

رویکردی نوآورانه برای تغذیه پایدار طیور و اقتصاد چرخشی با بهره‌گیری از حشره‌های خوراکی^۱

میترا ملائی پروری^۲، علیرضا زهرائی رضانی، سید داود شریفی و مصطفی صوفی زاده^۳

چکیده

افزایش جمعیت جهان، نگرانی‌های محیط‌زیستی، محدودیت سهم پروتئین دریافتی، از یک سو و نیاز به تولید و عرضه مواد غذایی از سوی دیگر، ضرورت یافتن منابع جایگزین و پایدار برای تغذیه دام و طیور را بیش از پیش برجسته ساخته است. صنعت مرغداری در ایران پس از نفت و پتروشیمی، بزرگترین حجم سرمایه‌گذاری را در بخش کشاورزی دارد و تأمین خوراک طیور برای امنیت غذایی کشور ضروری است. با این حال، در شرایط کنونی، کمبود منابع خوراکی از مهمترین دشواری‌های این صنعت است. قیمت منابع خوراکی مانند سویا و ذرت، رو به افزایش است و دسترسی به آن‌ها برای پرورش‌دهندگان در آینده محدودتر خواهد شد. در این میان، حشره‌های خوراکی به دلیل دارا بودن پروتئین زیاد، اسیدآمینه‌های ضروری، اسیدهای چرب مفید و توانایی تولید در مقیاس صنعتی با ردپای محیط‌زیستی کم، به‌عنوان یک گزینه نوآورانه مطرح شده‌اند. بهره‌گیری از حشره‌ها در جیره طیور نه تنها می‌تواند رشد، ایمنی و کیفیت محصول‌های طیوری را بهتر کند، بلکه با بهره‌برداری از پسماندهای آلی در فرایند پرورش، به برآوردن اصول اقتصاد چرخشی و کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی کمک می‌کند. با این حال، چالش‌هایی همچون استانداردسازی فرایند تولید، ایمنی میکروبی و شیمیایی، پذیرش بازار و الزام‌های قانونی همچنان باقی است. این مقاله مروری با تمرکز بر ظرفیت‌های تغذیه‌ای، سودمندی‌های محیط‌زیستی و اقتصادی و همچنین چالش‌های موجود، به بررسی نقش حشره‌های خوراکی در جیره غذایی طیور، به عنوان رویکردی سبز و پایدار برای صنعت طیور در چارچوب اقتصاد چرخشی، می‌پردازد. **واژه‌های کلیدی:** ارزش تغذیه‌ای حشره‌ها، اقتصاد چرخشی، حشره‌های خوراکی، خوراک طیور.

مقدمه

مصرف‌کنندگان در سراسر جهان بیش از پیش از تأثیر چشمگیر مصرف مواد غذایی بر محیط زیست آگاه شده‌اند و همین موضوع موجب افزایش سریع تقاضا برای غذاهای پایدار شده است. بنابراین، جهان با سه چالش بزرگ افزایش جمعیت، تغییر اقلیم و کمبود منابع پروتئینی روبه‌رو است و حل هر یک، نیازمند توجه همزمان به دیگر موردها است. در این مقاله تلاش شده است نگاهی جامع، اما مختصر به اهمیت موضوع (افزایش جمعیت، تغییر اقلیم و کمبود پروتئین)، نقش حشره‌ها به‌عنوان منبع

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۳

۲- پست الکترونیک نویسنده مسئول: m-molaeeep@razi.tums.ac.ir

۳- به ترتیب: پژوهشگر پسادکتری دانشگاه علوم پزشکی تهران و استاد دانشگاه علوم پزشکی تهران، استاد دانشگاه تهران، تهران و دانشیار دانشگاه ارومیه، ارومیه.

پایدار در صنعت خوراک دام و طیور، همراه با فرایند پرورش آن‌ها، تأثیرهای محیط‌زیستی استفاده از حشره‌ها و همچنین جایگاه آن‌ها در اقتصاد چرخشی و قانون‌ها و شرکت‌های فعال در بخش تولید حشره‌های خوراکی ارائه شود.

افزایش جمعیت

جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ به مرز ۹/۷ میلیارد نفر خواهد رسید که پروتئین مورد نیاز این جمعیت حدود ۶۰ میلیون تن خواهد بود (Poore & Nemecek, 2018). با توجه به افزایش جمعیت همراه با تغییر الگوی مصرف، فشار بر سیستم غذایی زیاد خواهد شد. بدیهی است که با محدودیت‌های منابع غذایی در آینده، زنجیره‌های تامین دچار دشواری خواهند شد. براساس برآورد سازمان ملل، بیش از ۱/۴ میلیارد تن مواد غذایی یعنی حدود ۳۳٪ از کل مواد غذایی تولیدی هدر می‌رود (Poore & Nemecek, 2018). برای تولید این مقدار مواد غذایی به تقریب حدود ۱۴ میلیون کیلومتر مربع زمین و ۲۵۰ کیلومتر مکعب آب سطحی و زیرزمینی مورد نیاز است (Van Deb Bos Verma et al., 2020). با برآوردهای انجام شده، هدررفت مواد غذایی سالانه مسئول انتشار حدود ۳/۳ میلیارد تن دی‌اکسیدکربن که معادل ۲۶ تا ۳۰٪ از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان است.

تغییرهای اقلیمی

افزایش دانش و آگاهی درباره تغییرهای اقلیمی، زمینه را برای درک بهتر چالش‌های پیش‌رو و توسعه راهکارهای مؤثر برای کاهش پیامدهای آن بر امنیت غذایی، کیفیت غذا و سلامت انسان فراهم می‌کند. از آغاز انقلاب صنعتی تا کنون، غلظت دی‌اکسیدکربن رو به افزایش است و از ۲۸۰ قسمت در میلیون به بیش از ۴۱۰ قسمت در میلیون در جو زمین رسیده است (Gerber et al., 2013). با توجه به افزایش جمعیت جهان، ضروری است روند افزایش بهره‌وری کشاورزی تسریع شود، زیرا تغییر اقلیم بر بهره‌وری کشاورزی تأثیر فراوانی دارد. افزایش دمای زمین موجب تغییر الگوی دما و بارش و پیامدهایی منفی بر بهره‌وری کشاورزی شده است. افزایش بیش از حد دی‌اکسید کربن در گیاهان، افزون بر تحریک رشد، می‌تواند با افزایش تولید کربوهیدرات‌هایی مانند قند و نشاسته، موجب کاهش نسبی غلظت پروتئین و ریزمغذی‌ها شود. این شرایط از دیدگاه امنیت غذایی برای آینده، بسیار مهم است. بنابراین، تغییر اقلیم (تغییر الگوی بارش و افزایش دما) تأثیرهای مستقیمی بر امنیت غذایی دارند و کشاورزی را با چالش‌های جدی روبه‌رو می‌سازند. برخی از این اثرها شامل کاهش کیفیت محصول‌ها، کاهش منابع آب شیرین و محدودیت آبیاری، گسترش آفت‌ها و بیماری‌های جدید، کاهش حاصلخیزی خاک و کاهش تولید پروتئین حیوانی است. از سویی، دامداری‌ها نیز مسئول انتشار گازهای گلخانه‌ای، جنگل‌زدایی و از بین رفتن گوناگونی زیستی در بخش کشاورزی هستند و حدود ۱۴/۵٪ تولید گازهای گلخانه‌ای جهان مربوط به پرورش دام و طیور است. همچنین صنعت پرورش دام و طیور ۳۰٪ سطح کره زمین یا ۷۵٪ زمین‌های کشت‌پذیر را به خود اختصاص داده است. حدود ۸٪ آب شرب انسانی صرف آبیاری گیاهانی می‌شود که مصرف دامی دارند (Gerber et al., 2013). سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد افزایش مصرف فرآورده‌های حیوانی تا سال ۲۰۵۰ را ۶۰ تا ۷۰٪ اعلام کرده است که بخش عمده آن نیازمندی‌های کشورهای در حال توسعه است (FAO, 2011). بنابراین، با توجه به افزایش جمعیت، نیاز به منابع پروتئینی زیادی است که تهیه آن با توجه به محدودیت منابع گیاهی، تغییرهای اقلیمی، رقابت به‌خاطر استفاده از این منابع برای تولید غذای انسان، خوراک دام و سوخت با چالش‌های بزرگی روبه‌رو است.

با توجه به چالش‌های محیط‌زیستی ناشی از تولید پروتئین حیوانی، توجه به روش‌های پایدار تأمین پروتئین اهمیت فزاینده‌ای دارد. از مهمترین راهکارها می‌توان به پروتئین‌های گیاهی مانند حبوبات، پنیر سویا^۱ و مغزها اشاره کرد که ردپای محیط‌زیستی کمتری دارند. همچنین گوشت کشت‌شده یا تولید گوشت که از افزایش یاخته‌های حیوانی در محیط آزمایشگاهی به دست می‌آید، گزینه‌ای برای کاهش فشار بر منابع طبیعی است. پروتئین‌های تخمیری حاصل از میکروارگانیسم‌هایی مانند مخمر و جلبک نیز با نیاز اندک به زمین و انرژی، راهکاری کارآمد به شمار می‌روند. در پایان، حشره‌های خوراکی به عنوان منبعی غنی از پروتئین که مصرف آب و زمین کمی دارند، می‌توانند نقش مهمی در تأمین پایدار پروتئین داشته باشند که موضوع این مقاله می‌باشد.

حشره‌ها، منبع غذایی پایدار

حشره‌ها منبع غذایی بسیار مغذی و سالم با چربی زیاد همراه با پروتئین، ویتامین، فیبر و مواد معدنی هستند. ارزش غذایی حشره‌های خوراکی به دلیل تنوع گونه‌ای آن‌ها بسیار متغیر است و در گونه‌های یکسان، بسته به مرحله زیستی، زیستگاه و رژیم غذایی، متفاوت است. برای نمونه، ترکیب‌های غیراشباع امگا ۳ و امگا ۶ اسید چرب در لاروها قابل مقایسه با مقدارهای موجود در ماهی است و بیشتر از گوشت گاو و خوک است (Van Huis *et al.*, 2013).

حشره‌ها با چندین میلیون گونه شناخته شده، گوناگون‌ترین گروه جانوری روی زمین هستند. از این شمار، به تقریب ۲۰۰۰ گونه به عنوان گونه خوراکی شناخته شده‌اند. بیش از ۲۰۰۰ سال است که تغذیه از حشره‌ها بین مردم آفریقا و آسیا رایج است. امروزه، حدود دو میلیارد نفر از جمعیت کل جهان از حشره‌ها به عنوان منابع پروتئینی کم و بیش استفاده می‌کنند. از گذشته تاکنون، انسان شمار محدودی از گونه حشره‌ها از جمله زنبور عسل و کرم ابریشم را به خاطر فراورده‌های آن‌ها (عسل و ابریشم) اهلی کرده است. در دهه‌های گذشته گرایش به پرورش برخی از گونه‌های حشره‌ها از جمله کرم آرد^۲ و مگس سرباز سیاه^۳ به عنوان خوراک حیوان‌های خانگی، دام، طیور و آبزیان افزایش یافته است.

