



Black Soldier Fly: A Novel Solution for Organic Waste Recycling, Alternative Protein Production, and Food Security

Emad Changizia*

Department of Pathobiology, Faculty of Veterinary Medicine, Semnan University, Semnan, Iran.

*Corresponding Author: echangizi@semnan.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0001-7120-0833>

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/08/06
Received in revised form:
2026/08/12
Accepted 2026/09/06
Available online: 2026/09/22

Keywords:
Circular economy,
Food security,
Alternative protein,
Waste management,
Black soldier fly.

The escalating production of organic waste, the rapidly growing demand for protein for both human consumption and animal feed, and the intensifying pressure on water resources, soil, and conventional agricultural inputs have collectively underscored the urgent need for the development of low-input, biological solutions. In this regard, the black soldier fly (*Hermetia illucens*) has attracted considerable attention in recent years owing to its relatively short life cycle, its capacity to consume a wide spectrum of organic materials, and its ability to convert a significant fraction of these substrates into insect biomass. The larvae of this species are capable of transforming food waste and various organic streams into biomass that is exceptionally rich in protein and lipids, while simultaneously generating a valuable by-product known as frass. The present review examines the potential of black soldier fly-based technology, focusing on its biology and life cycle, rearing conditions, the distinction between open and closed systems, substrate and feed management, the range of harvestable products, and the insect's role within the circular bioeconomy. Furthermore, it discusses the applications of larval meal, oil, frass, and compounds such as chitin and chitosan, together with the opportunities and limitations of their utilisation in animal feed, aquaculture, agriculture, and biotechnology. Within the conceptual framework derived from current research, the black soldier fly should not be viewed exclusively as a waste management tool; rather, it can be conceived as an intrinsic element of a closed-loop system wherein waste is transformed into biomass and subsequently into feed, fertiliser, and other high-value products. However, factors including substrate safety, consistency in feed composition, production costs, standardisation, regulatory frameworks, pathogen control, and market acceptance constitute the most critical obstacles to the industrial-scale deployment of this technology. In Iran, establishing clear standards, advancing indigenous technical expertise, creating sustainable supply chains, and conducting research adapted to the local climate and socio-economic context can facilitate the responsible expansion of this nascent industry.

Cite this article: Changizi, E. (2026). Black Soldier Fly: A Novel Solution for Organic Waste Recycling, Alternative Protein Production, and Food Security. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(2), 85-96. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.595701.1020>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.595701.1020>

Introduction

The rapid growth of population, urbanisation, and changing consumption patterns has substantially increased the generation of organic waste and intensified concerns regarding waste management, resource depletion, and food security. At the same time, the increasing demand for protein-rich feed ingredients has placed considerable pressure on conventional sources such as soybean meal and fishmeal. The production of these resources is associated with environmental challenges, including deforestation, overfishing, high water consumption, and greenhouse gas emissions. Consequently, increasing attention has been directed toward alternative protein sources that can simultaneously contribute to organic waste valorisation and resource recovery. Among emerging biological technologies, the black soldier fly (BSF), *Hermetia illucens*, has received considerable attention because of its high capacity to convert diverse organic substrates into valuable biomass. BSF larvae can consume food waste, agricultural residues, and manure and convert them into protein- and lipid-rich biomass, while the remaining frass can be used as a nutrient-rich agricultural amendment. This characteristic makes BSF particularly relevant to circular economy and sustainable agriculture approaches. In addition to larval meal, BSF production can provide oil, frass, chitin, chitosan, and bioactive compounds with potential applications in animal feed, agriculture, industry, and biotechnology. Although BSF technology has progressed considerably at the global level, its development in Iran remains constrained by technical, regulatory, economic, and market-related challenges. Therefore, this study aimed to review the biological characteristics, rearing requirements, production systems, products and applications, circular-economy potential, and major opportunities and limitations associated with BSF production, with particular emphasis on its prospects for development in Iran.

Method

A descriptive and analytical review was conducted on the biology, production, applications, sustainability, and development prospects of *H. illucens*. The available evidence was synthesised thematically according to major components of the BSF production chain. The review considered the biological and developmental characteristics of BSF, environmental and operational requirements including temperature, humidity, substrate properties, moisture, and larval density, and differences between open and closed production systems in terms of environmental control, investment, biosecurity, and scalability. Major products, including larval protein meal, oil, frass, chitin, chitosan, and bioactive compounds, were examined alongside their potential applications. The circular-economy potential of BSF was assessed through organic-residue conversion, feed production, and nutrient recycling. Finally, opportunities and limitations for BSF development in Iran were reviewed, including substrate availability, dependence on imported feed ingredients, research activities, emerging businesses, regulatory conditions, technical capacity, product safety, and market barriers.

Results

The review demonstrated that BSF has considerable potential to integrate organic waste valorisation with alternative protein production. Successful production depends strongly on environmental and nutritional conditions. Under favourable conditions, particularly temperatures of approximately 27–32°C and relative humidity of 60–80%, eggs hatch within 3–4 days and larvae can reach harvestable size within approximately 14–21 days. Substrate characteristics strongly influence larval growth, biomass yield, and product quality. A moisture content of approximately 60–70% is generally suitable for larval development, while substrate composition affects biomass composition; protein-rich substrates may support growth, whereas starch-rich substrates can promote lipid accumulation. Appropriate feeding and larval-density management are therefore essential to avoid anaerobic conditions, odour generation, and

reduced productivity. Production systems differ according to scale and resource availability. Open systems generally require lower investment and may be suitable for small-scale or rural applications, but limited environmental and biosecurity control can reduce consistency and scalability. Closed systems require greater investment but allow better control of temperature, humidity, lighting, feeding, and harvesting, making them more suitable for standardised and industrial production. Automation of feeding, environmental control, and harvesting may further improve efficiency and consistency.

