷ ٪ را نشان داد (T=-6.8, df=3, p<0.01). در حشرات پنج روزه تنش‌دیده، هیچ گونه جلبی نسبت به شاهد مشاهده نشد، اگرچه میزان جلب در تیمار شاهد نیز با میانگین ۳/۳±۱۶/۶۷ ٪ نسبت به سایر سنین کاهش قابل توجهی را نشان داد (T=-4.82, df=2, p<0.05) (شکل ۶). همچنین مقایسه‌های آماری نشان داد که با افزایش سن حشره، تاثیر معنی‌دار تنش گرمایی بر کاهش میزان جلب نرها به سمت فرمون‌ها افزایش یافت ($F_{2,6}$=136.08, P<0.01). بیشترین میزان جلب در حشرات یک روزه با ۵۳/۳۳ ٪ و عدم جلب در حشرات پنج روزه بود.

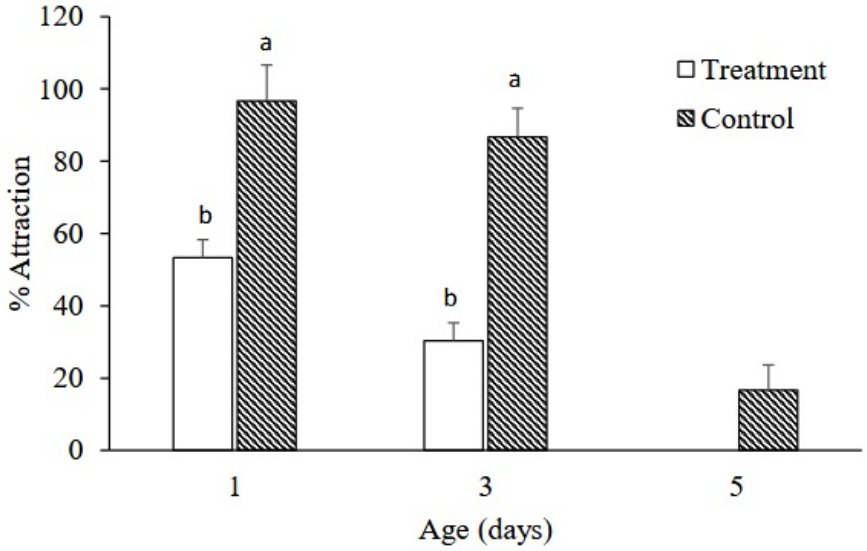


شکل ۵- تغییرات طول عمر حشرات کامل شب‌پره هندی تحت تنش گرمایی در قالب چهار تیمار: نر تنش‌دیده، ماده تنش‌دیده، نر و ماده تنش‌دیده و شاهد در سنین مختلف

Figure 5. Variations in the longevity of adult Indian meal moths under heat stress in four treatments: stressed males, stressed females, stressed males and females, and control at different ages.

بحث

تنش‌های گرمایی زیرکشنده می‌توانند رفتارهایی همچون جفت‌گیری، پرواز، تغذیه و موقعیت‌یابی حشرات را تحت تاثیر قرار دهند (Wang *et al*., 2009; Liao *et al*., 2014; Bodlah *et al*., 2016, 2017; Zhang *et al*., 2016; Sentis *et al*., 2017). تنش حرارتی زیرکشندگی ۴۴ درجه سلسیوس برای مدت ۱۸ دقیقه اعمال‌شده در این تحقیق، نشان از حساسیت بیشتر نرها به تنش حرارتی به‌ویژه در اولین روز پس از خروج دارد. برخی از بررسی‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که افراد ماده نسبت به افراد نر مقاومت بیشتری به تنش دمایی دارند و می‌توانند مدت زمان بیشتری دمای بالا را تحمل کنند. این مقاومت احتمالاً به دلیل غلظت بالای پروتئین‌های شوک حرارتی در تخمدان‌ها و بافت‌های جنینی باشد (Folk *et al*., 2006; Krebs & Thompson, 2006). طبق بررسی‌های انجام‌شده در افراد نر، شوک حرارتی موجب کاهش زادآوری و عقیمی می‌شود. علاوه بر اثرات مستقیم شوک حرارتی بر عملکرد تولیدمثلی افراد نر، ممکن است صفات مطلوب (جنسی) که منجر به انتخاب افراد نر توسط افراد ماده برای جفت‌گیری می‌شود را نیز کاهش دهد (Fasolo & Krebs, 2004; Krebs & Thompson, 2005).