تاریخچه مصرف حشره‌ها

تاریخچه مصرف حشره‌های خوراکی در اروپا به دوره باستان (یونان و رم) بر می‌گردد و ارسطو (چهار قرن پیش از میلاد) در کتاب تاریخ حیوان‌ها از مصرف لاروهای زنجبرک واران (زنجره‌های سیکادا^۴) و لارو بعضی زنبورهای خانواده وسیپیده^۵ گزارش داده است. پلینی بزرگ^۶ (قرن یک میلادی) در تاریخ طبیعی به مصرف لارو سوسک‌ها توسط رومی‌ها اشاره کرده است (Bodenheimer, 1951)، اما در دوران نوین (قرن ۲۱)، اتحادیه اروپا در سال ۲۰۲۱، تغذیه از کرم آرد^۷ را به عنوان اولین حشره خوراکی تأیید کرد و کشورهای هلند، بلژیک و فرانسه در تولید محصول‌های با حشره‌های خوراکی (مانند محصول‌های پروتئینی که دارای پودر جیرجیرک است) فعال شدند (Lähteenmäki-Uutela *et al.*, 2021). در دوران پیش از کشف قاره آمریکای مرکزی، حشره‌های آبی^۸ و تخم مگس Ahuautle^۹ (موسوم به خاویار مکزیکی) در غذاهای خود استفاده می‌کردند. در آمریکای شمالی، در قبیله‌های بومی ناواهو^{۱۰}، از ملخ‌ها به عنوان منبع پروتئین استفاده می‌شد (Ramos-Elorduy, 2009). در ایالات متحده آمریکا و کانادا از سال ۲۰۱۰، شرکت‌هایی مانند Chapul و Entomo Farms تولید آرد جیرجیرک و محصول‌های پروتئین را آغاز کردند. در مکزیک، چاپولین^{۱۱} (ملخ‌های سرخ شده) در برخی از

1. Tofu	2. Mealworm (<i>Tenebrio molitor</i>)	3. <i>Hermetia illucens</i>	4. <i>Cicada</i> spp.
5. Vespidae	6. Pliny the Elder	7. Yellow mealworm	8. Axayácatl
9. <i>Corisella</i>	10. Navajo	11. Chapulin	

رستوران‌های لوکس برای تغذیه عرضه می‌شوند (Van Huis, 2020). در آسیای شرقی (چین باستان) کتاب بن تسائو گانگمو^۱ (قرن ۱۶) لی شیژن^۲ از سودمندی‌های دارویی کرم‌های ابریشم و زنبورهای خوراکی نوشته است. در سلسله تانگ^۳ (۶۱۸ تا ۹۰۷ میلادی) مصرف لارو زنبورها و سوسک‌های گوزنی^۴، رایج بود (Feng et al., 2018). در چین نوین و آسیای شرقی مانند تایلند جیرجیرک‌های سرخ شده و کرم بامبو^۵ در بازارهایشان یافت می‌شوند. در ژاپن و بعضی دیگر از کشورهای شرق آسیا لاروهای پشه‌های جنس *Stenopsyche*^۶ به عنوان خوراکی لذیذ با نام محلی زازاموشی مصرف می‌شود. در کره جنوبی، از شفیره‌های بوداده شده کرم ابریشم^۷ به عنوان یک میان وعده غذایی محبوب استفاده می‌شود (Hanboonsong et al., 2013). در دیگر منطقه‌های آسیا، از جمله برخی از قبیله‌ها در هند (ایالت آسام) از کرم‌های ابریشم وحشی استفاده می‌کنند. اندونزیایی‌ها سوسک‌های گوزنی را به صورت کبابی مصرف می‌کنند. در ویتنام، از کرم‌های بامبو در تهیه غذاهای محلی استفاده می‌شود (Meyer-Rochow, 2017). از این نظر، ایران تاریخچه محدود، اما رو به رشدی دارد، در ایران باستان مدرک‌های پراکنده‌ای وجود دارند که برخی از تاریخ‌نویسان به آن‌ها اشاره کرده‌اند در منطقه‌های کویری در زمان قحطی، مردم از روی ناچاری از ملخ‌ها تغذیه می‌کردند. در طب سنتی، در برخی از متن‌های قدیمی، عسل زنبورهای وحشی و پودر ملخ برای درمان برخی از بیماری‌ها توصیه شده است. در سال‌های اخیر، توجه به پرورش حشره‌های خوراکی صنعت دام و طیور در ایران افزایش یافته و برخی از پژوهشگران امکان استفاده از حشره‌های به عنوان منبع پروتئین جایگزین را بررسی کرده‌اند (Talaie et al., 2022).

ترکیب‌های مغذی حشره‌ها

حشره‌ها به خاطر خون سرد بودن و ضریب تبدیل غذایی مناسبی که دارند، می‌توانند پسماندهای غذایی و کشاورزی را به زیست‌توده با ارزش و پروتئینی با کیفیت زیاد تبدیل کنند. حشره‌ها در میانگین ۴۰ تا ۷۵٪ پروتئین (بر پایه وزن خشک) دارند. جیرجیرک خانگی^۸ ۶۵ تا ۷۰٪ (Rumpold & Schlüter, 2013)، کرم آرد ۴۵ تا ۵۵٪ (Sandra & Bukkens, 2005) و ملخ مهاجر^۹ ۶۰ تا ۷۵٪ پروتئین دارند (Van Huis, 2013). از نظر چربی‌های سالم، کرم ابریشم ۴۹٪ (Longvah et al., 2011) و موربانه‌ها ۳۵ تا ۴۵٪ چربی (Ekpo & Onigbinde, 2005) دارند. پروفایل اسیدهای چرب (نسبت امگا ۳ به امگا ۶) در کرم آرد به نسبت ۱:۵ (همسان ماهی) می‌باشد (Paul et al., 2017) و مقدار آهن در موربانه‌ها ۲۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک است (Christensen et al., 2006) که بیشتر از اسفناج است. غلظت عنصر روی در ملخ ۱۲ تا ۲۵ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم و ماده خشک است (Latunde-Dada et al., 2016) که همسان گوشت گاو است. همچنین، غلظت ویتامین B₁₂ در لارو مگس سرباز سیاه ۱ تا ۵/۸ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک می‌باشد. (Schmidt et al., 2019) و ریپوفلاوین (B₂) در جیرجیرک ۱/۵ تا ۲ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک (۵ برابر شیر) گزارش شده است. افزون بر این، کیتین موجود در پوشش حشره‌ها ویژگی پروبیوتیک دارد (Kourimská & Adámková, 2016) و پپتیدهای مشتق از پروتئین حشره‌ها، مانع افزایش فشار خون می‌شوند (Vercruysse et al., 2005).

1. Bentso Gangmo	2. Li Shizhen	3. Tang Dynasty	4. <i>Rhynchophorus ferrugineus</i>	5. Bamboo worm
6. Zaza-mushi	7. <i>Bombyx mori</i>	8. <i>Acheta domesticus</i>	9. <i>Locusta migratoria</i>	

بهره‌گیری از حشره‌ها در صنعت خوراک دام و طیور

کمبود مواد خوراکی، مهمترین دشواری و عامل محدودکننده در مسیر پیشرفت صنعت‌های پرورش دام و طیور در بیشتر جاهای جهان است. صنعت خوراک برای تامین دیگر مواد غذایی این شایستگی را دارد که برای رفع چالش‌های موجود در این صنعت، راه حل‌های هدفمند ارائه دهد. امروزه، این صنعت با چالش‌های بزرگی برای تامین خوراک طیور دارد، اما این چالش‌ها از سوی مصرف‌کنندگان، سیاست‌گذاران و تمام بخش‌هایی که مرتبط با این صنعت هستند، می‌توانند با استفاده از سیستم‌های نوین، نیاز تغذیه‌ای را تامین و اثرهای منفی تغییرهای اقلیمی را با کاهش استفاده از زمین و آب کمتر کند. هدف اصلی صنعت خوراک دام و طیور، تامین نیازهای بازار، بهینه‌سازی هزینه‌ها، بازدهی عملکرد خوراک و حفظ محیط زیست می‌باشد. این صنعت در سال‌های اخیر، بیش از گذشته بر موضوع محیط زیست تمرکز دارد. موضوع‌های مهم محیط‌زیستی که باید مورد توجه قرار گیرند شامل ماده‌های خام مورد استفاده، فرایند تولید و تاثیر مصرف خوراک دام و طیور است.

امروزه، جنگل‌زدایی و تاثیر تغییر کاربری زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای، بزرگترین دشواری در بخش مصرف مواد خام خوراک دام و طیور (دانه سویا و روغن پالم) است (Kayhani & Rafiei, 2022). صنعت‌های پرورش دام و طیور، ۳۰٪ از کل زمین (به جز سرزمین قطبی) یا ۷۵٪ زمین‌های کشت‌پذیر (برای کشت بقولات، غلات و مرتع‌ها) و ۸٪ آب آشامیدنی، صرف آبیاری گیاهانی می‌شود که مصرف دامی دارند (Schlink et al., 2010).

با وجود گوناگونی بسیار زیاد حشره‌ها، همه آن‌ها برای مصرف در خوراک دام یا تولید در مقیاس صنعتی مناسب نیستند و تنها چند گونه به‌طور ویژه برای استفاده در جیره دام پرورش داده می‌شوند. برای نمونه، می‌توان به کرم زرد آرد، لارو مگس سرباز سیاه، جیرجیرک‌های و همچنین ملخ‌های زرد و سبز اشاره کرد که به دلیل ارزش غذایی بالا و پرورش آسان، بیشترین کاربرد را در صنعت خوراک دام دارند (Van Huis, 2016). استفاده از لاروهای مگس سرباز سیاه در جیره مرغ‌های تخم‌گذار تاثیر مثبتی بر جامعه میکروبی متانوژنیک^۱ دارد و موجب افزایش فراوانی *Methanobrevibacter woesei* در روده^۲ این پرندگان شده است، عاملی که می‌تواند بر بهبود فرایندهای گوارشی و کارکرد روده اثرگذار باشد (Mahayri et al., 2025). همچنین، اثرهای مفید لاروهای درشت - کرم آرد از سوسک‌های خانواده تنبریونیده^۳ بر بلدرچین‌های ژاپنی مشاهده شده است (Al-Khalaifah et al., 2025). در پژوهشی نشان داده شد که لارو مگس خانگی^۴ به‌عنوان منبعی غنی از پروتئین می‌تواند نقش چشمگیری در تغذیه مرغ‌های تخم‌گذار داشته باشد. نتایج این پژوهش نشان دادند که استفاده از ۱۰ تا ۱۵٪ لارو مگس خانگی در جیره، موجب کاهش مصرف خوراک و همچنین بهبود ضریب تبدیل خوراک، نسبت کارایی پروتئین و کارایی انرژی می‌شود (Salehizadeh et al., 2025).