BSF biomass has multiple potential applications. Depending on substrate and processing conditions, dried larvae may contain approximately 40–45% protein and 15–25% fat, with a useful amino acid profile. This supports their potential as a partial alternative to conventional protein sources, particularly fishmeal, in aquaculture and poultry feed. BSF oil, characterised by its high lauric acid content, has potential applications in feed, biodiesel, and cosmetics. Frass contains nutrients and organic matter and may contribute to soil fertility and plant growth; however, its commercial use requires control of composition and microbiological safety. Chitin and chitosan obtained from larval cuticles also have potential applications in agriculture, medicine, drug delivery, and biodegradable materials. Bioactive compounds, including antimicrobial peptides, represent additional opportunities, although further safety and efficacy studies are required. BSF production is closely aligned with circular-economy principles because it converts organic residues into protein and lipid biomass while returning nutrients to agricultural systems through frass. Nevertheless, environmental and economic benefits are context-dependent and may be affected by energy and water consumption, transportation, substrate preparation, drying, and processing. Life-cycle and economic assessments are therefore necessary to evaluate sustainability under specific conditions.

In Iran, the availability of agricultural, food, and municipal organic residues and dependence on imported protein feed ingredients provide opportunities for BSF development. Iranian universities have increasingly investigated local substrates, larval growth, and nutritional characteristics, while emerging businesses and pilot projects have explored training, farm design, equipment, and insect production. However, wider adoption is limited by the absence of comprehensive national standards and clearly defined regulations for insect production, substrate use, and feed applications. Limited technical knowledge, inadequate training and extension services, uncertain market demand, and economic competitiveness also remain important constraints. Product safety requires particular attention because unsuitable substrates may introduce heavy metals, mycotoxins, pharmaceutical residues, or pathogens, while variations in substrate, larval age, and processing can result in inconsistent product quality.

Conclusions

BSF technology offers an integrated approach to organic waste valorisation, alternative protein production, and nutrient recycling within a circular bioeconomy. Its ability to convert diverse organic residues into protein- and lipid-rich biomass, together with valuable products such as frass, oil, chitin, and chitosan, creates opportunities for agricultural and industrial applications. In Iran, abundant organic residues and the need for alternative domestic feed ingredients provide a basis for further development. However, technological potential alone is insufficient for industrial adoption. National standards, clear regulatory frameworks, improved technical and extension capacities, pilot and demonstration facilities, and context-specific economic and life-cycle assessments are required. Future research should prioritise production optimisation, automation, selective breeding, substrate safety, product standardisation, and integration with waste-management systems. Collaboration among researchers, industry, policymakers, and standard-setting organisations will be essential for developing a safe, economically viable, and sustainable BSF sector in Iran.



مگس سرباز سیاه: راهکاری نوین برای بازیافت پسماندهای آلی، تولید پروتئین جایگزین و امنیت غذایی

عماد چنگیزی^{a*}

^aگروه پاتوبیولوژی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

*نویسنده مسئول: echangizi@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	امروزه با رشد سریع تکنولوژی، به خصوص یادگیری عمیق، اهمیت به کارگیری روش های نوین بیش از پیش آشکار شده است. مسائل محیط زیستی همچون مدیریت پسماند نیز نیازمند رویکردهای جدید و هوشمند است تا باعث کاهش هزینه ها، تسريع در انجام امور و کاهش خطای انسانی شود. طبقه بندی پسماند، به عنوان یکی از جنبه های اساسی و مهم در مدیریت و بازیافت پسماند، محور اصلی این پژوهش است. در این پژوهش با آموزش دو مدل یادگیری عمیق بر روی تصاویر مجموعه ی Realwaste که حدود ۴۲۰۰ تصویر از دسته های پسماندهای فلزی، پسماندهای شیشه ای، پسماندهای کاغذی، پسماندهای مقوایی، پسماندهای آلی غذایی، پسماندهای پلاستیکی، پسماندهای گیاهی و پسماندهای نساجی/پارچه ای هستند، در مسیر تفکیک هوشمند پسماند گام برداشته شده است. مدل های حاصل از این پژوهش تک برچسبی و چند برچسبی هستند. مدل پایه از معماری EfficientNetB0 بهره گرفته، اما با روش انتقال یادگیری، متناسب با مسئله ی خاص این پژوهش، بازطراحی و آموزش داده شده است. به منظور افزایش تنوع داده ها، تکنیک های افزایش مصنوعی داده ها مانند چرخش، تغییر نور و ترکیب تصاویر با روش های CutMix و MixUp به کار گرفته شد. همچنین برای مقابله با عدم توازن داده ها، وزن دهی کلاس ها بر اساس فراوانی هر کلاس محاسبه گردید. داده های آموزش و اعتبارسنجی با نسبت ۷۰ به ۳۰ درصد تقسیم شدند و برنامه نویسی به زبان پایتون در محیط Visual Studio Code با استفاده از کتابخانه های Scikit-learn و TensorFlow انجام گرفت. نتایج آزمون های تجربی نشان دادند هر دو مدل در تفکیک هوشمند تصاویر پسماند عملکرد خوبی دارند. مدل تک برچسبی در تصاویر با یک نوع پسماند گاهی اطمینان بالاتری در تشخیص دسته ی صحیح ارائه داد اما مدل چند برچسبی که بیش برآزش کنترل شده تری در حین آموزش داشت، در مجموع عملکرد بهتری ارائه کرد؛ متوسط اطمینان مدل چند برچسبی در تشخیص دسته ی صحیح در آزمون تجربی برابر با ۰/۸۷۵ نیز از متوسط اطمینان مدل تک برچسبی در تشخیص دسته ی صحیح برابر با ۰/۸۵۵ بیشتر بود. در تحلیل تصویر نامرتبط به پسماند نیز مدل چند برچسبی با اطمینان کمتر از ۰/۲۵ از مدل تک برچسبی با اطمینان ۰/۲۹ خطای کمتری داشت. در آزمون تجربی تحلیل تصاویر با حضور هم زمان چند نوع پسماند، مشخص شد معماری EfficientNet، به اندازه ی تحلیل تصاویر با حضور یک نوع پسماند، قابل اعتماد نیست.