شکل ۶- تغییرات جلب نرهای تحت تنش گرمایی و شاهد شب‌پره هندی به سمت فرمون جنسی ماده در سنین مختلف درون تونل باد

Figure 6. Variations in the attraction of heat-stressed and control males of the Indian meal moth towards the female sex pheromone at different ages inside the wind tunnel

در تحقیق حاضر بیشترین کاهش زادآوری در تیمار نرهای تنش‌دیده مشاهده شد که با حساسیت بیشتر نرها به تنش گرمایی منطبق است (Sales *et al*., 2018; Lossa, 2019; Zwoinska *et al*., 2020; Walsh *et al*., 2021b; Parratt *et al*., 2021; Van Heerwarrden, 2021; Daly *et al*., 2024). بررسی‌ها بیانگر آن است که گرما وتغییرات دما باعث تقسیم‌های سلولی غیرطبیعی درون اسپرم و تخمک و معیوب شدن آنها شده (Zuba et al., 2016) و در نتیجه کاهش میزان بارآوری را به‌همراه داشته است (Musolin 2007; Zizzari & Ellers, 2011).

در این تحقیق تنش حرارتی بر طول عمر حشرات کامل تاثیر معنی‌داری داشت. بررسی‌های انجام‌شده نیز بیانگر آن است که تنش دمایی باعث افزایش طول عمر در افراد نر (Sorensen *et al*., 2007) و افراد ماده (Lithgow *et al*., 1995; Khazaeli *et al*., 1997; Hercus *et al*., 2003; Gomez *et al*., 2009) و گاه در هر دو جنس (Scannapieco *et al*., 2007) شده است.

در این تحقیق، تنش گرمایی باعث تاخیر در جفتگیری و گاه کاهش فراوانی جفتگیری شده است که منطبق بر نتایج به‌دست‌آمده در مورد *Heliothis armigera* (Hubner, 1808) و *Callosobruchus chinensis* (Linnaeus, 1758) بود (Katsuki & Miyatake, 2009; Mironidis & Savopoulou-Soultani, 2010). اگرچه بررسی‌های انجام‌شده روی شب‌پره هندی نشان داد که تأخیر در جفتگیری تاثیری بر موفقیت تولیدمثلی، زادآوری و بارآوری این حشره نداشته است (Huang & Subramanyam, 2003). همچنین تحقیقات موجود نشان از ارتباط مستقیم بین مدت زمان جفت‌گیری با زادآوری حشره ماده دارد (Siegel & Hall, 1979) که متناسب با تعداد اسپرماتوفوری دریافت شده است.

یکی از نتایج قابل توجه این تحقیق، کاهش معنی‌دار میزان جلب نرهای تنش‌دیده به فرمون جنسی ماده‌ها از طریق پرواز به سمت منبع تولید فرمون بود. کاهش میزان جلب نرهای تنش دیده می‌تواند به سه دلیل مهم اتفاق افتد، یکی تاثیر تنش‌های گرمایی بر بافت‌های ماهیچه‌ای و اختلال در پرواز و حرکت حشرات کامل و دیگری عدم پاسخ گیرنده‌های شاخکی به ترکیبات فرمونی و یا تغییر کیفی فرمون تولیدی توسط ماده‌ها و یا اثرات هم‌زمان این عوامل باشد. بررسی رفتار پروازی نرهای تنش‌دیده حاکی از انجام پرواز طبیعی درون تونل باد بود و به‌عبارت دیگر احتمال آسیب دیدن ماهیچه‌های پروازی منتفی است. بنابراین، احتمال تغییر کیفی

