دوفصلنامه علمی ترویجی علوم و فنون زنبورعسل
دوره ۱۶، شماره ۳۱، سال ۱۴۰۴، (۱۹-۲۶)

استراتژی‌های نوین مدیریت کلنی در شرایط استرس گرمایی: از یافته‌های آزمایشگاهی تا اجرا در زنبورستان

شبنم پری‌چهره[۱]، لیلا قره داغی[۲*]

۱-استادیار بخش تحقیقات زنبورعسل، موسسه تحقیقات علوم دامی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲-استادیار بخش تحقیقات علوم دامی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۳ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۵/۱۹
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/HBSJ.2025.369250.1192
رایانامه: gharehdaghi.leila103@gmail.com

چکیده:

تغییرات اقلیمی و استرس گرمایی ناشی از آن، سلامت زنبورهای عسل (*Apis mellifera*) را با اختلالات فیزیولوژیک و مولکولی جدی مواجه کرده است، ازجمله کاهش طول عمر زنبورهای کارگر تا ۱۸ روز، ناهنجاری‌های رشدی در ۶۰٪ لاروها، افزایش بیان پروتئین‌های شوک گرمایی (HSP70/HSP90)، و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) که سیستم ایمنی را تضعیف و خطر فروپاشی کلنی (CCD) را افزایش می‌دهد. برای مقابله با این چالش‌ها، راهکارهایی مانند استفاده از کندوهای عایق بندی‌شده (کاهش دمای داخلی تا ۷°C)، طراحی سیستم‌های تهویه طبیعی، تأمین مکمل‌های تغذیه‌ای (الکترولیت‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و پروبیوتیک‌ها)، و به کارگیری فناوری‌های نوین نظیر سیستم‌های پایش هوشمند (IoT) و خنک‌کننده‌های خورشیدی پیشنهاد شده است. مدیریت چراگاه‌ها با کاشت گیاهان مقاوم به خشکی و تأمین منابع آبی خنک نیز نقش کلیدی در تعدیل دمای محیط ایفا می‌کند. با این حال، چالش‌های اجرایی مانند

هزینه‌های بالای فناوری، نیاز به تخصص فنی، و ناسازگاری با شرایط محلی (به‌ویژه در مناطق کم برخوردار) مانع گسترش این راهکارها می‌شوند. ادغام دانش سنتی زنبورداری با پژوهش‌های بین رشته‌ای (زیست شناسی مولکولی، هوش مصنوعی) و حمایت دولتی برای توسعه روش‌های مقرون به صرفه (مانند سیستم‌های خنک کننده خورشیدی) ضروری است. در نهایت، حفظ جمعیت زنبورهای عسل نه تنها برای تولید عسل، بلکه برای بقای اکوسیستم‌ها و امنیت غذایی جهانی حیاتی محسوب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: استرس گرمایی، زنبورعسل (*Apis mellifera*)، تغییرات اقلیمی، مدیریت زنبورستان، فناوری‌های نوین (IOT)

مقدمه:

تغییرات اقلیمی و افزایش جهانی دما به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر، تأثیرات عمیقی بر اکوسیستم‌ها به ویژه بر صنعت زنبورداری گذاشته است. مطالعات نشان می‌دهد که استرس گرمایی نه‌تنها بر فیزیولوژی فردی زنبورهای عسل (*Apis mellifera*) تأثیر می‌گذارد، بلکه می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد کلنی، کاهش تولید مثل، تضعیف سیستم ایمنی و در نهایت کاهش بهره‌وری زنبورستان‌ها شود. در شرایط طبیعی، زنبورهای عسل از مکانیسم‌های رفتاری و فیزیولوژیکی پیچیده‌ای برای تنظیم دمای کندو استفاده می‌کنند، اما زمانی که دمای محیط از آستانه تحمل فراتر رود، این سازوکارها ممکن است ناکافی باشند (Kamboj *et al*. 2024). تحقیقات آزمایشگاهی اخیر نشان داده‌اند که استرس گرمایی باعث القای پاسخ‌های استرسی در سطح مولکولی می‌شود، از جمله افزایش بیان پروتئین‌های شوک گرمایی (HSPs) مانند HSP70 و HSP90، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و اختلال در عملکرد میتوکندری (Abou-Shaara. 2024). این تغییرات متابولیک می‌توانند منجر به کاهش طول عمر زنبورهای کارگر، اختلال در پرورش نوزادان و کاهش کارایی گرده‌افشانی شوند (Moffatt. 2001). علاوه بر این، مطالعات میدانی نشان داده‌اند که امواج گرمایی شدید می‌توانند باعث افزایش میزان تلفات کلنی‌ها در فصل تابستان شوند (Tlak Gajger and Mutinelli. 2024). در پاسخ به این چالش‌ها، پژوهشگران و زنبورداران به دنبال توسعه استراتژی‌های مدیریتی نوین برای کاهش استرس گرمایی بوده‌اند. این راهکارها شامل: مدیریت سازه‌ای کندو (استفاده از مصالح عایق، طراحی سیستم‌های تهویه طبیعی و مصنوعی، و بهینه‌سازی جهت‌گیری کندوها)، مدیریت تغذیه‌ای (استفاده از مکمل‌های الکترولیتی، آنتی‌اکسیدان‌ها و اسیدهای آمینه ضروری) و مدیریت ژنتیکی (انتخاب نژادهای مقاوم به گرما) هستند (Kamboj et al. 2024). همچنین، برخی مطالعات به بررسی تأثیر مدیریت چراگاه‌ها و منابع آبی در کاهش استرس گرمایی پرداخته‌اند (Nearman and vanEngelsdorp. 2022). با توجه به پیچیدگی تأثیرات استرس گرمایی بر زنبورهای عسل، یک رویکرد یک‌جانبه نمی‌تواند راه‌حل کاملی ارائه دهد. بنابراین، ادغام یافته‌های آزمایشگاهی با روش‌های کاربردی در زنبورستان‌ها برای توسعه راهبردهای مدیریتی مؤثر ضروری است. مطالب حاضر با استناد به جدیدترین پژوهش‌های علمی، به بررسی جامع تأثیرات استرس گرمایی بر زنبورهای عسل و ارائه راهکارهای عملی برای کاهش این اثرات می‌پردازد.

تأثیرات استرس گرمایی بر زنبورهای عسل و پیامدهای آن

زنبورهای عسل در دمای بالاتر از ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتیگراد دچار استرس گرمایی می‌شوند، که تأثیرات منفی بر رشد، سیستم ایمنی، رفتار تغذیه‌ای و تولیدمثل آن‌ها دارد (Zhao *et al*. 2021). این استرس ناشی از اختلال در تنظیم دمای بدن و حفظ شرایط مطلوب کندو بوده و حساسیت آن در گونه‌های مختلف متفاوت می‌باشد (Southwick *et al*. 1987). افزایش دما باعث کم آبی، فشار متابولیک و تضعیف ایمنی شده و رفتار جستجوی غذا را تغییر می‌دهد، به طوری که زنبورها زمان بیشتری را صرف جمع‌آوری آب کرده یا از پرواز اجتناب می‌ورزند (Bordier *et al*. 2017). دمای بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نیز می‌تواند منجر به مرگ لاروها یا ترک کندو شود. استرس گرمایی سیستم ایمنی را تضعیف کرده و زنبورها را مستعد بیماری‌ها می‌کند، که این امر ممکن است در فروپاشی کلنی (CCD) نقش داشته باشد (Morfin *et al*. 2021). علاوه بر این، استرس گرمایی منجر به کاهش تولید عسل می‌شود، چراکه زنبورها مجبورند بخش قابل توجهی از انرژی خود را صرف تنظیم دمای داخلی کندو و خنک‌سازی آن نمایند (Van-derplanck *et al*. 2019). اگرچه گیاهان شهدزا مانند اقاقیا تا حدی می‌توانند اثرات منفی گرمایش را تعدیل کنند (Zhao *et al*. 2021)، اما استرس گرمایی همچنان بهره‌وری کلنی‌ها و اقتصاد زنبورداری را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. این

مسئله لزوم مدیریت هوشمندانه‌ی دمای کندو را برای حفظ سلامت زنبورهای عسل و عملکرد حیاتی آن‌ها در اکوسیستم برجسته می‌سازد.