استناد به این مقاله: عماد، چنگیزی (۱۴۰۵). مگس سرباز سیاه: راهکاری نوین برای بازیافت پسماندهای آلی، تولید پروتئین جایگزین و امنیت غذایی. راهبردهای

علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۲(۲)، ۹۶-۸۵. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.595701.1020>



© نویسندگان

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.595701.1020>

مقدمه

جهان امروز با بحران‌های جدی در زمینه تولید پسماند و امنیت غذایی روبه‌رو است. سالانه مقادیر انبوهی از مواد غذایی، ضایعات کشاورزی و کودهای دامی تولید می‌شوند که افزون بر ایجاد چالش‌های فراوان در زمینه دفع، نقش بسزایی در افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و افزایش مصرف مواد غذایی، به‌طور همزمان دو چالش اساسی را تشدید کرده‌اند: از یک‌سو، بر حجم جریان‌های پسماند آلی افزوده شده و از دیگر سو، تقاضا برای منابع پروتئینی فزونی یافته است. تولید دام، طیور و آبزیان به نهاده‌هایی همچون کنجاله سویا و پودر ماهی وابسته است که تأمین آن‌ها معمولاً با مصرف گسترده زمین و آب، تغییر کاربری اراضی و فشار بر ذخایر طبیعی همراه است. منابع پروتئینی مرسوم با محدودیت‌های جدی مواجه‌اند و بهره‌برداری از آن‌ها با چالش‌های زیست‌محیطی نظیر جنگل‌زدایی، صید بی‌رویه و تغییرات اقلیمی گره خورده است (FAO, 2013; Van Huis, 2013; Alfarano et al., 2026).

از این‌رو، توسعه منابع پروتئینی جایگزین و به‌کارگیری روش‌هایی که بتوانند مواد آلی کم‌ارزش را به محصولاتی با ارزش افزوده تبدیل کنند، به‌عنوان بخشی از راهبردهای نوین پایداری مورد توجه قرار گرفته‌اند. پیش‌بینی می‌شود جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ از مرز ۹/۷ میلیارد نفر فراتر رود و این امر فشارهای مضاعفی بر سیستم‌های غذایی، زنجیره‌های تأمین پروتئین و مدیریت پسماند وارد خواهد ساخت. در این میان، حشرات به‌دلیل نیاز نسبتاً محدود به فضا و توانایی بهره‌گیری از برخی جریان‌های آلی، به‌عنوان یکی از گزینه‌های مورد بررسی مطرح شده‌اند (Mei et al., 2024; Putri et al., 2026).

در میان گونه‌های مطالعه‌شده، لارو مگس سرباز سیاه (*Hermetia illucens*) از خانواده Stratiomyidae از جایگاهی ویژه برخوردار است؛ چنان‌که مرحله لاروی آن مهم‌ترین دوره از نظر مصرف بستر و تولید زیست‌توده محسوب می‌شود. یافته‌های مروری و پژوهشی نشان داده‌اند که لاروهای این گونه قادرند طیف گسترده‌ای از مواد آلی را مصرف کرده و بخش قابل‌توجهی از مواد مغذی آن‌ها را در زیست‌توده خود ذخیره کنند (Wang & Shelomi, 2017; Singh & Kumari, 2019; Baptista da Silva et al., 2026).

با این حال، توانایی زیست‌تبدیل بالای مگس سرباز سیاه به معنای مناسب بودن هر نوع پسماند برای تولید خوراک نیست. نوع بستر، آلودگی‌های شیمیایی و میکروبی، کیفیت تغذیه‌ای، میزان رطوبت و شرایط فرآوری، همگی عواملی هستند که می‌توانند بر رشد لارو و ایمنی محصول نهایی تأثیر بگذارند. از این‌رو، توسعه صنعت مبتنی بر مگس سرباز سیاه باید هم‌زمان بر دو محور کارایی زیستی و نظام کنترل کیفیت و ایمنی استوار باشد (Camperio et al., 2026; European Commission, 2021).