فرمون و یا عدم پاسخ شاخکی به فرمون جنسی محتمل‌تر است. طبق بررسی‌های انجام‌شده روی مگس سرکه، تنش حرارتی با ایجاد آسیب‌های ساختاری، رفتار معاشقه‌گری در افراد نر را تحت تأثیر قرار داده و کاهش توانایی پرواز و زادآوری را به همراه داشته است (Rohmer *et al*., 2004; Krebs & Thompson, 2005). همچنین در زنبور مقدس *Bombus terrestris* (Hym.: Apidae) تنش گرمایی روی نرها باعث کاهش میزان جلب ماده‌ها به سمت آنها شده است (Przybyla *et al*., 2021) که این امر به‌دلیل تغییر کیفی فرمون تولیدی توسط نرهای تنش‌دیده است (Martinet *et al*., 2021). نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق بیانگر آن است که اعمال تنش حرارتی زیرکشنده بر حشرات کامل شب‌پره هندی می‌تواند علاوه بر ایجاد اختلال در فعالیت‌های تولید مثلی، کاهش نتاج را به‌همراه داشته باشد. با عنایت به آنکه حشرات کامل شب پره هندی در زمان ظهور به بخش های بالایی انبار جلب می شوند، اعمال تیمار های گرمایی با دمای ۴۴ درجه سانتی گراد به مدت حداقل ۱۸ دقیقه می‌تواند توان تولید مثلی این آفت را کاهش دهد. ضمن آنکه دامنه تحمل محصولات انباری متفاوت است و قطعا تنش در دماهای بالاتر و مدت زمان بیشتر، در صورت تاب آوری محصول، می‌تواند تلفات حشرات کامل را نیز به همراه داشته باشد. ارزیابی تاثیر تنش‌های گرمایی در مرحله لاروی با توجه به تاب آوری محصولات انباری، نیز می تواند نتایج موثرتر و کاربردی تری را به‌همراه داشته باشد.

References

Bodlah, M. A, Zhu, A. X., & Liu, X. D. (2016). Host choice, settling and folding leaf behaviors of the larval rice leaf folder under heat stress. *Bulletin of Entomological Research, 106,* 809–817. **DOI: https://doi.org/10.1017/S0007485316000584**

Bodlah, M. A., Gu, L. L., Tan, Y., & Liu, X. D. (2017). Behavioural adaptation of the rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* to short-term heat stress. *Journal of Insect Physiology, 100,* 28–34. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2017.05.004**

Bubliy, O. A., & Loeschcke, V. (2005). Correlated responses to selection for stress resistance and longevity in a laboratory population of *Drosophila melanogaster*. *European Society for Evolutionary Biology, 18,* 789-80. **DOI: https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2005.00928.x**

Chippindale, A. K., Gibbs, A. G., Sheik, M., Yee, K. J., Djawdan, M., Bradley, T. J., Michael R., & Rose, M. R. (1998). Resource acquisition and the evolution of stress resistance in *Drosophila melanogaster*. *Evolution, 52*(5), 1342-1352. **DOI: https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1998.tb02016.x**

Cook, P. A. (1999). Sperm numbers and female fertility in the moth *Plodia interpunctella* (Hubner) (Lepidoptera; Pyralidae). *Journal of Insect Behavior, 12*(6), 767-779. **DOI: https:// doi.org/10.1023/ A:1020952909933**

Dahlhoff, E. P., Fearnley, S. L., Bruce, D. A., Gibbs, A. G., Stoneking, R., McMillan, D. M., Deiner, K., Smiley, J. T., & Rank, N. E. (2008). Effects of temperature on physiology and reproductive success of a montane leaf beetle: implications for persistence of native populations enduring climate change. *Physiological Biochemistry and Zoology, 81,* 718–732. **DOI: https://doi.org/10.1086/590165**