مبانی فیزیولوژیک استرس گرمایی در زنبور عسل

زنبورهای عسل در مواجهه با استرس گرمایی مکانیسم‌های رفتاری و فیزیولوژیکی پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند. از مهمترین پاسخ‌های رفتاری می‌توان به پرواز تهویه‌ای و تبخیر آب اشاره کرد. مطالعات نشان می‌دهند هنگامی که دمای کندو به بالای ۳۵ درجه سانتیگراد می‌رسد، زنبورهای کارگر با بال‌زنی سریع (۲۰۰-۲۵۰ بار در دقیقه) جریان هوا ایجاد می‌کنند که می‌تواند دمای مرکز کندو را تا ۴ درجه سانتیگراد کاهش دهد. با این حال، این فعالیت متابولیکی بالا موجب افزایش ۶۰ درصدی مصرف انرژی کلنی می‌شود (Stabentheiner *et al.* 2010). در سطح مولکولی، استرس گرمایی باعث القای بیان پروتئین‌های شوک گرمایی می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که سطح HSP70 در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد تا ۸ برابر افزایش می‌یابد و این افزایش با میزان بقای زنبورها ارتباط مستقیم دارد (Abou-Shaara, 2024). همزمان، استرس اکسیداتیو ناشی از گرما موجب افزایش تولید مالون‌دی‌آلدئید (MDA) به عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدها می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که سطح MDA در دمای ۴۲ درجه سانتیگراد تا ۲،۵ برابر افزایش می‌یابد (Zhang *et al.* 2014). استرس گرمایی تأثیرات مخربی بر چرخه زندگی زنبور عسل دارد. لاروها به ویژه در برابر افزایش دما آسیب‌پذیر هستند، به طوری که دمای بالای ۳۶ درجه سانتی‌گراد می‌تواند موجب ناهنجاری‌های رشدی در ۶۰ درصد لاروها شود (Tlak Gajger and Mutinelli. 2024). این تأثیرات در نهایت منجر به کاهش ۲۵ درصدی وزن بدن زنبورهای بالغ می‌شود. همچنین، طول عمر زنبورهای کارگر در شرایط استرس گرمایی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که زنبورهای پرورش یافته در دمای ۳۸ درجه سانتیگراد به طور متوسط تنها ۱۸ روز عمر می‌کنند، در حالی که این مقدار در شرایط نرمال (۳۲ درجه) ۳۵ روز است (Le Conte and Navajas. 2008). در پاسخ به استرس گرمایی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در بدن زنبورها نیز تغییر می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز (CAT) به ترتیب ۴۵ و ۳۰ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز (GPx) حدود ۱۵ درصد کاهش نشان می‌دهد. این تغییرات بیانگر تلاش سیستم دفاعی زنبورها برای مقابله با استرس اکسیداتیو ناشی از گرماست (Vilic *et al.* 2024).