فراورده‌های حاصل از حشره‌ها مانند دیگر ترکیب‌های غذایی باید بدون آلودگی شیمیایی و میکروبی باشند. از آنجایی‌که ترکیب‌های تشکیل‌دهنده بدن هر جانوری بر اساس مرحله‌های رشد، نوع بستر پرورش، نیازهای تغذیه‌ای، مقدار اسیدهای چرب، ریزمغذی‌ها و پروفایل اسیدهای آمینه متفاوت است (Kim et al., 2019)، برای جلوگیری از انباشت زیستی این آلودگی‌ها در زنجیره غذایی (دام و انسان)، عامل‌هایی مانند کیفیت بستر پرورش و نوع تغذیه آن‌ها باید کنترل شود (Diener et al., 2015). حشره‌های خوراکی (خشک‌شده یا زنده) جیره کاملی برای خوراک طیور است، اما نباید بیش از حد مجاز از آن‌ها استفاده شود، تا سلامت طیور به خطر نیفتد و اثر مثبتی بر بازدهی داشته باشند. برای

1. Methanogenic

2. Ceca

3. Tenebrionidae (*Zophobas morio*)

4. *Musca domestica*

نمونه، پروفایل اسیدهای آمینه حشره‌ها برای حیوان‌های تک معده‌ای مناسب است، چون عکس نشخوارکنندگان، توانایی تولید همه اسیدهای آمینه ضروری را ندارند. لوسین، ایزولوسین، والین، فنیل‌الانین، ترئونین، متیونین، تریپتوفان و لیزین از اسیدهای آمینه ضروری هستند. پروتئین خام حشره‌ها بین ۴۱ تا ۶۳٪ (بر پایه ماده خشک) متغیر است. اما کیفیت پروتئین به مقدار اسید آمینه ضروری و غیرضروری (آلانین، آسپارژین، آسپارتیک اسید، سیستئین، گلوتامین، گلوتامیک اسید، گلیسین، پرولین، سرین، تیروزین و آرژنین) و توانایی گوارش یا دسترسی زیستی بستگی دارد. بنابراین، هنگام بررسی منابع نوین پروتئین برای مصرف در خوراک دام و طیور باید موردهای یاد شده در نظر باشند. متیونین و سیستئین از اسیدهای آمینه ضروری برای خوراک دام‌اند که مقدارشان در حشره‌ها، پودر ماهی و کنجاله سویا همسان است (Kayhani & Rafiei, 2022). آرژنین که برای طیور ضروری است، با سوخت و ساز طیور تامین نمی‌شود و باید به جیره آن‌ها اضافه شود. از این رو، حشره‌ها منبع مناسبی از اسیدهای آمینه هستند. هر شش گونه حشره‌ای که در بخش‌های پیشین معرفی شدند، شامل کرم زرد آرد، مگس سرباز سیاه، جیرجیرک راست بال، ملخ زرد و ملخ سبز، به جز مگس خانگی، از نظر مقدار پرولین غنی هستند و از این نظر می‌توانند، همسان کنجاله سویا و پودر ماهی، به عنوان منابع مناسب این اسید آمینه در تغذیه مورد توجه قرار گیرند.

یکی از موضوع‌های مهم در رابطه با جیره طیور، وجود عامل‌های ضد تغذیه‌ای مانند مهارکننده تریپسین است (که به پروتئین مانند تانن‌ها متصل می‌شود) و به مقدار زیادی در پروتئین‌های گیاهی وجود دارد و بر توانایی گوارش پروتئین تاثیر منفی دارد. کیتین ماده‌ای سخت و مقاوم (پلی‌ساکارید طبیعی) است که بخش اصلی اسکلت خارجی حشره‌ها را تشکیل می‌دهد. کیتین موجود در حشره‌ها، توانایی اتصال به پروتئین‌ها و اسیدهای آمینه را دارد و می‌تواند به عنوان یک عامل ضدتغذیه‌ای در حشره‌ها (مانند جیرجیرک خانگی) عمل کند و توانایی گوارش و جذب روده‌ای در حیوان را کاهش دهد (Rathore & Gupta, 2015). روغن حشره‌ها یک منبع چربی طبیعی و دارای اسیدهای چرب اشباع، غیراشباع، تری‌گلیسیرید و مقدار کمی مواد زیست فعال است. مقدار روغن شش گونه (لارو سوسک آرد، لارو مگس سرباز سیاه، جیرجیرک‌ها و همچنین ملخ‌های زرد و سبز) از حشره‌ها بین ۱۹ تا ۳۸٪ (بر پایه وزن خشک) متغیر است (Jongema, 2012). بیشترین مقدار اسید چرب مربوط به لارو سوسک آرد و کمترین مقدار در لارو مگس خانگی است. در مقایسه با کنجاله سویا (۲/۴٪ چربی) و پودر ماهی (۱۰٪ چربی)، مقدار چربی حشره‌ها از این مواد بیشتر است. اولئیک اسید (C18:1)، لینولئیک اسید (C18:2) و پالمیتیک اسید (C16:0) از مهمترین اسیدهای چرب در حشره‌ها است. در پژوهشی مشخص شد که اسیدهای چرب اشباع حشره‌ها با زنجیره متوسط دارای ویژگی‌های ضدباکتریایی هستند و می‌توانند برای بهبود سلامت دستگاه گوارش خوکچه هندی در خوراک آن به کار روند (Jongema, 2012). چربی کنجاله حشره‌ها از تری‌اسیل‌گلیسرول^۱ تشکیل شده است (Kouřimská & Adámková, 2016) و باید بر اساس نیازهای غذایی حیوان‌ها استخراج شود.

فیبر خام در حشره‌ها بیشتر از کیتین نامحلول تشکیل شده است و دارای ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی و ضد التهابی است (Van Huis et al., 2013). مقدار فیبر خام در شش گونه از حشره‌ها لارو سوسک آرد، مگس سرباز سیاه، جیرجیرک‌ها و همچنین ملخ‌های زرد و سبز بین ۳ تا ۷٪ (بر پایه وزن خشک) متغیر است. هرچند پژوهش‌هایی نشان داده‌اند که حشره‌ها فیبر خام دارند، اما در برخی از گزارش‌ها، فیبر حشره‌ها را ترکیبی از فیبر شوینده اسیدی^۲ و فیبر شوینده خنثی^۳ معرفی کرده‌اند. مقدار فیبر در حشره‌های خوراکی مانند لارو مگس سرباز سیاه (بر پایه وزن خشک) از

۱۳٪ تا ۲۹٪ فیبر شوینده اسیدی و ۷/۹ تا ۱۵٪ فیبر شوینده خنثی تشکیل شده است، درحالی‌که کنجاله سویا دارای ۱۴٪ فیبر شوینده خنثی و ۸/۴٪ فیبر شوینده اسیدی است (Campbel et al., 2020).

ارزش ماده غذایی از نظر مواد معدنی، کیفیت و ایمنی خوراک طیور با آزمون خاکستر ارزیابی می‌شود. مقدار خاکستر حشره‌های خوراکی بین ۳ تا ۱۶٪ وزن خشک متغیر است. بیشترین مقدار در لارو مگس سرباز سیاه و کمترین در کرم آرد است. مقدار آن در حشره‌ها به دلیل اسکلت کلسیفید^۱ (اسکلتی که کلسیم روی آن رسوب کرده باشد) کمتر از پودر ماهی است (Fenke & Oonnincx, 2017). با توجه به محتوای مواد معدنی، حشره‌های می‌توانند بخش چشمگیری از نیازهای حیوان‌ها به عناصر معدنی را تأمین کنند. مقدار کلسیم در گونه‌های مختلف حشره‌ها متفاوت می‌باشد. برای نمونه، مقدار کلسیم در لارو مگس سرباز سیاه ۹۳۴۰ و در لارو مگس خانگی ۷۶۵ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است. مقدار منیزیم، ید و منگنز در لارو مگس سرباز سیاه بیشتر از لارو مگس خانگی است (Feng, 2013). فسفر که در مواد خوراکی گیاهی بیشتر به صورت فیتات است و اغلب در حیوان‌های تک معده‌ای در دسترس نیست، در حشره‌ها دسترسی زیستی دارد. بنابراین، حشره‌ها منبع مناسبی از مواد معدنی، پروتئین و فیبرند.

تجزیه آنزیمی پروتئین‌های بدن حشره‌ها زنجیره‌های کوچکی از اسیدهای آمینه به نام پپتید را تولید می‌کند که می‌توانند به عنوان افزودنی به خوراک دام اضافه شوند. این پپتیدها افزون بر منبع پروتئین، دارای ویژگی ضد میکروبی هستند و می‌توانند ویروس‌ها، تک یاخته‌ها، باکتری‌ها و قارچ را از بین ببرند (Wu et al., 2018). در پژوهشی، از پپتید ضد میکروبی سیکروپین^۲ حشره‌ها برای بهبود سیستم ایمنی خوکچه هندی استفاده شد که موجب کاهش بیماری‌های دستگاه گوارش آن شد (Wu et al., 2012). سیکروپین به بهبود بازده مواد مغذی در جیره جوجه‌های گوشتی کمک می‌کند (Wen et al., 2012). از این رو، کاربرد حشره‌ها در جیره دام، کمترین اثرهای منفی را به همراه دارد، چون بیشتر مواد مغذی آن‌ها شناخته شده است و افزودن حشره‌ها در تغذیه دام و طیور ممکن است به کاهش مصرف آنتی‌بیوتیک‌ها نیز کمک کند.

پرورش حشره‌ها و اقتصاد چرخشی

اقتصاد چرخشی، الگوی اقتصاد اجتماعی است که هدف آن بازتعریف رشد با تمرکز بر سودمندی‌های بیشتر و به کارگیری منابع است. اقتصاد چرخشی رو به روی اقتصاد خطی قرار دارد که امروز در بیشتر جاهای جهان جریان دارد و بر پایه چرخه ساده (گرفتن، ساختن، مصرف کردن و دورانداختن) عمل می‌کند. امروزه با افزایش خطرهای ناشی از اقتصاد خطی (دشواری‌های محیط‌زیستی و اقلیمی) و استفاده از سوخت فسیلی برای تولید انرژی، پیدایش الگوی اقتصاد چرخشی برای دستیابی به پایداری محیط‌زیستی و حفظ تعادل بوم‌شناختی، اجتناب‌ناپذیر شده است. در این زمینه، به پیروی از هدف‌های توسعه پایدار سازمان ملل^۳، پرورش حشره‌ها به عنوان جایگزین صنعتی برای حمایت از تولید خوراک دام، محصول‌های خوراکی و غیرخوراکی معرفی شده است. از دیدگاه اقتصاد چرخشی، استفاده از پسماند غذایی یکی از مهمترین موردها در پرورش حشره‌ها می‌باشد. پسماند سالانه مواد غذایی در اتحادیه اروپا حدود ۸۸ میلیون تن برآورد شده است که ارزش اقتصادی آن نزدیک به ۱۴۰ میلیارد یورو است. در ایران نیز مقدار پسماند مواد غذایی حدود ۳۵ میلیون تن در سال برآورد شده که ارزش اقتصادی آن حدود ۱۵ میلیارد دلار تخمین زده شده است (Kayhani & Rafiei, 2022). براساس گزارشی که سازمان ملل^۴ در مورد همکاری بخش حشره‌های اتحادیه اروپا برای بهبود دوام و پایداری محصول