Daly, E. Z., Defourneaux, M., Legrand, C., & Renault, D. (2024). The consequences of heat waves for the reproductive success and physiology of the wingless sub-Antarctic fly *Anatalanta aptera*. *Journal of Thermal Biology, 123,* 103910. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2024.103910**

Defilippo, F., Grisendi, A., Savoldelli, S., Torri, D., Dottori, M., & Bonilauri, P. (2019). Effect of temperature and diet on *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) development with special reference to Isomegalen diagram and accumulated degree days. *Journal of Entomological and Acarological Research, 51,* 69-73. **DOI: https://doi.org/10.4081/jear.2019.7855**

Dell, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecological Evolutionary System, 37,* 637–669. **DOI:10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100**

Fasolo, A. G., & Krebs, R. A. (2004). A comparison of behavioural change in *Drosophila* during exposure to thermal stress. *Biological Journal of the Linnean Society, 83,* 197-205. **DOI:https:// doi.org/10.1111/ j.1095-8312.2004.00380.x**

Gallego, B., Verdú, J. R., Carrascal, L. M., & Lobo, J. M. (2016). A protocol for analysing thermal stress in insects using infrared thermography. *Journal of Thermal Biology*, *56*, 113–121. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2015.12.006**

Gilchrist, G. W., Huye, R. B., and Parteridge, R. (1997). Thermal sensitivity of *Drosophila melanogaster*: Evolutionary responses of adults and eggs to laboratory natural selection at different temperatures. *Physiological Zoology*, *70*(4), 403 – 414. **DOI: https://doi.org/10.1086/515853**

Gomez, F. H., Bertoli, C. I., Sambucetti, P., Scannapieco, A. C., & Norry, F. M. (2009). Heat-induced hormesis in longevity as correlated response to thermal-stress selection in *Drosophila buzzatii*. *Journal of Thermal Biology*, *34*, 17-22. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2008.09.003**

Hagstrum, D. W., Klejdysz, T., Subramanyam, B., & Nawrot, J. (2013). Atlas of stored-product insects and mites; American Association of Cereal Chemists International: St. Paul, MN, USA.

Hallman, G. J., Wang, S., & Tang, J. (2005). Reaction orders for thermal mortality of third instars of Mexican fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology, 98,* 1905–1910. **DOI: https://doi.org/10.1603/0022-0493-98.6.1905**

Harshman, L. G., Hoffmann, A. A., & Clark, A. G. (1999). Selection for starvation resistance in *Drosophila melanogaster*: physiological correlates, enzyme activities and multiple stress responses. *Journal of Evolution Biology, 12,* 370-379. **DOI: https://doi.org/10.1046/j.1420 9101.1999.00024.x**

van der Have, T. M. (2002). A proximate model for thermal tolerance in ectotherms. *Oikos, 98,* 141–155. **DOI: https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.980115.x**

van Heerwaarden, B., & Sgrò, C. M. (2021). Male fertility thermal limits predict vulnerability to climate warming. *Nature Communications*, *12*, 1–11. **DOI: https:// doi. org/10.1038/s4146 7-021-22546-w**

Hoffmann, A. A., & Parsons, P. A. (1989). Selection for increased desiccation resistance in *Drosophilu melanoguster*: Additive genetic control and correlated responses for other stresses. *Genetics*, *122*, 837-845.

Hoffmann, A. A., & Parsons, P. A. (1993). Direct and correlated responses to selection for desiccation resistance: A comparison of *Drosophila melanogaster* and *D. simulans. Journal of Evolution Biology*, *6*, 643-657. **DOI: https://doi.org/10.1242/jeb.076166**

Huang, F. & Subramanyam, B., (2003). Effects of delayed mating on reproductive performance of *Plodia interpunctella* (Hubner) (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Stored Products Research, 39,* 53–63.