استراتژی‌های مدیریتی برای کاهش استرس گرمایی در زنبورستان‌ها

برای مقابله با استرس گرمایی در زنبورهای عسل، راهکارهای متعددی وجود دارد. استفاده از کندوهای پلی‌استایرن نسبت به کندوهای چوبی دمای 4°C تا 5°C خنک‌تر می‌مانند و کاهش ۴۰٪ تلفات کلنی را نشان داده‌اند (Bykov and Zaitsev. 2021). ایجاد سوراخ‌های تهویه ۱-۲ سانتی‌متری در بدنه و سقف کندو همراه با سایه‌اندازی مناسب (استفاده از پوشش‌های گیاهی مانند درختان توت یا پارچه‌های سایه‌انداز با عبور ۵۰-۷۰٪ نور) به تنظیم دمای کندو کمک می‌کند. جهت‌گیری کندوها به سمت شمال-جنوب و فاصله‌گذاری ۱،۵ متری بین آن‌ها نیز در کاهش استرس گرمایی مؤثر است. در بخش تغذیه، تأمین آب و الکترولیت‌ها (مانند سدیم و پتاسیم) برای جلوگیری از دهیدراتاسیون ضروری است (Seeley. 2019). استفاده از شربت قندی ۱:۱ و مکمل‌های پروتئینی مانند جایگزین‌های گرده (مخلوط مخمر آبجو و شیر خشک، گلوتن ذرت) کیفیت لاروها را در دمای بالا حفظ می‌کند. پروبیوتیک‌ها (مانند لاکتوباسیلوس) و ویتامین‌های گروه B مقاومت زنبورها را افزایش می‌دهند (Eduardo *et al.* 2023). همچنین آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند ویتامین C و E با کاهش رادیکال‌های آزاد، طول عمر زنبورها را بهبود می‌بخشند. تغذیه در ساعات خنک روز (صبح زود یا غروب) نیز توصیه می‌شود. مدیریت کلنی شامل حفظ تراکم جمعیت متعادل (حداکثر ۸۰٪ ظرفیت) و انتخاب نژادهای مقاوم است. پایش رفتار زنبورها (تجمع در جلوی کندو و بال‌زنی سریع) و مصرف آب (بیش از ۱ لیتر در روز) از شاخص‌های مهم استرس گرمایی محسوب می‌شوند. استفاده از دماسنج‌های دیجیتال داخل کندو نیز برای پایش مداوم دما توصیه می‌شود.

بررسی تأثیر مدیریت چراگاه‌ها و منابع آبی در کاهش استرس گرمایی در زنبورستان‌ها

استرس گرمایی یکی از چالش‌های جدی برای سلامت کلنی‌های زنبور عسل محسوب می‌شود که تأثیرات منفی بر تولیدمثل، بقا و عملکرد کلنی دارد. مدیریت چراگاه‌ها و

منابع آبی به‌عنوان راهکاری مؤثر برای تعدیل دمای محیط زنبورستان و کاهش تنش‌های حرارتی شناخته شده است. پوشش گیاهی متراکم و درختان در اطراف زنبورستان‌ها با ایجاد سایه، دمای محیط را ۵-۷ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهند. کاشت گیاهان مقاوم به خشکی مانند آویشن، اسطوخودوس و گون نه‌تنها منابع آبی را حفظ می‌کند، بلکه محیط خنک‌تری فراهم می‌آورد (Klein *et al*. 2007). همچنین پوشش گیاهی مناسب با جلوگیری از تبخیر سریع رطوبت خاک، رطوبت نسبی محیط را افزایش می‌دهد که برای خنک‌کردن کندوها حیاتی است. تأمین منابع آبی نیز نقش کلیدی در کاهش استرس گرمایی دارد. دسترسی دائمی به آب شیرین برای زنبورها ضروری است، چراکه آن‌ها از آب برای تنظیم دمای کندو از طریق تبخیر آب روی شان‌ها استفاده می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهد کلنی‌هایی با دسترسی دائمی به آب، نرخ بقای بالاتری در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد دارند (Kovac *et al*. 2018). استفاده از آبشخورهای سایه‌دار یا مجهز به سیستم خنک‌کننده غیرمستقیم مانند ظروف سفالی، دمای آب را پایین نگه می‌دارد و مصرف انرژی زنبورها را کاهش می‌دهد. احیای منابع آبی طبیعی مانند برکه‌ها یا نهرهای کوچک در مجاورت زنبورستان‌ها نیز رطوبت محیط را افزایش داده و استرس گرمایی را کاهش می‌دهد. ترکیب مدیریت چراگاه و منابع آبی در قالب طراحی زنبورستان‌های اکولوژیک نتایج مطلوبی داشته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند زنبورستان‌هایی که با ترکیب پوشش گیاهی متنوع و منابع آبی طراحی شده‌اند، تا ۳۰ درصد کاهش تلفات ناشی از گرمازدگی را تجربه کرده‌اند (Brett and Isaacs. 2015). بااین‌حال، اجرای این راهکارها با چالش‌هایی مانند تغییرات اقلیمی و خشکسالی، هزینه‌های اولیه و نیاز به آگاهی زنبورداران مواجه است. مدیریت چراگاه‌ها و منابع آبی نه‌تنها استرس گرمایی را کاهش می‌دهد، بلکه تنوع زیستی و پایداری اکوسیستم‌های محلی را نیز بهبود می‌بخشد. موفقیت این راهکارها به عوامل مختلفی وابسته است و انجام پژوهش‌های بیشتر برای توسعه فناوری‌های کم‌هزینه و بومی‌سازی روش‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد

بخش فناوری‌های نوین در مدیریت استرس گرمایی زنبورستان‌ها

فناوری‌های نوین نقش مؤثری در کاهش استرس گرمایی زنبورهای عسل ایفا می‌کنند. سیستم‌های پایش هوشمند (IoT) با استفاده از سنسورهای دقیق دما (°C 0.5±)، رطوبت و فعالیت زنبورها، امکان نظارت لحظه‌ای بر شرایط کندو را فراهم کرده و تا ۴۵٪ از تلفات ناشی از استرس گرمایی می‌کاهند (Yiyao *et al*. 2024). این سیستم‌ها مجهز به الگوریتم‌های یادگیری ماشین هستند که هنگام عبور دما از آستانه 38° C هشدار خودکار صادر می‌کنند. در بخش مواد عایق، پلی‌استایرن اکسترود شده (XPS) توانسته دمای داخلی کندو را تا ۷° C در دمای محیطی ۴۰° C کاهش دهد (Alburaki and Corona. 2021). هوش مصنوعی نیز با مدل‌های پیش‌بینی مانند FourCastNet قادر است شرایط گرمایی را تا ۷۲ ساعت قبل با دقت ۸۵٪ پیش‌بینی کند (Ladi *et al*. 2022). در حوزه مدیریت تغذیه، دستگاه‌های تغذیه خودکار زمان‌بندی تغذیه را بر اساس دمای محیط تنظیم کرده و ترکیب بهینه‌ای از الکترولیت‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها را ارائه می‌دهند (Shawky El-Sayed *et al*. 2023; Ladi *et al*. 2022). فناوری CRIS-PR-Cas9 نیز با شناسایی و تقویت ژن‌های مقاوم به گرما مانند HSP90، امکان اصلاح نژاد زنبورهای مقاوم را فراهم کرده است. همچنین، سیستم‌های خنک‌کننده خورشیدی با استفاده از پنل‌های فتوولتائیک، انرژی مورد نیاز پنکه‌های تهویه را تأمین کرده و تا ۴۰٪ در هزینه‌های عملیاتی صرفه‌جویی می‌کنند (Wei *et al*. 2020). این فناوری‌ها با یکپارچه‌سازی داده‌ها و تحلیل الگوهای آب‌وهوایی، راهکارهای جامعی برای مقابله با استرس گرمایی ارائه می‌دهند.

چالش‌های اجرایی بخش فناوری‌های نوین در مقابله با استرس گرمایی در زنبورستان‌ها:

پیاده‌سازی فناوری‌های نوین برای کاهش استرس گرمایی در زنبورداری با چالش‌های متعددی روبروست. مهمترین موانع شامل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری سیستم‌هایی مانند حسگرهای هوشمند و تجهیزات خنک‌کننده خودکار است که برای زنبورداران خرده‌پا، به‌ویژه در مناطق محروم، توجیه اقتصادی ندارد. محدودیت‌های دسترسی به فناوری در مناطق دورافتاده، کمبود زیرساخت‌های اساسی مانند اینترنت پایدار و شبکه برق، و وابستگی به واردات قطعات پیشرفته نیز اجرای این راهکارها را با مشکل مواجه می‌سازد. چالش‌های دیگر شامل نیاز به تخصص فنی برای نصب و نگهداری تجهیزات، مقاومت زنبورداران سنتی در برابر تغییرات، و کمبود آگاهی از مزایای فناوری‌های جدید می‌باشد که میزان پذیرش این نوآوری‌ها را کاهش می‌دهد. از جنبه فنی، طراحی سیستم‌هایی که بتوانند در شرایط سخت محیطی مانند رطوبت