1. Calcified skeleton

2. Cecropin

3. United Nations Sustainable Development Goals (SDGs)

4. International Platform of Insect for Food and Feed (IPIFF)

از کشتزار تا سفره ارائه کرده است، تا یک سوم از پسماندهای غذایی را می‌توان برای پرورش صنعتی حشره‌ها به کار برد. در سال ۲۰۱۷، کمیسیون اروپا هفت گونه حشره از جمله لارو سوسک آرد، مگس خانگی و مگس سرباز سیاه را به عنوان حشره‌های پرورشی معرفی کرده است (آیین نامه شماره ۲۰۱۷/۸۹۳۰). در اتحادیه اروپا، حشره‌های خوراکی نیز مشمول الزام‌های عمومی ایمنی و بهداشت مواد غذایی هستند. این الزام‌ها بر اساس قانون عمومی مواد غذایی (Regulation (EC) No. 178/2002) و مقررات مربوط به بهداشت مواد غذایی، از جمله Regulation (EC) No. 183/2005، اعمال می‌شوند. بنابراین، تولید، فراوری و عرضه حشره‌ها برای مصرف غذایی یا استفاده در خوراک دام و طیور باید برابر با الزام‌های قانونی و بهداشتی مربوط انجام شود. برای نمونه، از مواد غذایی دورریز که دارای گوشت و ماهی هستند و پسماندهای رستورانی، نمی‌توان به عنوان خوراک حشره‌ها استفاده کرد (آیین نامه شماره ۷۶۷/۲۰۰۹، European Commission, 2009) و بر اساس قانون‌های مربوط به بازاریابی خوراک حیوان‌ها، کودهای حیوانی (خوک) برای تغذیه حشره‌ها ممنوع است. از دیدگاه ایمنی خوراک و مواد غذایی، برخی از گونه‌های حشره‌ها، مناسب برای پرورش صنعتی دارای ویژگی‌های زیستی و تولیدمثلی ویژه‌ای هستند که می‌تواند چالش‌هایی را برای اجرای الزام‌های نظارتی و کنترل‌های بهداشتی در اتحادیه اروپا و سایر جاهای جهان ایجاد کند. از این رو، رعایت الزام‌های ایمنی در تمامی مرحله‌های پرورش، فراوری و استفاده از حشره‌ها در زنجیره تولید غذا و خوراک ضروری است. در پژوهش (Lalander, et al., 2019) گزارش شده است که لارو مگس سرباز سیاه می‌تواند موجب کاهش مقدار میکروارگانیزم‌های بیمارگر^۱ در بستر پرورش حشره‌ها شود. که این پدیده را ناشی از فعالیت زیاد آنزیمی در روده لارو مگس سرباز سیاه و تفاوت در اسیدیته دستگاه گوارش که بین ۲ و ۸ متغیر است، دانستند. همچنین، کودهای دامی که به عنوان بستر پرورش حشره‌ها به کار می‌روند دارای آنتی‌بیوتیک‌ها و باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک هستند با وجود این، استفاده از لارو مگس سرباز سیاه موجب افزایش تجزیه تتراسایکلین در بستر می‌شود (Cai et al., 2018) و تجزیه مایکوتوکسین‌ها (Bosch et al., 2017) همچنین، توانایی این حشره در تجزیه و کاهش برخی از آلاینده‌های موجود در بستر پرورش و فرایند زیست‌پالایی آن گزارش شده است. از سوی دیگر، توانایی لارو این حشره در جذب و انباشت برخی از فلزهای سنگین نیز در بررسی‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، استفاده از بسترهای آلوده برای پرورش این حشره می‌تواند موجب انتقال و تجمع آلاینده‌ها، به‌ویژه فلزهای سنگین، در زیست‌توده لارو شود (Proc et al., 2020). از دید توانایی زیستی، لارو مگس خانگی و لارو سوسک آرد همسان یکدیگر هستند (Nordentoft et al., 2017). بنابراین، برای پایداری و حمایت از اقتصاد چرخشی، حشره‌ها می‌توانند به‌عنوان یک مهره مهم در سیستم تولید خوراک دام و طیور و تبدیل پسماندهای کشاورزی و غذایی به پسماندهای آلی، نقش چشمگیری داشته باشند. برای دست‌یافتن به عملکرد زیاد سیستم تولید حشره‌ها، باید عامل‌های کلیدی مانند رطوبت، اسیدیته، مقدار ارزش تغذیه‌ای بستر پرورش و دما که از اهمیت بسیار زیادی برخوردارند، مورد توجه قرار بگیرند. بنابراین، طراحی یک سیستم با شرایط مناسب برای افزایش مقیاس پرورش صنعتی حشره‌ها بسیار مهم است. در پژوهشی از پسماندهای مختلف کشاورزی به‌عنوان ماده خوراکی برای تغذیه لارو مگس سرباز سیاه استفاده و مشخص شد که با گزینش یک بستر مناسب، می‌توان در مقیاس نیمه‌صنعتی به طراحی یک خوراک ترکیبی با نرخ تبدیل خوراک ۲/۵ (بر پایه خشک) و بازدهی زیاد رسید (Heckmann & Gligorescu, 2019). در پژوهشی که برای تولید نیمه صنعتی لارو مگس سرباز سیاه با استفاده از پسماند آلی خانگی انجام شد، برای تولید پایدار این حشره، ابتدا تراکم لاروها، حجم

خوراک و شمار بارهای تغذیه لاروها بهینه‌سازی گردید. در دوره یک‌ساله، با تغذیه هر دسته لارو با ۵۸ کیلوگرم پسماند آلی خانگی، ۲۵ دسته لارو در شرایط نیمه‌صنعتی تولید شد (Fischer et al., 2018). به‌منظور دست یافتن به شایستگی اقتصاد چرخشی باید یکی از فراورده‌های جانبی در پرورش صنعتی حشره‌های خوراکی، یعنی کود (مدفوع) آن‌ها، مورد توجه قرار بگیرد. کود حشره‌ها در مقیاس صنعتی، بخش چشمگیری از فراورده‌های جانبی را شامل می‌شود که باید از آن بهره‌گیری شود. پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از مدفوع حشره‌ها، به‌عنوان کود زیستی در رشته‌های باغبانی و کشاورزی و کاربرد آن در تولید بیوگاز^۱ انجام شده است. استفاده از مدفوع حشره‌ها به‌عنوان کود در بخش کشاورزی و باغبانی اهمیت زیادی دارد، چون بیشتر حشره‌ها در مرحله جوانی (لاروی و شفیرگی) بسترهای آلی و در حال فساد را به مدفوع تبدیل می‌کنند. این مدفوع مانند کودهای حیوانی سرشار از مواد مغذی است که برای تغذیه گیاهان به زیست‌بوم برمی‌گردد. بنابراین، استفاده از مدفوع حشره‌ها از سودمندی‌های محیط‌زیستی و اقتصادی برخوردار می‌باشد. به‌هرحال، باید بررسی‌های بیشتری درباره شایستگی کامل کود حشره‌ها به عنوان فراورده جانبی انجام شود. در نتیجه، اقتصاد چرخشی، پسماندهای بازیافت شده را به شکل‌های سودمندی تبدیل می‌کند و تا حدی جایگزین مصرف منابع طبیعی با تأثیر محیط‌زیستی کمینه هستند.

تأثیرهای محیط‌زیستی حشره‌ها

در نخستین کتابی که در زمینه مصرف حشره‌ها به عنوان خوراک دام منتشر شد (Linder, 1919) از لارو سوسک آرد و لارو مگس خانگی نام برده شده است و همچنین، دیدگاه و اصول تبدیل برخی از منابع به ترکیب‌های مفید به کمک حشره‌ها در این کتاب مطرح شده است. پرورش حشره‌ها در مقیاس صنعتی، مدت‌های زیادی به‌عنوان جایگزین پایدار برای فراورده‌های سنتی حیوانی مطرح شده است (Oonincx, 2015).

امروزه، انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان محرک تغییر اقلیم مورد توجه است. گازهای گلخانه‌ای شامل دی‌اکسیدکربن، متان و اکسید نیتروژن می‌باشند که گاز متان نسبت به دیگر گازها از نظر محیط‌زیستی زیانبارتر است. برخی از حشره‌ها مانند سوسک‌های حمام و موربانه‌ها دارای باکتری‌های تولیدکننده متان هستند. مقدار تولید این گاز در این حشره‌ها متفاوت است. متان (CH_4) و اکسید نیتروس (N_2O) که در فرایندهای میکروبی تولید می‌شوند، به‌ترتیب دارای پتانسیل گرمایش جهانی حدود ۲۱ و ۳۱۰ برابر بیشتر از دی‌اکسیدکربن هستند (Kery et al., 2014). باکتری‌ها و قارچ‌های بستر پرورش مگس سرباز سیاه، سهم مهمی در تولید گازهای گلخانه‌ای دارند. برای نمونه، در پرورش لارو سوسک خورشیدی^۲ حدود ۹۲/۵٪ از کل تولید دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری شده به تنفس بستر و خوراک نسبت داده شد. نویسندگان احتمال داده‌اند که حضور مقدار زیادی زیست‌توده قارچی در بستر و خوراک، عامل اصلی این سهم بالا بوده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، به‌ظاهر، مقدار تولید گازهای متان و دی‌اکسید نیتروژن توسط حشره‌ها بسیار کمتر از انتشار این گازها توسط دام‌های سنتی است (Oonincx et al., 2010).

برای تولید یک کیلوگرم کرم آرد، مصرف انرژی تنها ۳۳/۶۸ مگاژول و انتشار دی‌اکسیدکربن ۲/۶۵ کیلوگرم گزارش شده است. همچنین، سطح زمین موردنیاز برای تولید این مقدار کرم آرد ۳/۶۵ مترمربع است که در مقایسه با منابع متعارف

تولید پروتئین، مقدار به نسبت اندکی محسوب می‌شود. این رقم با تولید شیر، گوشت مرغ و گاو قابل قیاس نیست. مصرف آب برای تولید کرم آرد خیلی کمتر از مقدار آب مصرفی برای پرورش دام است (Miglietta et al., 2015).