Iossa, G. (2019). Sex-specific differences in thermal fertility limits. *Trends in Ecology & Evolution*, *34*, 490–492. **DOI: https://doi.org/10.1016/j. tree.2019.02.016**

Iossa, G., Maury, C., Fletcher, R. M., & Eady, P. E. (2019). Temperature-induced developmental plasticity in *Plodia interpunctella*: Reproductive behaviour and sperm length. *Journal of Evolutionary Biology*, *32*, 675–682. **DOI: https://doi.org/10.1111/jeb.13447**

Jones, O.T., Lomer, R.A. & Howse, P.E. (1981). Responses of male Mediterranean fruit flies, *Ceratitis capitata* to trimedlure in a wind tunnel of novel design. *Physiological Entomology*, *6*, 175-181. **DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.1981.tb00639.x**

Katsuki, M. & Miyatake, T. (2009) Effects of temperature on mating duration, sperm transfer and remating frequency in *Callosobruchus chinensis*. *Journal of Insect Physiology, 55,* 113–116. **DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.jinsphys.2008.10.012**

Krebs, R. A. & Thompson, K. A. (2006). Direct and correlated effects of selection on flight after exposure to thermal stress in *Drosophila melanogaster*. *Genetica*, *128*, 217-225. **DOI: https://doi.org/10.1007/s10709-005-5704-x**

Kontopoulos, D. G., Carreras, B. G., Sal, S., Smith, T. P., & Pawar, S. (2018). Use and misuse of temperature normalisation in meta-analyses of thermal responses of biological traits. *Peer Journal*, *6*, e4363; **DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.4363**

Liao, H. J., Qian, Q., & Liu, X. D. (2014). Heat shock suppresses mating and sperm transfer in the rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*. *Bulletin of Entomological Research, 104,* 383–392. **DOI: https://doi.org/10.1017/S0007485314000212**

Mahroof, R., Subramanyam, B., & Flinn, P. (2005). Reproductive performance of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) exposed to the minimum heat treatment temperature as pupae and adults. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, *98*, 626-633. **DOI: https://doi.org/10.1603/0022-0493-98.2.626**

McAfee, A., Chapman, A., Higo, H., Underwood, R., Milone, J., & Foster, L. J. (2020). Vulnerability of honey bee queens to heat-induced loss of fertility. *Nature Sustainability, 3,* 367–376. **DOI: https://doi.org/10.1038/ s 41893-020-0493-x**

Martinet, B., Zambra, E., Przybyla, K., Lecocq, T., Anselmo, A., & Nonclercq, D. (2021). Mating under climate change: Impact of simulated heatwaves on the reproduction of model pollinators. *Functional Ecology*, *35,* 739–752. **DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2435.13738**

Mironidis, G. K., & Savopoulou-Soultani, M. (2010) Effects of heat shock on survival and reproduction of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) adults. *Journal of Thermal Biology*, *35,* 59–69. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2009.11.001**

Musolin, D. L. (2007). Insects in a warmer world: ecological, physiological and life-history responses of true bugs (Heteroptera) to climate change. *Global Change Biology, 13,* 1565-1585. **DOI:10.1111/j.1365-2486.2007.01395.x**

Neven, L. G. (2000). Physiological responses of insects to heat. *Postharvest Biology and Technology, 21,* 103-111. **DOI: https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00169-1**

Parratt, S. R., Walsh, B. S., Metelmann, S., White, N., Manser, A.,Bretman, A. J., Hoffmann, A. A., Snook, R. R., & Price, T. A. (2021). Temperatures that sterilize males better match global species distributions than lethal temperatures. *Nature Climate Change*, *11*, 481–484. **DOI: https://doi.org/10.1038/s4155 8-021-01047-0**

Przybyla K., Michez D., Zambra E., Anselmo A., Hennebert E., Rasmont P., & Martinet B. (2021). Effects of heat stress on mating behavior and colony development in *Bombus terrestris* (Hymenoptera: Apidae). *Frontiers in Ecology and Evolution, 9,* 748405. **DOI: https://doi.org/ 10.3389/fevo.2021.748405**