در ایران نیز مگس سرباز سیاه موضوع پایان‌نامه‌ها و طرح‌های پژوهشی متعددی در دانشگاه‌ها و مراکز علمی، از جمله دانشگاه‌های گیلان، تهران و تربیت مدرس و مراکز پژوهشی وابسته به وزارت جهاد کشاورزی، بوده است. محور اصلی این مطالعات، بررسی تأثیر پسماندهای آلی موجود در کشور، از جمله ضایعات برنج، تفاله‌های صنایع غذایی و کودهای دامی، بر سرعت رشد و میزان چربی و پروتئین لاروها بوده است. بررسی روند تولید مقالات علمی در ارتباط با مگس سرباز سیاه نیز نشان‌دهنده افزایش چشمگیر توجه پژوهشی به این گونه در سطح جهان و ایران است. این حوزه که پیش از سال ۲۰۱۰ موضوعی نسبتاً محدود بود، طی سال‌های اخیر به یکی از موضوعات مورد توجه در علوم کشاورزی، محیط‌زیست و بیوتکنولوژی تبدیل شده است. در ایران نیز مطالعات مربوط به *H. illucens* در رشته‌هایی مانند حشره‌شناسی کشاورزی، تغذیه دام و طیور، مهندسی محیط‌زیست و بیوتکنولوژی گسترش یافته است.

در کنار فعالیت‌های دانشگاهی، شرکت‌های دانش‌بنیان، استارت‌آپ‌ها و مجموعه‌های تخصصی نیز در زمینه‌هایی مانند آموزش، طراحی خطوط تولید، راه‌اندازی مزرعه، تأمین تجهیزات و تولید تخم و لارو فعالیت می‌کنند. همچنین برخی پروژه‌های مدیریت پسماند شهری در مناطقی از کشور، از جمله خراسان شمالی و بجنورد، به استفاده از مگس سرباز سیاه برای تبدیل بخشی از ضایعات و پسماندهای آلی به محصولات قابل استفاده پرداخته‌اند.

با توجه به گسترش مطالعات علمی و فعالیت‌های تجاری، بررسی جامع زیست‌شناسی، نیازهای پرورشی، محصولات، کاربردها، ظرفیت اقتصاد چرخشی و چالش‌های توسعه این فناوری در ایران ضروری است. بنابراین، هدف این مطالعه بررسی ویژگی‌های زیستی و چرخه زندگی مگس سرباز سیاه، شرایط محیطی و مدیریت پرورش، سیستم‌های تولید، ارزش تغذیه‌ای و فرآورده‌های حاصل، نقش آن در اقتصاد زیستی چرخشی، الزامات ایمنی و کیفیت و در نهایت فرصت‌ها و چالش‌های توسعه این فناوری در ایران است.

روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه به صورت یک مرور توصیفی — تحلیلی انجام شد و شواهد موجود درباره زیست‌شناسی، پرورش، تغذیه، فرآوری، کاربردها، ایمنی، پایداری و ظرفیت توسعه‌ای مگس سرباز سیاه مورد بررسی و تلفیق قرار گرفت. اطلاعات گردآوری‌شده بر اساس محورهای اصلی زنجیره تولید BSF دسته‌بندی شد.

در بخش زیست‌شناسی، مطالعات مربوط به چرخه زندگی، مراحل تخم، لارو، پیش‌شفیره، شفیره و حشره بالغ و عوامل مؤثر بر رشد و بقا بررسی شدند. سپس نیازهای محیطی و مدیریتی شامل دما، رطوبت، نور، ویژگی‌های بستر، میزان رطوبت بستر، تغذیه و تراکم لارو مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، سیستم‌های پرورش باز و بسته از نظر میزان کنترل شرایط محیطی، نیاز به سرمایه‌گذاری، امنیت زیستی، قابلیت تکرارپذیری و امکان توسعه در مقیاس صنعتی مقایسه شدند. فرآورده‌های اصلی حاصل از پرورش BSF شامل زیست‌توده لاروی و پودر پروتئینی، روغن، فرس، کیتین، کیتوزان و ترکیبات زیست‌فعال نیز از نظر ویژگی‌ها و کاربردهای بالقوه بررسی شدند.

در ادامه، ظرفیت مگس سرباز سیاه در اقتصاد زیستی چرخشی از طریق تبدیل پسماندهای آلی به زیست‌توده حشره‌ای و بازگرداندن مواد مغذی به سامانه‌های کشاورزی ارزیابی شد. موضوعات مرتبط با ایمنی بستر و محصول، آلودگی‌های شیمیایی و میکروبی، استانداردسازی و محدودیت‌های اقتصادی و فنی نیز مورد توجه قرار گرفتند. در نهایت، شواهد مرتبط با وضعیت ایران، شامل فعالیت‌های پژوهشی، ظرفیت پسماندهای آلی، وابستگی به نهاده‌های پروتئینی وارداتی، فعالیت کسب‌وکارهای نوپا، پروژه‌های آزمایشی، محدودیت‌های فنی، اقتصادی و نظارتی و نیازهای پژوهشی آینده، به صورت جداگانه بررسی و تلفیق شد.