یکی از راه‌های کاهش اثرهای زیست‌محیطی تولید حشره‌ها، استفاده از مواد دورریز، مانند پسماندهای خانگی و کودهای دامی، که به‌عنوان بستر پرورش حشره‌ها است. زیرا این مواد قابلیت بالایی برای تبدیل به زیست‌توده حشره‌ها دارند. خوراک‌های آلوده، چه به روش سنتی و چه صنعتی که برای تغذیه دام و طیور استفاده نمی‌شوند، می‌توانند برای تولید حشره‌ها به کار روند. برای نمونه، غلات آلوده به مایکوتوکسین که مناسب تغذیه دام نیستند، اما مانع رشد برخی از حشره‌ها نمی‌شوند را می‌توان به کار برد، زیرا مایکوتوکسین توسط حشره‌ها تجزیه می‌شود و در فراورده نهایی انباشته نمی‌شوند (Bosch et al., 2017). همچنین، برخی از حشره‌ها زیر تاثیر فلزهای ویژه‌ای که در خوراک‌های آلوده هستند، قرار نمی‌گیرند. مواد آلوده به کادمیوم را می‌توان به عنوان خوراک کرم زرد آرد و مواد آلوده به آرسنیک را برای لاروهای مگس سرباز سیاه به کار برد (Van der Fels-Klerx et al., 2016). از فراورده‌های جانبی یا پسماند کارخانه‌های صنعت‌های غذایی نیز می‌توان به عنوان ترکیب‌هایی در جیره غذایی حشره‌ها استفاده کرد و اثرهای محیط‌زیستی صنعتی را کاهش داد. کود و سایر فراورده‌های حاصل از پرورش حشره‌ها می‌توانند به‌عنوان بستر مناسبی برای گوارش بی‌هوازی و تولید انرژی مورد استفاده قرار گیرند (Bulak et al., 2020). در فرایند گوارش بی‌هوازی، مواد آلی موجود در مدفوع و پسماند حشره‌ها توسط گروه‌های میکروبی تجزیه شده و بخشی از آن به متان تبدیل می‌شود. بر اساس گزارش‌ها، از هر گرم مدفوع لارو مگس سرباز سیاه، جیرجیرک و کرم آرد، ۲۰۸ تا ۲۵۹ میلی‌لیتر متان تولید شده است. با این حال، تفسیر این مقدار باید با توجه به مدت زمان گوارش و پایه اندازه‌گیری، انجام شود. استفاده از بیوگاز حاصل از گوارش بی‌هوازی مدفوع حشره‌ها می‌تواند بخشی از نیاز به سوخت‌های فسیلی را تأمین کرده و در نتیجه، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی را کاهش دهد. افزون بر این، مدفوع حشره‌ها دارای عنصرهای غذایی ضروری گیاه، از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم هستند و از این رو می‌توانند به‌عنوان کود آلی در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند. کاربرد این فراورده‌ها در خاک می‌تواند با افزایش دسترسی به مواد آلی و عنصرهای غذایی، به بهبود فعالیت و زیست‌توده میکروبی خاک کمک کند. همچنین، برخی از میکروارگانیسم‌های مرتبط با دستگاه گوارش حشره‌ها، از جمله باکتریودنت‌ها^۱، باکتری‌های پروتئینی^۲، تریکوسپورون^۳، ژئوتریکوم^۴، پروویدنسیا^۵، آنتروباکتری‌ها^۶ و آکتینوباکتری‌ها^۷ هستند که موجب گوارش دامنه گسترده‌ای از مواد زائد می‌شوند (Zhu et al., 2015). حشره‌هایی مانند سوسک حمام^۸ و باکتری‌های آن‌ها، با راندمان زیاد، اوریک اسید را به اسیدهای آمینه تبدیل می‌کنند (Sabree et al., 2009).

از دیگر سودمندی‌های بهره‌گیری از مدفوع حشره‌ها، مشارکت در فرایند تبدیل زیستی پسماندهای آلی توسط حشره‌ها است که با کاهش حجم پسماند و بازگرداندن مواد مغذی به چرخه زیستی، می‌تواند به پایداری محیط‌زیست کمک کند. تولید کمپوست بی‌هوازی پسماندها، فرایندی هزینه‌بر و زمان‌بر (حدود ۹۰ روز) می‌باشد، اما تبدیل زیستی با حشره‌هایی مانند کرم آرد، لارو مگس سرباز سیاه و لارو مگس خانگی به ترتیب ۳۰ تا ۴۵ روز، ۱۴ تا ۲۵ روز و ۴ تا ۷ روز می‌باشد. همچنین مقدار فسفر، پتاسیم و کلسیم در مدفوع حشره‌ها در تولید زیستی آن‌ها بیشتر است، (Bloukounon-Gubalan, 2019). اگر پرورش حشره‌ها در مقیاس بزرگ و صنعتی انجام شود با تولید حجم زیاد کود

حشره‌ها همراه خواهد بود که استفاده از آن‌ها موجب کاهش مصرف کودهای معدنی، شیمیایی، آفت‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها و تولید پایدار خوراک و غذا خواهد شد.

قانون‌ها

گرچه حشره‌ها منبع مغذی برای برخی از گروه‌های دام و طیور هستند، اما همزمان چالش‌هایی پیش‌روی تولیدکنندگان و تامین‌کنندگان مواد حاصل از حشره‌ها قرار دارد. با توجه به دشواری‌هایی که در زمینه ایمنی مواد غذایی در بریتانیا و اتحادیه اروپا رخ داد، بازنگری کلی بر کنترل ایمنی غذا و خوراک ضروری است. طرح تضمین کیفیت خوراک، مجموعه‌ای از مقررات را برای اطمینان از تولید و تأمین مواد اولیه و خوراک دام ایمن و باکیفیت در برمی‌گیرد. در اتحادیه اروپا، قانون‌هایی در رابطه با بیماری‌های قابل انتقال، ایمنی خوراک و مدیریت فراورده‌های جانبی با منشأ حیوانی، الزام‌های ویژه‌ای را برای تولید و استفاده از پروتئین حشره‌ها تعیین کرده‌اند. این الزام‌ها، به‌ویژه بر منابع تغذیه حشره‌ها، شرایط پرورش و فراوری، بهداشت و ایمنی زیستی و اطمینان از نبود عامل‌های بیمارگر در محصول‌های نهایی تأکید دارند. از این‌رو، رعایت ضابطه‌های بهداشتی و ایمنی خوراک یکی از چالش‌های مهم در توسعه تولید و مصرف پروتئین حشره‌ها به شمار می‌رود. با این حال، مقررات مربوط به حشره‌ها در کشورهای مختلف متفاوت است و نمی‌توان معیار اتحادیه اروپا را به طور مستقیم به شرایط ایران تعمیم داد. در ایران نیز افزون بر ضابطه‌های عمومی مرتبط با بهداشت، ایمنی خوراک و سلامت دام و آذینان و الزام‌های غذای حلال باید در تدوین چارچوب قانونی تولید و مصرف فراورده‌های حاصل از حشره‌ها مورد توجه قرار گیرد (European Commission, 2016; European Commission, 2009; European Commission, 2011). در قانون‌های بریتانیا و اروپا، پروتئین حشره‌ها به‌عنوان پروتئین حیوان‌های فراوری‌شده هستند. پروتئین حیوانی فراوری‌شده، فراورده‌ای است که در اثر گرم کردن، خشک کردن و آسیاب کردن کل یا قسمتی از اندام حیوان‌های خشک‌زی به‌دست می‌آید و چربی آن‌ها تا مقداری استخراج یا به صورت فیزیکی جذب شده است (Kayhani & Rafiei, 2022). محصول‌های حاصل از حشره‌ها که می‌توانند در تغذیه دام، طیور و سایر حیوان‌های پرورشی، از جمله نشخوارکنندگان، مورد استفاده قرار گیرند، شامل فراورده‌های حاوی چربی، پروتئین حشره‌های هیدرولیزشده و ترکیب‌های حاصل از تجزیه پروتئین‌ها، از جمله پلی‌پپتیدها، پپتیدها و اسیدهای آمینه هستند. همچنین، برخی از حشره‌ها و سایر بی‌مهرگان خاک‌زی زنده یا مرده، در صورت رعایت الزام‌های ایمنی و نداشتن اثرهای نامطلوب بر سلامت دام و گیاه، می‌توانند به‌عنوان منابع خوراکی استفاده شوند. در حال حاضر، بریتانیا، قانون‌های خوراک خود را با قانون‌های اتحادیه اروپا همسو کرده است (European Commission, 2001) و پیش‌نویس آئین‌نامه شماره ۹۹۹ مصوب سال ۲۰۰۹ در رابطه با اجازه مصرف فراورده‌های حشره‌ها در خوراک طیور، اجازه محدود مصرف فراورده‌های جانبی خوک در خوراک طیور و عکس آن و همچنین لغو ممانعت مصرف کلاژن نشخوارکنندگان و ژلاتین در خوراک غیرنشخوارکنندگان را در اکتبر سال ۲۰۲۰ منتشر کرده است. در کانادا، تمام مواد خوراکی و ترکیب‌های آن‌ها توسط آژانس بازرسی مواد غذایی بازرسی می‌شوند (Kayhani & Rafiei, 2022). این آژانس در چهارمین قانون‌های خوراک مصوب سال ۱۹۸۳، اجازه مصرف لارو خشک‌شده و حشره کامل را در خوراک جوجه گوشتی صادر کرد. وزارت کشاورزی چین در سال ۲۰۱۳، قانون شماره ۱۷۷۳ از لیست مواد اولیه خوراک را اجرا کرد (MOA, 2012a) که تولید و مصرف مواد اولیه خوراک که در فهرست کاتالوگ مواد اولیه آمده است باید با تمام قانون‌های آورده شده در سندهای استاندارد بهداشتی خوراک و برچسب‌گذاری خوراکی انجام شود. سازمان غذا و دارو در ایالات متحده آمریکا مسئول

کنترل ایمنی مواد غذایی است. براساس قانون سازمان غذا و دارو، افزودن هر ماده به خوراک دام (مستقیم و یا غیرمستقیم) باید با قسمت افزودنی‌های غذایی همخوانی داشته باشد. بر پایه تعریف مواد تشکیل‌دهنده خوراک در نشریه رسمی انجمن مقام‌های کنترل خوراک آمریکا، تنها لارو مگس سرباز سیاه (به صورت خشک‌شده و کنجاله چربی‌زداشده) برای مصرف خوراک دام مجوز دریافت کرده است (Association of American Feed Control Officials, 2020).

اتحادیه اروپا، به‌منظور حفظ سلامت انسان‌ها و حیوان‌ها و افزایش اعتماد مصرف‌کنندگان به تولید مواد غذایی و کنترل بخش ایمنی غذا و خوراک دام، یک بازنگری کلی داشته است. در پایان سال ۲۰۱۹، کمیسیون اروپا قراردادی به‌عنوان پیمان سبز اروپا منتشر کرد و در سال ۲۰۲۰، راهبردی با عنوان از کشتزار تا سفره در رابطه با غذای پایدار منتشر گردید که بخشی از پیمان سبز اروپا را شامل می‌شود، در واقع بیانیه‌ای در رابطه با تغییر قانون‌های مربوط به فرآورده‌های جانبی حیوانی، بازاریابی خوراک و انسفالوپاتی اسفنجی قابل سرایت، صادر کرده است که استفاده از مواد خوراکی پایدار از جمله پروتئین حشره‌ها را حتر شد. با توجه به آنچه گفته شد، هیچ استاندارد تضمینی که تولید حشره‌ها یا تغذیه دام با حشره‌ها را شامل شود، وجود ندارد. سکوی بین‌المللی حشره‌ها^۱ با عنوان ماده غذایی و خوراک، یک شیوه‌نامه یا راهنمای روش‌های بهداشتی را برای تولیدکنندگان حشره‌ها (به عنوان ماده غذایی و خوراک) در اتحادیه اروپا در اختیار تولیدکنندگان قرار داده است.