Rohmer, C., David, J. R., Moreteau, B., & Joly, D. (2004). Heat induced male sterility in *Drosophila melanogaster*: adaptive genetic variations among geographic populations and role of the Y chromosome. *The Journal of Experimental Biology, 207,* 2735-2743. **DOI: https://doi.org/10.1242/jeb.01087**

Sales, K., Vasudeva, R., Dickinson, M. E., Godwin, J. L., Lumley, A. J., & Michalczyk, Ł. (2018). Experimental heatwaves compromise sperm function and cause transgenerational damage in a model insect. *Nature Communications, 9,* 4771. **DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-018-07273-z**

Sales, K., Vasudeva, R., & Gage, M. J. G. (2021). Fertility and mortality impacts of thermal stress from experimental heat waves on different life stages and their recovery in a model insect. *Royal Society Open Science*, *8*(3) 201717. **DOI: https://doi.org/10.1098/rsos.201717rsos**

Scannapieco, A. C., Sørensen, J. G., Loeschcke, V., & Norry, F. M. (2007). Heat-induced hormesis in longevity of two sibling *Drosophila* species. *Biogerontology, 8,* 315-325. **DOI: https://doi.org/10.1007/s10522-006-9075-1**

Schou, M. F., Kristensen, T. N., Kellermann, V., Schlötterer, C., & Loeschcke, V. A. (2014). *Drosophila* laboratory evolution experiment points to low evolutionary potential under increased temperatures likely to be experienced in the future. *Journal of Evolutionary Biology*, *27,* 1859–1868. **DOI: https://doi.org/10.1111/jeb.12436**

Sentis A., Hemptinne J. L., & Brodeur J. (2017). Non-additive effects of simulated heat waves and predators on prey phenotype and transgenerational phenotypic plasticity. *Global Change Biology, 23,* 4598–4608. **DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.13674**

Siegel, R. W. & Hall, J. C. (1979). Conditioned responses in courtship behavior of normal and mutant *Drosophila. Proceeding of the National academy of the United States of America*, *76*, 3430-3434. **DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.76.7.3430**

Sorensen, J. G., Kristensen, T. N., Kristensen, K. V., & Loeschcke, V. (2007). Gender specific effects of heat induced hormesis in Hsf-deficient *Drosophila Melanogaster*. *Experimental Gerontology, 42*(12), 1-27. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.exger.2007.09.001**

Walsh, B. S., Parratt, S. R., Hoffmann, A. A., Atkinson, D., Snook, R. R., Bretman, A., & Price, T. A. R. (2019). The impact of climate change on fertility. *Trends in Ecology & Evolution, 34,* 249–259. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.12.002**

Wang, X. G., Johnson, M. W., Daane, K. M., & Opp, S. (2009) Combined effects of heat stress and food supply on flight performance of olive fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Annals of the Entomological Society of America, 102,* 727–734. **DOI: https://doi.org/10.1603/008.102.0418**

Walsh, B. S., Parratt, S. R., Mannion, N. L. M., Snook, R. R., Bretman, A., & Price, T. A. R. (2021a). Plastic responses of survival and fertility following heat stress in pupal and adult *Drosophila virilis*. *Ecology and Evolution*, *11*(24), 18238–18247. **DOI: https://doi.org/10.1002/ ece3.8418**

Walsh, B. S., Mannion, N. L., Price, T. A., & Parratt, S. R. (2021b). Sex-specific sterility caused by extreme temperatures is likely to create cryptic changes to the operational sex ratio in *Drosophila virilis*. *Current Zoology*, *67*(3), 341–343. **DOI: https://doi.org/10.1093/cz/zoaa067**

Zhang, G. H., Li, Y. Y., Zhang, K. J., Wang, J. J., Liu, Y. Q., & Liu, H. (2016). Effects of heat stress on copulation, fecundity and longevity of newly-emerged adults of the predatory mite, *Neoseiulus barkeri* (Acari: Phytoseiidae). *Systematic and Applied Acarology*, *21*, 295–306. **DOI: https://doi.org/10.11158/saa.21.3.5**