یافته‌ها و بحث

زیست‌شناسی و چرخه زندگی مگس سرباز سیاه

Hermetia illucens حشره‌ای با دگردیسی کامل است و چرخه زندگی آن شامل چهار مرحله تخم، لارو، پیش‌شفیره/شفیره و حشره بالغ می‌شود. طول این چرخه تحت تأثیر دما، رطوبت، رژیم غذایی و سایر عوامل محیطی تغییر می‌کند. اهمیت صنعتی این گونه عمدتاً به مرحله لاروی بازمی‌گردد، زیرا لاروها با تغذیه فعال، زیست‌توده قابل برداشت تولید می‌کنند (Tomberlin et al., 2002; Diener et al., 2009).

این گونه از نظر فیزیولوژیکی و اکولوژیکی سازگاری بالایی دارد و برخلاف بسیاری از مگس‌ها، حشره بالغ آن فاقد قطعات دهانی کارآمد برای تغذیه از مواد جامد است. مگس سرباز سیاه بومی مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری قاره

آمریکا است، اما امروزه در بسیاری از مناطق گرم، معتدل و استوایی جهان مستقر شده است (Wang & Shelomi, 2017; Traore et al., 2024).

مرحله تخم

حشره بالغ ماده معمولاً تخم‌های خود را در شکاف‌ها و سطوح خشک و در مجاورت منابع مواد آلی قرار می‌دهد و مستقیماً درون بسترهای بسیار مرطوب تخم‌گذاری نمی‌کند. ماده‌ها پس از جفت‌گیری می‌توانند دسته‌هایی شامل حدود ۲۰۰ تا ۹۰۰ تخم کوچک و بیضی‌شکل تولید کنند. این رفتار امکان استفاده از تله‌های تخم‌گذاری را در سامانه‌های پرورش کنترل‌شده فراهم می‌کند. در شرایط مناسب، تخم‌ها معمولاً طی ۳ تا ۴ روز تفریخ می‌شوند (Klüber et al., 2024).

مرحله لاروی

مرحله لاروی مهم‌ترین بخش چرخه از دیدگاه تولید صنعتی است. لاروها در شش سن لاروی رشد می‌کنند و با مصرف مواد آلی، بخشی از پروتئین، چربی و سایر مواد مغذی را در بدن خود ذخیره می‌کنند. ترکیب غذایی لارو به گونه، سن، نوع بستر و روش فرآوری وابسته است و نمی‌توان مقدار ثابتی را برای تمام جمعیت‌های پرورشی در نظر گرفت. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که لارو BSF از نظر پروتئین و چربی ظرفیت مناسبی برای استفاده به‌عنوان ماده اولیه خوراک دارد (Lu et al., 2022). لاروها قادرند طیف وسیعی از پسماندهای تر، برخی فضولات دامی و بقایای گیاهی را مصرف کنند. کوتیکول لارو نیز حاوی مقادیر قابل توجهی کیتین و مواد معدنی است و نقش حفاظتی دارد.

پیش‌شفیره و شفیره

پس از پایان تغذیه فعال، لارو وارد مرحله پیش‌شفیری می‌شود. حرکت پیش‌شفیره‌ها به سمت محیط‌های خشک‌تر امکان استفاده از رفتار طبیعی آن‌ها را برای برداشت خودکار فراهم می‌کند. در سامانه‌های صنعتی، رمپ‌ها و سازوکارهای خودبرداشت از این رفتار استفاده می‌کنند. مرحله شفیری حدود یک تا دو هفته طول می‌کشد و طی آن ساختار بدن حشره بالغ شکل می‌گیرد (Sheppard et al., 2002; Fawzy et al., 2026).

حشره بالغ

حشره بالغ عمدتاً برای تولیدمثل اهمیت دارد و انرژی مورد نیاز آن تا حد زیادی از ذخایری تأمین می‌شود که در مرحله لاروی ایجاد شده‌اند. بالغ‌ها از مواد جامد تغذیه نمی‌کنند و عمدتاً آب یا شهد دریافت می‌کنند. طول عمر حشرات بالغ معمولاً کوتاه است و جفت‌گیری آن‌ها به شرایط نوری مناسب وابسته است. مطالعات نشان داده‌اند که کیفیت و طیف نور می‌تواند بر موفقیت جفت‌گیری تأثیر بگذارد (Liu et al., 2020; Zulkifli et al., 2022). از این رو، مدیریت بخش مولد در سیستم‌های صنعتی به اندازه مدیریت مرحله لاروی اهمیت دارد.

شرایط محیطی و مدیریت پرورش

دما و رطوبت

دما یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده سرعت رشد و طول چرخه زندگی BSF است. محدوده‌های حدود ۲۷ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد برای رشد و نمو مناسب گزارش شده‌اند. دماهای پایین‌تر می‌توانند چرخه زندگی را طولانی کنند، درحالی‌که دماهای بسیار بالا ممکن است موجب افزایش تلفات شوند. پاسخ حشره به دما به سن، رژیم غذایی و سایر شرایط محیطی وابسته است و بنابراین نباید یک مقدار ثابت را برای تمام مراحل رشد به‌عنوان مقدار مطلق توصیه کرد (Diener et al., 2009; Harnden & Tomberlin, 2016).