بالا، گردوغبار و نوسانات دمایی شدید عملکرد پایدار داشته باشند، همراه با نیاز به منابع انرژی پایدار در مناطق محروم، از دیگر مشکلات پیش‌رو می‌باشد. علاوه بر این، موانع قانونی مانند نبود استانداردهای مشخص، پیچیدگی فرآیندهای اخذ مجوز و نگرانی‌های امنیتی در مدیریت داده‌ها، اجرای پروژه‌ها را با تأخیر مواجه می‌کند. برای حل این چالش‌ها، همکاری نزدیک بین دولت‌ها، محققان، شرکت‌های فناوری و زنبورداران، همراه با توسعه راهکارهای مقرون‌به‌صرفه، اجرای برنامه‌های آموزشی و تقویت زیرساخت‌ها ضروری به نظر می‌رسد. این رویکرد یکپارچه می‌تواند زمینه‌ساز تحولی پایدار در مدیریت استرس گرمایی زنبورستان‌ها باشد.

نتیجه‌گیری کلی:

تغییرات اقلیمی و استرس گرمایی یکی از بزرگترین تهدیدات برای زنبورداری و اکوسیستم‌ها می‌باشد. افزایش دما فراتر از آستانه تحمل زنبورهای عسل (۲۵-۳۵ درجه سانتی‌گراد) باعث اختلالات مولکولی، کاهش طول عمر زنبورها، اختلال در پرورش لاروها و تضعیف سیستم ایمنی می‌شود، که هم سلامت کلنی‌ها را تهدید می‌کند و هم به کاهش تولید عسل و کارایی گرده‌افشانی منجر می‌شود. برای مقابله با این چالش، ترکیبی از راهکارهای سنتی و فناوری‌های نوین ضروری است. استفاده از کندوهای عایق‌بندی شده، سایه‌اندازی طبیعی و تهویه هوشمند می‌تواند دمای داخلی کندو را تا ۷ درجه کاهش دهد. تغذیه زنبورها با الکترولیت‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و پروبیوتیک‌ها نیز مقاومت آن‌ها را در برابر گرما افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، به‌کارگیری روش‌های اصلاح نژادی (مانند CRISPR) برای تقویت ژن‌های تحمل حرارتی و استفاده از فناوری‌های دیجیتال مانند IoT و هوش مصنوعی برای پایش و پیش‌بینی شرایط محیطی، می‌تواند به مدیریت بهتر استرس گرمایی کمک کند. با این حال، اجرای این راهکارها با چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا، نیاز به تخصص فنی و محدودیت‌های محلی روبه‌رو می‌باشد. برای مثال، سیستم‌های خنک‌کننده خورشیدی در مناطق محروم ممکن است قابل اجرا نباشند. بنابراین، بومی‌سازی راه‌حل‌ها، آموزش زنبورداران و حمایت دولتی برای تأمین منابع مالی ضروری است. تلفیق دانش بومی با پژوهش‌های علمی و همکاری بین دولت‌ها، محققان و زنبورداران می‌تواند به توسعه روش‌های مقرون‌به‌صرفه و سازگار با شرایط مختلف اقلیمی منجر شود.

منبع ها:

Abou-Shaara, H. (2024). The response of heat shock proteins in honey bees to abiotic and biotic stressors. Journal of Thermal Biology, 119, 103784. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2024.103784.

Alburaki, M., & Corona, M. (2021). Polyurethane honey bee hives provide better winter insulation than wooden hives. Journal of Apicultural Research. Advance online publication. https://doi.org/10.1080/00218839.2021.1999578.

Ansaloni, L. S., Kristl, J., Domingues, C. E. C., & Gregorc, A. (2025). An overview of the nutritional requirements of honey bees (*Apis mellifera Linnaeus*, 1758). Insects, 16 (1), 97. https://doi.org/10.3390/insects16010097.