ایمنی مواد غذایی و آلرژی

اگرچه استفاده از حشره‌ها و فرآورده‌هایشان در غذا و خوراک دام و طیور به‌عنوان منابع جایگزین پروتئین، راهکاری نوین است، درباره ایمنی و ایجاد حساسیت با مصرف محصول‌های غذایی جدید که از حشره‌های خوراکی به دست می‌آیند، به‌ویژه در برخی از کشورها، از جمله ایران، که سابقه‌ای در زمینه مصرف حشره‌ها به‌عنوان غذا ندارند، نگرانی‌هایی وجود دارد. این نگرانی‌ها، خطرهای احتمالی زیستی و شیمیایی که ممکن است با حشره‌های پرورشی همراه باشند را در بر می‌گیرد که عبارتند از گونه حشره، مرحله برداشت، مرحله رشد، حشره‌های فراوری‌نشده و پرورش‌یافته روی بسترهای مختلف، روش تولید به کار گرفته شده و همچنین آلودگی محصول‌های غذایی/خوراکی با باکتری‌های دستگاه گوارش حشره‌ها و عامل‌های بیماری یا انگل‌هایی که ممکن است به سرعت گسترش یابند. از سویی، دانش کافی در مورد فراوری حشره‌ها برای تضمین ایمنی غذا در تولید آن در مقیاس صنعتی وجود ندارد (Schluter et al., 2017). روش‌های بهداشتی و منابع خوراکی ایمن برای تغذیه حشره‌های خوراکی، نقش مهمی در کاهش خطرهای میکروبی خواهند داشت. همچنین، تیمارهای گرمایی مانند جوشاندن، برشته‌کردن یا ترکیبی مناسب از این روش‌ها، همراه با خشک‌کردن و اسیدی‌کردن، می‌توانند با کنترل انتروباکتری‌ها و اندوسپورهای باکتریایی مرتبط با حشره‌ها، در افزایش ماندگاری و تأمین ایمنی حشره‌های خوراکی تأثیر داشته باشند (Klunder et al., 2012). بر اساس گزارش اخیر سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد^۲، قانون‌ها و مقررات ویژه‌ای برای تولید حشره‌ها، ارزیابی‌های خطر و اقدام‌های کنترل کیفی و تجاری‌سازی که از فروش حشره‌ها به عنوان غذا و خوراک پشتیبانی کند، وجود ندارد (FAO, 2021).

1. International Platform of Insects for Food and Feed (IPIFF)

2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

ایمنی میکروبی

حشره‌های (پرورشی یا وحشی) ممکن است به بیمارگرهایی مانند باسیلوس^۱، کامپیلوباکتر^۲، میکروکوکس^۳، آسینتوباکتر^۴، پروتئوس^۵، اشیشیا^۶، سودوموناس^۷، انتروباکتر^۸، استافیلوکوکس^۹، ویروس، قارچ و تک یاخته‌ها آلوده باشند و منشأ آن‌ها می‌تواند ناشی از شرایط غیربهداشتی محیط پرورشی باشد (Klunder et al., 2012). با این حال، به کارگیری روش‌های مؤثر می‌تواند به کنترل و کاهش فعالیت این عامل‌های بیمارگر کمک کند. در طول زنجیره غذایی ایجاد شده با حشره‌های خوراکی، آلودگی پس از فراوری، عامل مهمی در موضوع ایمنی غذایی است و این موضوع بیشتر به حشره‌های آماده مصرف برشته یا سرخ‌شده مربوط است. هرچند که برشته‌کردن و سرخ‌کردن می‌تواند به کاهش بروز بیمارگرها کمک کند، اما در صورت رعایت نکردن بهداشت در زمان بسته‌بندی و نگهداری، ممکن است این محصولات دوباره آلوده شوند. باکتری‌های اندوسپورساز^{۱۰} در حشره‌های خوراکی یک عامل مهمی است، زیرا اسپورها در برابر گرما مقاوم هستند و ممکن است پس از روش‌های متداول گرمایی که اغلب برای حشره‌های خوراکی به کار می‌روند، همچنان فعال باقی بمانند. پسماند این اسپورها که جوانه می‌زنند و تولید سم می‌کنند را می‌توان با روش صحیح خنک‌کردن، پس از عملیات گرمایی در حشره‌های خوراکی فراوری شده، برطرف کرد. گزارشی در مورد وجود اسپورهای باکتریایی از باسیلوس سرئوس^{۱۱} و کلستریدیوم سوردلی^{۱۲} به عنوان آلاینده‌های میکروبی در حشره‌های فراوری‌شده گرمایی که به درستی خنک نشده بودند، وجود دارد (Osimani et al., 2018).

کپک‌ها و قارچ‌زهرها^{۱۳} - یکی از چالش‌های مهم در بحث ایمنی غذایی، انباشت قارچ‌زهرها در بدن حشره‌ها است. قارچ‌زهرها، متابولیت‌های ثانویه‌ای هستند که توسط قارچ‌ها تولید می‌شوند. توانایی جذب، سوخت‌وساز یا دفع قارچ‌زهرها توسط برخی از حشره‌های خوراکی در آزمایش‌های تغذیه با بستر دارای قارچ‌زهرها بررسی شده است. در پژوهشی مشخص شد که حشره‌ها می‌توانند قارچ‌زهرهایی که بیشتر از جنس‌های *Aspergillus*، *Fusarium* و *Penicillium* تولید می‌شوند را متابولیزه کنند (Smith et al., 1994). بنابراین، ارتباط بین حشره‌ها و قارچ‌زهرها یک چالش دو سویی است. از یک سو، تهدیدی برای ایمنی محصول پایانی، و از سوی دیگر فرصتی برای کشف سازوکارهای زیستی حشره‌ها در تجزیه سم‌ها و استفاده از آن‌ها برای پاک‌سازی پسماندها هستند. قارچ‌زهرها ممکن است در بستر تغذیه‌ای که حشره‌های خوراکی در آن پرورش می‌یابند وجود داشته باشند (Schlüter et al., 2017). بنابراین، برخی از حشره‌های خوراکی می‌توانند به دلیل تأثیر حاد و مزمنی که می‌توانند بر سلامت انسان و حیوان داشته باشند (مانند آفلاتوکسین همراه با حشره‌های خوراکی)، از نگرانی‌های مهم ایمنی غذایی باشند.

شرایط فراوری غیربهداشتی، مانند قرارگیری حشره‌ها در محیط باز، خشک‌کردن در برابر آفتاب و عرضه آن‌ها به عنوان غذای خیابانی، می‌تواند موجب رشد کپک‌های تولیدکننده قارچ‌زهرها در حشره‌های خوراکی تازه و خشک‌شده شود. شدت آلودگی آفلاتوکسین در برخی از حشره‌های خوراکی مانند شب‌پره و مورانه، بیش از مقدار مجاز (بیش از ۱۰ میکروگرم در کیلوگرم) است. بنابراین، مدیریت نامناسب در زنجیره محصول‌های حشره‌های خوراکی، به‌ویژه زمانی که به عنوان تنقلات/غذاهای آماده خیابانی مصرف می‌شوند، می‌تواند به ایجاد آفلاتوکسیکوز^{۱۴} کمک کند (Kachapulula et al., 2018). باتوجه به این که چندین گونه حشره در چندین کشور مصرف می‌شوند، خطرها و آلودگی‌های زیستی مانند باکتری‌ها،

1. Bacillus (Bac.)	2. Campylobacter (Camp.)	3. Micrococcus (M.)	4. Acinetobacter (Acin.)
5. Proteus (Pr.)	6. Escherichia (E.)	7. Pseudomonas (Ps.)	8. Enterobacter (Enter.)
9. Staphylococcus (Staph.)		10. Endospore-forming bacterium	
11. Bacillus cereus	12. Clostridium sordellii	13. Mycotoxins	14. Aflatoxicosis

ویروس‌ها، قارچ‌ها، انگل‌ها و همچنین خطرهای شیمیایی از جمله قارچ زهرها، آفت‌کش‌ها، فلزهای سنگین، میکروب‌ها و خطرهای فیزیکی، خطرهای ایمنی ناشی از مصرف حشره‌های خوراکی را دارند (FAO, 2012). خطرهای ایمنی مصرف حشره‌های خوراکی به گونه، محیط پرورش یا روش جمع‌آوری، نوع تغذیه حشره‌ها و روش‌های تولید و فراوری بستگی دارد. ارزیابی خطرهای ایمنی این محصول‌ها می‌تواند در تعیین خط و مشی شیوه‌های بهداشتی و تولیدی خوب و فراوری مناسب برای زنجیره ارزش غذایی (مجموعه مرحله‌ها و فعالیت‌ها از تولید و پرورش حشره، فراوری و نگهداری، بسته‌بندی و توزیع تا عرضه به مصرف‌کننده) حشره‌های پایدار و استاندارد کمک کند و برای تمام بهره‌برداران در طول زنجیره فراورده‌های حشره‌های خوراکی به‌کارگرفته شود (FAO, 2012). برای کاهش خطر آلودگی به آفلاتوکسین‌ها در مواد غذایی با منشأ حشره‌های خوراکی، فراوری گرمایی می‌تواند در کنترل کپک‌های مولد سم مؤثر باشد، اما، آفلاتوکسین‌ها ترکیب‌هایی به نسبت پایدار در برابر گرما هستند و ممکن است هنگام فراوری گرمایی به‌طور کامل تخریب نشوند و در محصول نهایی باقی بمانند. (Bullerman & Bianchini, 2007). بیشینه سطح ایمنی آفلاتوکسین‌های تعیین‌شده توسط اتحادیه اروپا برای مواد غذایی با منشأ گیاهی، ۱۰ تا ۱۵ میکروگرم در کیلوگرم است (Commission Regulation (EC) 1881/2006).

انگل‌ها- با گسترش روز افزون صنعت پرورش حشره‌های خوراکی برای تأمین خوراک دام، طیور و انسان، ایمنی این محصول‌ها به نگرانی اصلی تبدیل شده است. یکی از این نگرانی‌ها، ارتباط بین حشره‌های خوراکی و انگل‌ها است. حشره‌ها، به ویژه در شرایط پرورش غیربهداشتی و متراکم، می‌توانند میزبان یا ناقل انواعی از انگل‌ها باشند. انگل‌های داخلی مانند برخی از نماتودها (کرم‌های لوله‌ای) و پروتوزواها^۱ (تک‌یاخته‌ها) هستند که می‌توانند در دستگاه گوارش یا بافت‌های حشره‌ها زندگی کنند. نماتودها می‌توانند ناقل‌های زیستی تریپانوزومیاز^۲ باشند، که خطر احتمالی در مصرف حشره‌ها است. انگل‌های خارجی مانند کنه‌ها به سطح بدن حشره‌ها می‌چسبند و از آن‌ها تغذیه می‌کنند. این آفت‌ها نه تنها به خود حشره‌ها آسیب می‌زنند، بلکه می‌توانند به‌عنوان ناقل ثانویه عامل‌های بیمارگر نیز عمل کنند. اگر بستر پرورش (مانند پسماندهای کشاورزی) به تخم انگل (مانند تخم نماتود) آلوده باشد، حشره می‌تواند آن را مصرف کند و به میزبان میانی انگل تبدیل شود (Grabowski & Klein, 2017).