رطوبت نسبی نیز نقش مهمی در تفریخ تخم و بقای لارو دارد و محدوده‌های حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد برای بسیاری از شرایط پرورش مناسب گزارش شده‌اند. رطوبت بسیار بالا می‌تواند رشد قارچ و شرایط نامطلوب بستر را افزایش دهد، درحالی‌که رطوبت پایین موجب خشک شدن تخم‌ها و محدود شدن دسترسی لارو به مواد غذایی می‌شود.

نور و مدیریت کلونی

نور برای رفتار جفت‌گیری و تولیدمثل حشرات بالغ اهمیت دارد. طیف و شدت نور می‌تواند بر موفقیت جفت‌گیری تأثیرگذار باشد و در سیستم‌های بسته، استفاده از نور مصنوعی امکان ایجاد شرایط یکنواخت‌تر را فراهم می‌کند. فراهم کردن محل مناسب تخم‌گذاری و جمع‌آوری منظم تخم‌ها نیز برای حفظ تولید پایدار ضروری است (Liu et al., 2020; Klüber et al., 2024).

مدیریت بستر و تغذیه

لارو BSF قادر به مصرف طیف وسیعی از مواد آلی است، اما قابلیت مصرف یک ماده با مناسب بودن آن برای تولید خوراک ایمن یکسان نیست. نوع بستر باید بر اساس هدف نهایی محصول، کیفیت تغذیه‌ای و خطرات شیمیایی و میکروبی انتخاب شود. میزان رطوبت بستر معمولاً باید در محدوده‌ای قرار گیرد که امکان تغذیه مناسب لارو را فراهم کند؛ رطوبت بیش از حد می‌تواند موجب ایجاد شرایط بی‌هوای و بوی نامطبوع شود و بستر بسیار خشک نیز رشد لارو را محدود می‌کند. ترکیب بستر بر رشد، زمان برداشت و ترکیب شیمیایی لارو اثر می‌گذارد (Jucker et al., 2017; Lu et al., 2022).

تراکم لارو

تراکم لارو بر رشد، مصرف بستر و راندمان تبدیل مواد اثر می‌گذارد. تراکم بسیار بالا می‌تواند رقابت برای منابع و کاهش رشد را به همراه داشته باشد، درحالی‌که تراکم بسیار پایین ممکن است موجب مصرف ناکافی بستر شود. بنابراین، تراکم مناسب باید با توجه به نوع ظرف، ترکیب بستر، سن لارو و هدف تولید تعیین شود و استفاده از یک مقدار ثابت برای تمام سامانه‌ها مناسب نیست.

سیستم‌های پرورش: باز و بسته

سیستم‌های تولید BSF را می‌توان به دو گروه کلی باز و بسته تقسیم کرد. سیستم‌های باز معمولاً سرمایه‌گذاری اولیه کمتری نیاز دارند و در مناطق دارای شرایط اقلیمی مناسب می‌توانند برای تولید کوچک مقیاس مورد استفاده قرار گیرند؛ باین‌حال، کنترل شرایط محیطی، کیفیت محصول و امنیت زیستی در آن‌ها دشوارتر است. در سیستم‌های بسته، واحد مولد از واحد پرورش و زیست‌تبدیل پسماند تفکیک می‌شود و شرایطی مانند دما، رطوبت، نور، تراکم و تغذیه تحت کنترل بیشتری قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها قابلیت تکرارپذیری و مقیاس‌پذیری بیشتری دارند، اما سرمایه‌گذاری و هزینه انرژی و تجهیزات در آن‌ها بالاتر است. انتخاب سیستم باید بر اساس اقلیم، منابع، نیروی انسانی، مقیاس تولید و بازار هدف انجام شود (Bruno et al., 2019; Dortmans et al., 2021).

ارزش تغذیه‌ای و فرآورده‌های حاصل

پرورش BSF را می‌توان یک سامانه چندمحصولی در نظر گرفت که در آن علاوه بر لارو یا پودر پروتئینی، روغن، فرس، کیتین، کیتوزان و ترکیبات زیست‌فعال نیز قابلیت ایجاد ارزش افزوده دارند (Camille et al., 2020; Ewald et al., 2020).

زیست‌توده لاروی و پودر پروتئینی

لاروها پس از برداشت می‌توانند به صورت تازه یا پس از خشک کردن و فرآوری به شکل پودر پروتئینی مورد استفاده قرار گیرند. مقدار پروتئین و چربی به بستر، سن برداشت و روش فرآوری وابسته است (Henry et al., 2015; Tan & Teoh, 2026).

نتیجه‌گیری

مگس سرباز سیاه به‌عنوان یک راهکار زیستی امیدبخش، ظرفیت قابل‌توجهی برای تلفیق ارزش‌افزایی پسماندهای آلی، تولید پروتئین جایگزین و بازیافت مواد مغذی در چارچوب اقتصاد زیستی چرخشی دارد. بررسی شواهد موجود نشان می‌دهد که لاروهای این گونه می‌توانند طیف متنوعی از بسترهای آلی مناسب را به زیست‌توده‌ای غنی از پروتئین و چربی تبدیل کنند و در کنار آن، فرآورده‌های باارزشی مانند فرس، روغن، کیتین و کیتوزان تولید نمایند. با این حال، کارایی و ایمنی این سامانه به عواملی همچون کیفیت بستر، شرایط محیطی، مدیریت پرورش، روش‌های فرآوری و اجرای نظام‌های مناسب کنترل کیفیت وابسته است (Lai-Foenander et al., 2024; Lock et al., 2015).