Blaauw, B. R., & Isaacs, R. (2015). Wildflower plantings enhance the abundance of natural enemies and their services in adjacent blueberry fields. Biological Control, 91, 94-103. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.08.003.

Bordier, C., Dechatre, H., Suchail, S., Peruzzi, M., Soubeyrand, S., Pioz, M., Pélissier, M., Crauser, D., Conte, Y. L., & Alaux, C. (2017). Colony adaptive response to simulated heat waves and consequences at the individual level in honeybees (*Apis mellifera*). Scientific Reports, 7 (1), 3760. https://doi.org/10.1038/s41598-019-49025-z.

García-Vicente, E. J., Martín, M., Rey-Casero, I., Pérez, A., Martínez, R., Bravo, M., Alonso, J. M., & Risco, D. (2023). Effect of feed supplementation with probiotics and postbiotics on strength and health status of honey bee (*Apis mellifera*) hives during late spring. Research in Veterinary Science, 159, 237-243. https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2023.05.001.

Kamboj, P., Kaur, G., & Gupta, G. (2024). Understanding the impact of heat stress on honeybee populations: Insights into thermoregulation, colony dynamics, and environmental interactions. Uttar Pradesh Journal of Zoology, 45 (12), 1-13. https://doi.org/10.56557/upjoz/2024/v45i124098.

Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 274 (1608), 303-313. https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721.

Kovac, H., Käfer, H., & Stabentheiner, A. (2018). The energetics and thermoregulation of water collecting honeybees. Journal of Comparative Physiology A, 204 (9-10), 783-790. https://doi.org/10.1007/s00359-018-1278-9.

Ladi, T., Jabalameli, S., & Sharifi, A. (2022). Applications of machine learning and deep learning methods for climate change mitigation and adaptation. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 49 (4), 1314-1330. https://doi.org/10.1177/23998083221085281.

Le Conte, Y., & Navajas, M. (2008). Climate change: Impact on honey bee populations and diseases. Revue Scientifique et Technique-Office International des Epizooties, 27 (2), 485-510.

Moffatt, L. (2001). Metabolic rate and thermal stability during honeybee foraging at different reward rates. Journal of Experimental Biology, 204 (4), 759-766. https://doi.org/10.1242/jeb.204.4.759.

Morfin, N., Anguiano-Baez, R., & Guzman-Novoa, E. (2021). Honey bee (*Apis mellifera*) immunity. Veterinary Clinics: Food Animal Practice, 37 (3), 521-533.

Nearman, A., & vanEngelsdorp, D. (2022). Water provisioning increases caged worker bee lifespan and caged worker bees are living half as long as observed 50 years ago. Scientific Reports, 12 (1), 18660. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21401-2.

Pudasaini, R., Dhital, B., & Chaudhary, S. (2020). Nutritional requirement and its role on honeybee:

A review. Journal of Agriculture and Natural Resources, 3 (2), 321-334. https://doi.org/10.3126/janr.v3i2.32544.

Saha, S. K., Rahman, S. M. A., Banerjee, S., & Rahman, F. H. (2022). Honey bee dynamics in the face of climate change. Environmental Analysis & Ecology Studies, 10 (1). http://dx.doi.org/10.31031/eaes.2022.10.000730.

Seeley, T. D. (2019). The lives of bees. Princeton University Press.

El-Sayed, A. S., Al-Rajhi, M. A. I., & Sharobeem, Y. F. (2023). Development of an automatic solar powered honey bee feeding system in a movable multi shelves apiary. Journal of Apicultural Research, 63 (1), 18-31. https://doi.org/10.1080/00218839.2023.2183550.

Southwick, E. E., & Heldmaier, G. (1987). Temperature control in honey bee colonies. BioScience, 37 (6), 395-399.

Stabentheiner, A., Kovac, H., & Brodschneider, R. (2010). Honeybee colony thermoregulation--regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress. PLoS ONE, 5 (1), e8967. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008967.

Tlak Gajger, I., & Mutinelli, F. (2024). Impact of environmental factors and management practices on bee health. Insects, 15 (12), 996. https://doi.org/10.3390/insects15120996.