نتیجه‌گیری

با توجه به نیازهای تغذیه‌ای، روندهای جمعیتی و شرایط اقلیمی، انتظار می‌رود که توسعه آینده پرورش انبوه حشره‌ها بیش از پیش به سمت تولید منابع غذایی و خوراک دام، به‌ویژه خوراک طیور، حرکت کند. در این رویکرد، تمرکز اصلی بر مقدار زیست‌توده تولیدشده، به‌جای شمار حشره‌ها پرورش‌یافته، خواهد بود. با این وجود، فناوری‌ها و دانش فنی موجود برای تولید انبوه حشره‌ها هنوز در بسیاری از کشورها به اندازه‌ای توسعه نیافته‌اند که بتوانند پاسخگوی تقاضای فزاینده برای محصول‌های حشره‌ها باشند. بسیاری از فناوری‌های مرتبط با پرورش، برداشت، خشک‌کردن، پایدارسازی و فراوری حشره‌ها نیز همچنان ظرفیت چشمگیری برای بهبود و بهینه‌سازی دارند.

در ایران، توسعه پرورش حشره‌ها خوراکی می‌تواند به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین برای تأمین بخشی از نیاز صنعت خوراک طیور به منابع پروتئینی و چربی مورد توجه قرار گیرد. استفاده از گونه‌هایی مانند کرم آرد و مگس سرباز سیاه، به‌ویژه در شرایطی که امکان استفاده از محصول‌های جانبی کشاورزی و صنایع غذایی برای پرورش آن‌ها وجود داشته

باشد، می‌تواند فرصت مناسبی برای ایجاد یک زنجیره ارزش جدید در کشور فراهم کند. با این حال، گزینش گونه مناسب باید بر اساس ضریب تبدیل بستر به زیست‌توده، ترکیب غذایی، ایمنی، قابلیت پرورش در مقیاس صنعتی، هزینه تولید و سازگاری با شرایط اقلیمی ایران انجام شود.

از دیدگاه فراوری، توسعه روش‌های مناسب خشک‌کردن، آسیاب‌کردن، استخراج یا تفکیک پروتئین و چربی و همچنین فراوری گرمایی می‌تواند نقش مهمی در افزایش پایداری، قابلیت گوارش، کیفیت تغذیه‌ای و ایمنی محصول‌های حشره‌ها داشته باشد. در این زمینه، به کنترل خطرهای زیستی و شیمیایی، از جمله آلودگی‌های میکروبی، قارچ زهره‌ها، فلزهای سنگین و سایر آلاینده‌ها، باید هم‌زمان با توسعه فناوری پرورش و فراوری توجه شود.

از نظر کاربرد در صنعت طیور ایران، یکی از مسیرهای پژوهشی مهم، بررسی امکان جایگزینی بخشی از منابع پروتئینی متداول، به‌ویژه کنجاله سویا، با پودر حشره‌ها و ارزیابی اثر آن بر عملکرد رشد، ضریب تبدیل خوراک، سلامت روده، جمعیت میکروبی، کیفیت گوشت و پاسخ ایمنی جوجه‌های گوشتی است. همچنین، بررسی سطح‌های مختلف مصرف، ترکیب حشره‌ها با سایر منابع پروتئینی و گیاهی، اثر فراوری بر ارزش تغذیه‌ای و تعیین سطح بهینه مصرف در سن‌های مختلف طیور می‌تواند زمینه را برای کاربرد عملی این منابع در صنعت خوراک کشور فراهم کند.

در همین راستا، پژوهش انجام‌شده توسط نویسندگان این مقاله ۲۰۲۶ (با تمرکز بر توسعه و ارزیابی مکمل فیتو سین بیوتیک)^۱ رویکردی نوین برای استفاده از کرم آرد در کنار منابع گیاهی و پسماند کارخانه‌های صنایع غذایی سایر ترکیب‌ها در تغذیه جوجه‌های گوشتی ارائه کرده است. این پژوهش با بررسی اثر سطح‌های مختلف مکمل بر عملکرد رشد، کیفیت گوشت، ویژگی‌های لاشه، جمعیت میکروبی روده، شاخص‌های بیوشیمیایی خون، پاسخ ایمنی و ویژگی‌های بافت‌شناختی، ظرفیت این رویکرد را برای توسعه خوراک‌های نوآورانه و چندمنظوره در تغذیه طیور مورد ارزیابی قرار داده است.

در مجموع، توسعه صنعت حشره‌های خوراکی در ایران، در کنار فرصت‌هایی مانند تولید پروتئین جایگزین، استفاده از محصول‌های جانبی کشاورزی و صنایع غذایی، ایجاد ارزش افزوده و حرکت به سوی اقتصاد چرخشی، با چالش‌هایی همچون هزینه اولیه فناوری، نبود استانداردهای جامع، الزام‌های ایمنی، پذیرش مصرف‌کننده، ثبات کیفیت محصول و نبود زیرساخت‌های کافی برای تولید صنعتی روبه‌رو است. بنابراین، آینده این بخش در ایران به همکاری میان دانشگاه‌ها، مراکزهای پژوهشی، صنعت خوراک دام و طیور، بخش کشاورزی و نهادهای تنظیم‌گر وابسته است. انجام پژوهش‌های کاربردی، تدوین استانداردهای ایمنی و کیفی و ارزیابی هم‌زمان جنبه‌های تغذیه‌ای، اقتصادی و زیست‌محیطی می‌تواند مسیر استفاده هدفمند و پایدار از حشره‌ها را در صنعت خوراک طیور ایران هموار سازد.

منابع

- Association of American Feed Control Officials. (2020). *AAFCO Official Publication*. West Lafayette, In: Association of American Feed Control Officials, Inc.
- Al-Khalaifah, H., Ahmad, Z., Ullah, R., Islam, Z., Sultan, A. et al. (2025). Effects of *Tenebrio molitor* and *Zophobas morio* larvae meal supplementation on growth performance, carcass traits, and gut histomorphology in Japanese quails. *Poultry Science*, 104, 105803.
- Bodenheimer, F. S. (1951). *Insects as human food*. Junk Publishers. : A Chapter of the *Ecology of Man*. The Hague, The Netherlands: W. Junk Publishers.

- Bosch, G., Van der Fels-Klerx, H.J., de Rijk, T.C. & Oonincx, D.G.A.B. (2017) Aflatoxin B1 tolerance and accumulation in black soldier fly larvae and yellow mealworms. *Toxins*. 29(6):185.
- Bulak , P., Proc, K., Pawłowska, M., Kasprzycka, A., Berus, W. (2020) Biogas generation from insects breeding post production wastes. *Journal of Cleaner Production*. 244. 118777.
- Bullerman, L.B. & Bianchini, A. (2007). Stability of mycotoxins during food processing. *International Journal of Food Microbiology*, 119(1–2), 140–146.
- Christensen, M., Orech, F., Mungai, M.N., Larsen, T. & Friis, H. (2006) Entomophagy among the Luo of Kenya: a potential mineral source? *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. V 25.
- Cai, M., Ma, S., Hu, R., Tomberlin, J.K., Yu, C. *et al.* (2018). Systematic characterization and proposed pathway of tetracycline degradation in solid waste treatment by *Hermetia illucens* with intestinal microbiota. *Environmental Pollution*, 242, 634–642.
- Commission Regulation (EC) No 1881/2006. (2006). Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. *Official Journal of the European Union*, L 364, 5–24.
- Diener, S., Zurbrugg, C. & Tockner, K. (2015) Bioaccumulation of heavy metals in the black soldier fly, *Hermetia illucens* and effects on its life cycle. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(4), 261-270.
- Ekpo, K.E. & Onigbinde, A.O. (2005) Nutritional potentials of the larva of *Rhynchophorus phoenicis* (F). *Pakistan Journal of Nutrition*. 4(5). 287-290.
- European Commission. (2001). Regulation (EC) No 999/2001 of the European Parliament and of the Council of 22 May 2001 laying down rules for the prevention, control and eradication of certain transmissible spongiform encephalopathies. *Official Journal of the European Communities*, L 147, 1–4.
- European Commission. (2009). Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing Regulation (EC) No 1774/2002. *Official Journal of the European Union*, L 300, 1–33.
- European Commission. (2011). Commission Regulation (EU) No 142/2011 of 25 February 2011 implementing Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption. Retrieved from: <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02011R014220200630&qid=1597757737702&from=EN> (accessed 1 november 2020).
- European Commission (2016) Regulation (EC) 2016/429 on transmissible animal diseases and amending and repealing certain acts in the area of animal health (Animal Health Law Retrieved from: <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02016R042920191214&qid=1597414227373&from=EN> (accessed 1 november 2020)
- Feng, Y., Chen, X.M., Zhao, M., Zhao H., Sun, L. *et al.* (2018). Edible insects in China: Utilization and prospects. *Insect Science*, 25(2), 184-198.
- Feng, M.D. (2013). Complete nutrition content of four species of feeder insects. *Zoo Biology*, 32(1), 27-36.
- Fenke, M. & Oonincx, D.G.A.B. (2017). Nutrition content of insect. In: Van Huis, A. and Tomberlin, J.K. *Insect as Food and From Production to Consumption*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands. P 291-316.
- FAO. (2011). World Livestock 2011: *Livestock in food security*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. Retrieved from: <http://www.fao.org/3/i2373e/i2373e.pdf>.
- FAO/WUR. (2012). Expert consultation meeting: *Assessing the potential of insects as food and feed in assuring food security*. In: Vantomme, P., Mertens, E., van Huis, A., and Klunder, H. (Eds), Summary report, 23–25 January 2012, FAO, Rome. Italy.
- FAO (2021). *Looking at Edible Insects from a Food Safety Perspective*. Challenges and Opportunities for the Sector, Rome. Retrieved from: <https://doi.org/10.4060/cb4094en>.
- Fischer, C.H., Heckmann, L.H., Dahl, M., Hannemann, P. & Wagner Jensen, J. (2018) WICE-waste, *Insect and circular Economy*. Final report under the Econnovation program by the Danish. *Environmental Protection Agency (in Danish)*. Copenhagen, Denmark.

- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C. *et al.* (2013). *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. Retrieved from: <http://www.fao.org/3/a-i3437e.pdf>
- Grabowski, N.T. & Klein, G. (2017). Microbiology of processed edible insect products – Results of a preliminary survey. *International Journal of Food Microbiology*, 243, 103-107.
- Hanboonsong, Y., Jamjanya, T. & Durst, P.B. (2013). Six-legged livestock: Edible insect farming, collecting and marketing in Thailand. RAP Publication 2013/03. Bangkok, Thailand.
- Heckmann, L. & Gligorescu, A. (2019) *Bioconversion of Guldorgsund Municipalitys residual Substrates. Insect Meal*. Report from the Interreg (European Regional Development Fund) project BIOCAS. Aarhus, Denmark.
- Hall, H., Fitches, A. & Smith, R. (2022). *Insects as Animal Feed: New Ingredients for Use in Livestock, Poultry, Aquatic Animals and Pets* (A. Kayhani and H. Rafiei, translators). Tehran: Agricultural Education and Natural Resources Research Institute (TAK)
- Jongema, Y. (2012). *List of Edible Insects' Species of the World*. Wageningen Laboratory of Entomology, Wageningen University, Wageningen.
- Kachapulula, P.W., Akello, J., Bandyopadhyay, R. & Cotty, P.J. (2018). Aflatoxin contamination of dried insects and fish in Zambia. *Journal of Food Protection*, 81, 1508–1518.
- Kim, S. W., J. F. Less, Wang L., Yan T., Kiron. V. *et al.* (2019). Meeting Global Feed Protein Demand: Challenge, Opportunity, and Strategy. *Annual Review of Animal Biosciences*. 7, 221–243.
- Kery, V., Masera, O., Blanford, G., Bruckner, T., Cooke, R. *et al.* (2014). Annex 2 –Metrics and methodology. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona. (eds) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge. University Press. 1281-1328.
- Klunder, H.C., Wolkers-Rooijackers, J., Korpela, J.M. & Nout, M.J.R. (2012). Microbiological aspects of processing and storage of edible insects. *Food Control*, 26(2), 628–631.
- Kouřimská, L. & Adámková. A. (2016) Nutritional and sensory quality of edible insects. *NFS Journal*. 4, 22-26.
- Lähteenmäki-Uutela, A., Marimuthu, S.B. & Meijer. N. (2021). EU legislation on insects as food and feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 715-728.
- Lalander, C., Diener, S., Zurbrugg, C. & Vinneras, B. (2019). Effect of feedstock of larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*). *Journal of Cleaner Production*, 208, 211-219.
- Linder, P. (1919). Extraction of fat from small animals (*Zur Fettgewinnung aus Kleintieren*). *Zootechnica Biologica* 7, 213-220.
- Latunde-Dada, G.O., Yang, W. & Vera Aviles, M. (2016). *In Vitro* Iron availability from Insects and Sirloin Beef. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 64(44), 8420–8424. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b03286>
- Longvah, T., Mangthya, K. & Ramulu, P. (2011). Nutrient composition and protein quality evaluation of eri silkworm (*Samia ricinii*) prepupae and pupae. *Food Chemistry*. 128, (400-403).
- Meyer-Rochow, V.B. (2017). Therapeutic arthropods and other, largely terrestrial, folk-medicinally important invertebrates: a comparative survey and review. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 13, 9. <https://doi.org/10.1186/s13002-017-0136-0>
- Miglietta, P.P., De leo, F., Ruberti, M. & Massari, S. (2015) Mealworms for food: A water footprint perspective. *Water* 7(11), 6190-6203.
- MOA (Chinese Ministry of Agriculture) (2012a) *MOA-1773 Feed Ingredient Catalogue* part III. Chapter 9.
- Mahayri, T.M., JAzek. J.M., Bovera, F., Piccolo, Murgia, G.A. *et al.* (2025). The inclusion of insect meal from *Hermetia illucens* larvae in the diet of laying hens (Hy-line Brown) affects the caecal diversity of methanogenic archaea. *Poultry Science*. 104(5), 105037. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105037>
- Nordentoft, S., Fischer, C., Bjerrum, L., Heckmann, L. H. L. & Halad, B. (2017). Reduction of *Escherichia coli*, *Salmonella enteritidis* and *Campylobacter jejuni* in poultry manure by rearing of *Musca domestica* fly larvae. *Journal of Insect as Food and Feed*, 3, 145-153.

- Osimani, A., Milanović, V., Garofalo, C., Cardinali, F., Roncolini, A. *et al.* (2018) Revealing the microbiota of marketed edible insects through PCR-DGGE, metagenomic sequencing and real-time PCR. *International Journal of Food Microbiology*, 276, 54–62.
- Oonincx, D.G. (2015). *Insect as food and feed: Nutrient composition and environmental impact*. PhD thesis. Wageningen the Netherlands.
- Oonincx, D.G., Van Isterbeek, J., Heetkamp, M., Van den Brand M.J., *et al.* (2010). An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. *PLOS ONE* 5(12), e14445.
- Poore, J. & Nemecek, T. (2018). Reducing foods environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992.
- Proc, K., Bulak, P., D. & Bieganski, A. (2020). *Hermetia illucens* exhibits bioaccumulative potential for 15 different elements-implication for feed and food production. *Science of the Total Environment* 723, 138125.
- Paul, A., Frederich, M., Megido, R.S. & Alabi, T. (2017). Insect fatty acids: A comparison of lipids from three Orthopterans and *Tenebrio molitor* L. larvae. *Journal of Asia-Pacific Entomology*. 20, 337-340.
- Ramos-Elorduy, J. (2009). Anthro-po-entomophagy: Cultures, evolution and sustainability. *Entomological Research*, 39(5), 271-288.
- Rumpold, B.A. & Schlüter, O.K. (2013). Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Molecular Nutrition & Food Research*, 57(5), 802-823.
- Rathore, A.S. & Gupta, R.D. (2015) Chitinases from bacteria to human: Properties, applications, and future perspectives. *Hindawi Publishing Corporation Enzyme Research*. Volume 2015, Article ID 791907, 8 p.
- Smith, J.E., Lewis, C.W., Anderson, J.G. & Solomons, G.L. (1994). *Mycotoxins in Human Nutrition and Health*. EEC, Luxembourg, 22.
- Schlüter, O., Rumpold, B., Holzhauser, T., Roth, A., Vogel, R.F. *et al.* (2017). Safety aspects of the production of foods and food ingredients from insects. *Molecular Nutrition and Food Research*, 61(6), 1600520.
- Sandra G.F. & Bukkens. (2005). Insects in the Human Diet: Nutritional Aspects. In: *Ecological Implications of Minilivestock: Potential of insects, rodents, frogs and snails*. pp. 545–577. Science Publishers, India.
- Sabreea, Z.L., Kambhampati, S. & Moran, N.A. (2009). Nitrogen recycling and nutritional provisioning by *Blattabacterium*, the cockroach endosymbiont. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106(46), 19521-19526.
- Schmitt, Belghit, I., Johansen, J. & Leushuis, R. (2019). Growth and safety assessment of feed streams for black soldier fly larvae: a case study with aquaculture sludge. *Animal*, 9(4), 189.
- Salehizadeh, A., Torki, M., Darbemamieh, M. & Sharifi, S.D. (2025). Diet inclusion of housefly larvae and frass supplemented by Rayabold (enzyme and probiotic) on performance of laying hens and egg quality. *Poultry Science*, 104(10), 105544.
- Schlink, A.C., Nguyen, M.L. & Viljoen, G.J. (2010). Water requirements for livestock production: A global perspective. *OIE Scientific and Technical Review*, 29(3), 603–60.
- Talaei, B., Alizadeh, I., Aghaei Afshar, A., Seyedi, F. & Gorouhi, M. A. (2022). Status of edible insects as an alternative source of food in Iran: A review. *Journal of Entomological Research*, 46(2), 420–427.
- Van Deb Bos Verma, M., de Vreede, L., Achterbosch, T. & Rutten, M.M. (2020). Consumers discard a lot more food than widely believed: Estimates of global food waste using an energy gap approach and affluence elasticity of food waste. *PLoS ONE*, 15(2), 1-14.
- Van Huis, A. (2013). Potential of insects as food and feed. *Annual Review of Entomology*, 58, 563-583.
- Van Huis, A. (2016). *Edible insects are the future?* The Nutrition Society Summer Meeting 2015 held at University of Nottingham, Nottingham on 6–9 July 2015.
- van den Bosch, T.J.M. & Welte, C.U. (2017). Detoxifying symbionts in agriculturally important pest insects. *Microbial Biotechnology*, 10(3), 531–540.
- Van der Fels-Klex, H.J., Camenzuli, L., Van der lee, M.K. & Ooneincx, D.G.A.B. (2016) Uptake of cadmium, lead and arsenic by *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* from contaminated substrates. *PLoS ONE*, 11(11), e0166186.

- Van Huis, J. van Itterbeeck, H. Klunder, E. Mertens, A. Halloran, G. Muir, P. (2013) *Edible insects: future prospects for food and feed security*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Retrieved from: <http://www.fao.org/docrep/018/i3253e/i3253e.pdf>
- Vercruysse, L., Van Camp, J. & Samggheace, G. (2005) Inhibitory peptides derived from enzymatic hydrolysates of animal muscle protein: A Review. *Agriculture and Food Chemistry*. 53, 8106–8115.
- van Huis, A. (2020). Insects as food and feed, a new emerging agricultural sector. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(1), 27–44.
- Wen, L.F. & He, J.G. (2012). Dose-response effects of an antimicrobial peptide, a cecropin hybrid, on growth performance, nutrition utilization, bacterial counts in the digesta and intestinal morphology in broilers. *British Journal of Nutrition*, 108(10), 1756-1763.
- Wu, S., Zhang, F., Huang, Z., Liu, H. & Xie, C. (2012). Effects of the antimicrobial peptide cecropin AD on performance and intestinal health in weaned piglets challenged with *Escherchia coli*. *Peptides*, 35(2), 225-230.
- Wu, Q., Patocka, J. & Kuca. (2018). Insect antimicrobial peptides, amini review. *Toxins*, 10(11), 1-17.
- Zhu, F., Yao, Y., Wang, S., Du, R., Wang, W. *et al.* (2015). Housefly maggot-treated composting as sustainable option for pig manure management. *Waste Management*, 35. 62–67.

An Innovative Approach to Sustainable Poultry Nutrition and the Circular Economy through the Use of Edible Insects

Molae Parvare, M.¹, Zahraei Ramazani, A.R., Sharifi, S.D. and Sofei Zadeh, M.²

The rapid growth of the global population, escalating environmental concerns, and increasing limitations in conventional protein sources have intensified the need to identify alternative and sustainable feed resources for livestock and poultry. The poultry industry is a key sector within the agricultural subsector, and the volume of investment in Iran's poultry industry is second only to the oil and petrochemical industry. Supplying poultry feed is considered part of the country's food security. Given the current conditions, one of the most significant problems facing the country's poultry industry is the shortage of necessary feed resources. Currently, one of the most pressing challenges faced by the poultry industry is the shortage and rising cost of essential feed ingredients such as soybean meal and corn, which may further limit producers' access in the near future. Edible insects have emerged as an innovative option due to their high protein content, essential amino acids, beneficial fatty acids, and the ability to be produced on an industrial scale with a low environmental footprint. Incorporating insects into poultry diets can not only improve growth performance, immune function, and product quality but also support circular economy principles by converting organic waste into high-value biomass, thereby reducing environmental pollution. Despite these advantages, several challenges remain, including the need for standardized production protocols, assurance of microbial and chemical safety, consumer acceptance, and compliance with regulatory frameworks. This review article examines the nutritional potential, environmental and economic benefits, and existing challenges associated with edible insects, highlighting their role as a green and sustainable strategy for the poultry industry within the framework of a circular economy.

Key words: Circular economy, Edible insects, Nutritional value, Poultry feed.

1. Corresponding author's Email: azahraei@tums.ac.ir

2. Postdoctoral Researcher of Tehran University of Medical Sciences, Professor of Tehran University of Medical Sciences, Professor of University of Tehran, Tehran and Associate Professor of Urmia University, Urmia, respectively.