در ایران، وجود مقادیر قابل‌توجهی از پسماندهای کشاورزی و صنایع غذایی، در کنار افزایش نیاز به منابع پروتئینی جایگزین، زمینه مناسبی برای توسعه فناوری مگس سرباز سیاه فراهم می‌کند. افزایش فعالیت‌های پژوهشی دانشگاهی و شکل‌گیری برخی فعالیت‌های تجاری و دانش‌بنیان نیز نشان‌دهنده رشد توجه علمی و اقتصادی به این فناوری است. با این حال، گذار از تولید آزمایشگاهی و مقیاس کوچک به یک صنعت پایدار و قابل‌اعتماد، نیازمند توجه جدی‌تر به ایمنی بستر، استانداردسازی فرآیند تولید، کنترل کیفیت محصولات، توجیه‌پذیری اقتصادی و تدوین چارچوب‌های نظارتی است.

از این‌رو، پژوهش‌های آینده باید بر بهینه‌سازی و خودکارسازی سامانه‌های پرورش، ارزیابی بسترهای آلی بومی، بهبود عملکرد زیستی و اصلاح نژاد، بررسی دقیق ایمنی و کیفیت تغذیه‌ای محصولات و تدوین پروتکل‌های استاندارد برای زیست‌توده لارو و فرس متمرکز شوند. همچنین، انجام ارزیابی چرخه حیات و مطالعات اقتصادی متناسب با شرایط ایران برای تعیین عملکرد واقعی زیست‌محیطی و اقتصادی سامانه‌های مختلف ضروری است. ایجاد استانداردهای ملی و چارچوب‌های قانونی شفاف، همراه با تقویت آموزش‌های تخصصی و همکاری میان دانشگاه‌ها، صنعت، سیاست‌گذاران و نهادهای نظارتی، از الزامات توسعه مسئولانه این حوزه خواهد بود. در مجموع، مگس سرباز سیاه را نباید صرفاً به‌عنوان یک منبع پروتئینی جایگزین در نظر گرفت، بلکه می‌توان آن را به‌عنوان یکی از اجزای یک سامانه یکپارچه برای ارزش‌افزایی پسماند، بازیافت منابع و تولید پایدار در ایران مورد توجه قرار داد.

References

- Alfarano, L., Bellezza Oddon, S., Cecire, R., Gasco, L., & Pugliese, M. (2026). Nursery Application of Raw and Thermally Treated *Hermetia illucens* Frass Shows Dose-Dependent Effects Against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* on Tomato Under Greenhouse Conditions. *Insects*, 17(7), 669. <https://doi.org/10.3390/insects17070669>.
- Baptista da Silva, C., De Troyer, T., De Paepe, E., Hesta, M., Vanhaecke, L., & Hemeryck, L. Y. (2026). A systematic review of the health effects of edible insects in human and mammalian nutrition. *Journal of Insects as Food and Feed*, 12(11), 1843-1862. <https://doi.org/10.1163/23524588-bja10384>.
- Bruno, D., Bonelli, M., De Filippis, F., Di Lelio, I., Tettamanti, G., Casartelli, M., Ercolini, D., Caccia S. (2019). The Intestinal Microbiota of *Hermetia illucens* Larvae Is Affected by Diet and Shows a Diverse Composition in the Different Midgut Regions. *Applied Environmental Microbiology*. 9;85(2): e01864-18. <https://doi.org/10.1128/AEM.01864-18>. PMID: 30504212; PMCID: PMC6328772.
- Camille, B. P., Virginie, T. T., Maglwa, T. Hélène and FC Geneviève. (2020). Valorization of extracted organic matter from municipal solid waste leachate: Application to soils from France and Togo. *Waste Management*, 102(1): 161-169.
- Camperio, J., Carroza-Meza, CH., Suarez, J., Benetti, D. (2026). Global Research Trends of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) Meal in Aquaculture from a Scientometric Perspective (2007-