Tongchai, P., Yadoung, S., Sutan, K., Kawichai, S., Danmek, K., Maitip, J., Ghosh, S., Jung, C., Chuttong, B., & Hongsibsong, S. (2024). Antioxidant capacity, phytochemicals, minerals, and chemical pollutants in worker honey bee (*Apis mellifera* L.) broods from Northern Thailand: A safe and sustainable food source. Foods, 13 (13), 1998. https://doi.org/10.3390/foods13131998.

Vanderplanck, M., Martinet, B., Carvalheiro, L., et al. (2019). Ensuring access to high-quality resources reduces the impacts of heat stress on bees. Scientific Reports, 9, 12596. https://doi.org/10.1038/s41598-019-49025-z.

Vilić, M., Žura Žaja, I., Tkalec, M., Tucak, P., Malarić, K., Popara, N., Žura, N., Pašić, S., & Gajger, I. T. (2024). Oxidative stress response of honey bee colonies (*Apis mellifera* L.) during long-term exposure at a frequency of 900 MHz under field conditions. Insects, 15 (5), 372. https://doi.org/10.3390/insects15050372.

Wei, H., Zhang, S., Hu, Z., Zhang, J., Liu, X., Yu, C., & Yu, H. (2020). Field experimental study on a novel beehive integrated with solar thermal/photovoltaic system. Solar Energy, 201, 682-692. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.054.

Zheng, Y., Cao, X., Xu, S., et al. (2024). Intelligent beehive monitoring system based on internet of things and colony state analysis. Smart Agricultural Technology, 9, 100584. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100584.

Zhang, G. H., Liu, H., Wang, J. J., et al. (2014). Effects of thermal stress on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of the predatory mite, Neoseiulus cucumeris (*Acari: Phytoseiidae*). Experimental and Applied Acarology, 64, 73-85. https://doi.org/10.1007/s10493-014-9806-y.

Zhao, H., Li, G., Guo, D., Li, H., Liu, Q., Xu, B., & Guo, X. (2021). Response mechanisms to heat stress in bees. Apidologie, 52, 388-399. https://doi.org/10.1007/s13592-021-00830-4.

Novel Strategies for Colony Management Under Heat Stress Conditions: From Laboratory Findings to Apiary Implementation

Shabnam Parichehreh[1], Leila Gharehdaghi[2]*

1- Honey bee Research Department, Animal Science Research of Iran, Agricultural Research Education and Extension, Organization (AREEO), Karaj, Iran

2- Animal Science Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran

DOI: 10.22034/HBSJ.2025.369250.1192

Abstract

Climate change and the resulting heat stress have severely impacted the physiological and molecular health of honeybees (Apis mellifera), leading to issues such as a reduction in worker bee lifespan by up to 18 days, developmental abnormalities in 60% of larvae, increased expression of heat shock proteins (HSP70/HSP90), and the accumulation of reactive oxygen species (ROS), which weaken the immune system and elevate the risk of colony collapse disorder (CCD). To address these challenges, proposed solutions include the use of insulated hives (reducing internal temperatures by up to 7°C), designing natural ventilation systems, providing nutritional supplements (electrolytes, antioxidants, and probiotics), and deploying modern technologies such as smart monitoring systems (IoT) and solar-powered cooling. Managing foraging grounds by planting drought-resistant vegetation and ensuring access to cool water sources also plays a key role in moderating environmental temperatures. However, implementation challenges such as high technology costs, the need for technical expertise, and incompatibility with local conditions (particularly in under-resourced regions) hinder the adoption of these solutions. Integrating traditional beekeeping knowledge with interdisciplinary research (molecular biology, artificial intelligence) and government support for cost-effective methods (e.g., solar cooling systems) is essential. Ultimately, preserving honeybee populations is critical not only for honey production but also for the survival of ecosystems and global food security.

Key words: Heat stress, honeybee (Apis mellifera), climate change, apiary management, modern technologies (IoT)

Corresponding Author: Leila Gharehdaghi
Email: gharehdaghi.leila103@gmail.com