Zhu, G., Xue, M., Luo, Y., Ji, G., Liu, F., Zhao, H., & Sun, X. (2017). Effects of short-term heat shock and physiological responses to heat stress in two *Bradysia* adults, *Bradysia odoriphaga* and *Bradysia difformis. Scientific Reports*, *7*, 1-11. **DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-017-13560-4**

Zizzari, Z. V., & Ellers, J. (2011). Effects of exposure to short term heat stress on male reproductive fitness in a soil arthropod. *Journal of Insect Physiology*, *57*, 421–426. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2011.01.002**

Zouba, J., A., Chermiti, M., Msetra, B., & Bouabidi, H. (2013). Hot Air Treatment for Postharvest Control of the date moth *Ectomyelois ceratoniae*. *Tunisian Journal of Plant Protection, 8,* 23-32.

Zwoinska, M. K., Rodrigues, L. R., Slate, J., & Snook, R. R. (2020). Phenotypic responses to and genetic architecture of sterility following exposure to sub-lethal temperature during development. *Frontiers in Genetics*, *11*, 573. **DOI: https://doi.org/10.3389/fgene.2020.0057**

Plant Pest Research

Research paper 2026- 15 (4): 59-73	https://doi.org/10.22124/iprj.2026.31811.1660	pISSN:2322-2409 eISSN: 2538-6123

OPEN ACCESS

Sublethal effect of thermal stress on reproduction parameters and sexual attraction of *Plodia interpunctella*

N. Lajvardi[1], M. Movahedy Fazel[2*] and A. Marouf[3]

1 & 2. Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran, 3. Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran

✉ nedalajevardio@gmail.com
✉ movahedi@znu.ac.ir
✉ aref.marouf@gmail.com

https://orcid.org/0009-0001-8053-2167
https://orcid.org/0000-0001-6361-2766
https://orcid.org/0000-0003-2280-5654

Received: 1 October 2025 | *Accepted:* 15 March 2026 |

Abstract

The present study was designed to evaluate the impact of minimal thermal stress on some reproductive activities of the Indian meal moth, *Plodia interpunctella* (Hübner, 1813). Adults at ages of one, three, and five days were exposed to a temperature of 44°C for 18 minutes. The results indicated a significant effect of thermal stress on male insects. The highest and lowest fertility were observed in three-day-old insects in the control and heat-stressed males (144.4 and 16 eggs respectively), representing approximately a 90% reduction in egg production. Additionally, the fecundity rate in the control treatment was 88±2%, while the lowest value in the heat-stressed male treatment was 42±12%. Heat treatments had no effect on mating frequency but influenced the duration of mating in 3-day-old insects. Furthermore, heat stress resulted in a 40-50% reduction in attraction to pheromone traps in wind tunnel. For instance, in the control and one-day-old heat-stressed male treatments, attraction rates were reported as 96.67 ± 3.3% and 53.33 ± 3.3%, respectively. According to the obtained results, the simultaneous 90% reduction in fertility and 58% reduction in egg hatching in the heat-stressed male treatment compared to the control led to a 96% decrease in net progeny. The results indicated that applying sublethal heat stress to adult Indian meal moths can disrupt reproductive activities and meanwhile reduce the number of offspring produced.

Key words: Fecundity, fertility, longevity, mating frequency

Citation: Lajvardi, N., Movahedy Fazel M. & Marouf, A. (2026). Sublethal effect of thermal stress on reproduction parameters and sexual attraction of *Plodia interpunctella*. *Plant Pest Research*, *15*(4), 59-73. **DOI: https://doi.org/10.22124/iprj.2026.31811.1660**

*Corresponding author: movahedi@znu.ac.ir

Journal of Plant Pest Research is published by University of Guilan
This journal is an open access journal licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International license (CC BY 4.0)