- 2025). Aquaculture Nutrition. 6; 2026:5560332. <https://doi.org/10.1155/anu/5560332>. PMID: 41509727; PMCID: PMC12774867.
- Diener, S., Zurbügg, C., & Tockner, K. (2009). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates. Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 27(6), 603–610. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103838>.
- Dortmans, B. M. A., Egger, J., Diener, S., & Zurbügg, C. (2021). *Black soldier fly biowaste processing: A step-by-step guide* (2nd ed.). Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- European Commission. (2021). Commission Regulation (EU) 2021/1372 on the use of processed insect protein in feed. Brussels: European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1372/oj/>
- Ewald, N., Vidakovic, A., Langeland, M., Kiessling, A., Sampels, S., & Lalander, C. (2020). Fatty acid composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) - Possibilities and limitations for modification through diet. *Waste management (New York, N.Y.)*, 102, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.014>
- FAO. (2013). "Edible insects: Future prospects for food and feed security." *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- FAO. (2021). "Insects as feed: legislative framework and future prospects." *Food and Agriculture Organization*.
- Fawzy, E., Hassanien, R. H. E., Mansour, G., & Suloma, A. (2026). Towards a sustainable simple decoupled aquaponic system: mineralization of black soldier fly frass improved Tilapia-Basil system performance. *Journal of Insects as Food and Feed*, 12(11), 1925-1937. <https://doi.org/10.1163/23524588-bja10375>.
- Harnden, L. M., & Tomberlin, J. K. (2016). Effects of temperature and diet on black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae), development. *Forensic science international*, 266, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.05.007>.
- Henry, M., Gasco, L., Piccolo, G., and E. Fountoulaki. (2015). Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future. *Animal. Feed Science & Technology*, 203: 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001>
- Jucker, C., Erba, D., Leonardi, M. G., Lupi, D., & Savoldelli, S. (2017). Assessment of Vegetable and Fruit Substrates as Potential Rearing Media for *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) Larvae. *Environmental entomology*, 46(6), 1415–1423. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx154>.
- Klüber, P., Arous, E., Jerschow, J., Fraatz, M., Bakonyi, D., Rühl, M., & Zorn, H. (2024). Fatty acids derived from oviposition systems guide female black soldier flies (*Hermetia illucens*) toward egg deposition sites. *Insect science*, 31(4), 1231–1248. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.13287>.
- Lai-Foenander, A. S., Kuppusamy, G., Manogoran, J., Xu, T., Chen, Y., Tang, S. Y., Ser, H. L., Yow, Y. Y., Goh, K. W., Ming, L. C., Chuah, L. H., Yap, W. H., & Goh, B. H. (2024). Black soldier fly (*Hermetia illucens* L.): A potential small mighty giant in the field of cosmeceuticals. *Health science reports*, 7(6), e2120. <https://doi.org/10.1002/hsr.2.2120>.
- Liu, Z., Najar-Rodriguez, A. J., Minor, M. A., Hedderley, D. I., & Morel, P. C. H. (2020). Mating success of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), under four artificial light sources. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 205, 111815. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.111815>.
- Lock, E. R., Arsiwalla, T., and R. Waagbo. (2015). Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*): Effects on performance, nutritional status and metabolism. *Aquaculture Nutrition*, 22(6): 1202–1213. <https://doi.org/10.1111/anu.12343>
- Lu, S., Taethaisong, N., Meethip, W., Surakhunthod, J., Sinpru, B., Sroichak, T., Archa, P., Thongpea, S., Paengkoum, S., Purba, R. A. P., and P. Paengkoum. (2022). Nutritional Composition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.) and Its Potential Uses as Alternative Protein Sources in Animal Diets: A Review. *Insects*, 13(9), 831. <https://doi.org/10.3390/insects13090831>.
- Mei, Z., Kuzhir, P., & Godeau, G. (2024). Update on Chitin and Chitosan from Insects: Sources, Production, Characterization, and Biomedical Applications. *Biomimetics (Basel, Switzerland)*, 9(5), 297. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9050297>.
- Putri, S.A., Arrazi, M.Z., Unadirekkul, P., Zhang, Q., Kenéz, A., Putra, R.E., Melani, L., Puniamoorthy, N., & Abduh, M.Y. (2026). Enzymatic hydrolysis of black soldier fly larvae oil enhances

- antimicrobial and antioxidant properties across different strains. *Journal of Insects as Food and Feed*, 12(11), 1909-1924. <https://doi.org/10.1163/23524588-bja10383>.
- Sheppard, D. C., Tomberlin, J. K., Joyce, J. A., Kiser, B. C., & Sumner, S. M. (2002). Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of medical entomology*, 39(4), 695–698. <https://doi.org/10.1603/0022-2585-39.4.695>.
- Singh, A., & Kumari, K. (2019). An inclusive approach for organic waste treatment and valorisation using Black Soldier Fly larvae: A review. *Journal of environmental management*, 251, 109569. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109569>.
- Tan, J., & Teoh, C. (2026). Impact of defatted black soldier fly larvae meal on growth, feed utilisation, and fillet quality in freshwater-reared Asian seabass. *Journal of Insects as Food and Feed*, 12(11), 1939-1951. <https://doi.org/10.1163/23524588-bja10374>.
- Tomberlin, J. K., Sheppard, D. C., & Joyce, J. A. (2002). Selected life-history traits of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) reared on three diets. *Annals of the Entomological Society of America*, 95(3), 379-386.
- Traore, O., Zaato, P. A., Baidoo, J. K., Feleke, S., Manyong, V., Abdoulaye, T., Djouaka, R., Schreinemachers, P., & Ba, M. N. (2024). Willingness of West African Consumers to Buy Food Produced Using Black Soldier Fly Larvae and Frass. *Foods (Basel, Switzerland)*, 13(17), 2825. <https://doi.org/10.3390/foods13172825>.
- Van Huis A. (2013). Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Annual Review of Entomology*. 58:563-83. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153704>. Epub 2012 Sep 27. PMID: 23020616.
- Wang, H., & Shelomi, M. (2017). Review of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Animal Feed and Its Potential. *Foods*, 6(10), 91.
- Zulkifli, N. F. N. M., Seok-Kian, A. Y., Seng, L. L., Mustafa, S., Kim, Y. S., & Shapawi, R. (2022). Nutritional value of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae processed by different methods. *PloS one*, 17(2), e0263924. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263924>.