



## Assessment the nutrition methods of Bacteria's Mohammad Ayoub Hanafi

Member of Biology department, education faculty, Baghlan University

**Corresponding Author:** Mohammad Ayoub Hanafi, E-mail: [mohammadayoubhanafi@gmail.com](mailto:mohammadayoubhanafi@gmail.com)

| Article Info                           | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Article Type:</b><br>Review Article | Bacterial nutrition is one of the important issues physiology microbial that plays a key role in understanding microbial ecology, biogeochemical eras, and biotechnology adaptations, the aim in this study, by systematically reviewing scientific resources, a variety of bacterial feeding methods were classified based on energy sources (light or chemical citrus) and carbons sources (organic or inorganic). The present research has been conducted in a review to collect, analyze and organize knowledge in the field of bacterial feeding methods. The findings show that bacteria are divided into four main groups, including photoautotrophs, photo heterotrophs, chemoautotrophs, and chemo heterotrophs, however, the emergence of concepts such as mix trophy and the discovery of species with full nitrification has challenged classical modules. The examination of the ecological roles of each group indicates their importance in stabilizing carbons, recycling nitrogen and decomposition of organ citrus in natural ecosystems. |
| <b>Article History:</b>                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Received:</b><br>27, August,2025    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Accepted:</b><br>1, June, 2025      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Published:</b><br>20, August, 2025  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Keywords:</b>                       | Bacteria nutrition, phototroph, chemotrophic, mix trophy, nitrification.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

To cite this article: Hanafi, M: 2025. Assessment the nutrition methods of Bacteria. Baghlan University Academic Research Journal, Vol. 13, Issue. 2, Serial No. 37 - Summer (2025), 145-155. License: RCTD – GNJR – 0018 - 23.  
Publisher: University of Baghlan



## بررسی روش های تغذیه باکتریها

پوهنمل محمد ایوب حنفی

عضو کادر علمی دیپارتمنت بیولوژی، پوهنځی تعلیم و تربیه، پوهنتون بغلان.

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                      | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>نوع مقاله:</b><br>مقاله مروری                                                                                                                                                   | تغذیه باکتریها یکی از موضوعات مهم فیزیولوژی میکروبی میباشد که نقش اساسی در درک ایکولوژی میکروبی، دوران های بیوکیوکیماوی، و تطبیقات بیوتکنالوژی ایفا می کند. هدف این مطالعه، با مرور نظام مند منابع علمی، انواع روش های تغذیه باکتریها بر اساس منابع انرژی (نور یا مرکبات کیمیاوی) و منابع کاربن (مواد عضوی یا غیرعضوی) طبقه بندی شده اند. تحقیق حاضر به شکل مروری به منظور جمع آوری، تحلیل و سازمان دهی دانش در زمینه روش های تغذیه باکتریها انجام یافته است. یافته ها نشان می دهد که باکتریها در چهار گروه اصلی شامل فوتوتوتروفها، فوتوهتروتروفها، کیمواتوتروفها و کیموهتروتروفها قابل تقسیم اند؛ با این حال، ظهور مفاهیمی مانند میکسوتروفي و کشف گونه هایی با توانایی نایتریفیکیشن کامل، مدل های کلاسیک را با چالش مواجه ساخته است. بررسی نقش های ایکولوژیکی هر گروه، بیانگر اهمیت آنها در تثبیت کاربن، بازیافت نایترژن و تجزیه مرکبات عضوی در ایکوسیستم های طبیعی می باشد. |
| <b>تاریخ دریافت:</b><br>۱۴۰۴/۶/۵ هـ ش                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>تاریخ پذیرش:</b><br>۱۴۰۴/۰۳/۱۱ هـ ش                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>تاریخ انتشار:</b><br>۱۴۰۴/۰۵/۲۹ هـ ش                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>واژه های کلیدی:</b>                                                                                                                                                             | تغذیه باکتریها، فوتوتروف، کیموتروف، میکسوتروفي، نایتریفیکیشن.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| استناد: حنفی، محمد ایوب. (۱۴۰۴)، بررسی روش های تغذیه باکتریها، مجله علمی-تحقیقی پوهنتون بغلان، شماره ۲، تابستان (۱۴۰۴)، شماره مسلسل ۳۷، دور ۱۳. (۱۴۵-۱۵۵).<br>ناشر: پوهنتون بغلان. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

## مقدمه

دانستن روش‌های تغذیه باکتری‌ها، یکی از اصول بنیادی در علم میکروبی‌شناسی و ایکولوژی میکروبی محسوب می‌شود (Madigan & Martin, 2005). باکتری‌ها از جمله متنوع‌ترین موجودات زنده از نظر میتابولیکی هستند (Koneke, 2009) که برای ادامه حیات و انجام وظایف حجروی خود به تأمین مداوم انرژی و کاربن نیاز دارند. بر اساس منابع انرژی و کاربن مورد استفاده، باکتری‌ها به گروه‌های مختلف تغذیه‌ای تقسیم می‌شوند. دو گروه اصلی شامل فوتوتروف‌ها، که انرژی خود را از نور خورشید دریافت می‌کنند، و کیموتروف‌ها، که انرژی را از مرکبات کیمیایی به دست می‌آورند، هستند (Madigan et al., 2018). فوتوتروف‌هایی مانند سیانوباکتری‌ها و باکتری‌های سلفردار بنفش، از طریق تعامل فوتوسنتز کاربن دای‌اکساید را به مرکبات عضوی تبدیل می‌کنند؛ برخی از آن‌ها فوتوسنتز اکسیژنی (همراه با تولید اکسیژن) انجام می‌دهند، در حالی که برخی دیگر از تعاملات بدون اکسیژن استفاده کرده و موادی مانند سلفر تولید می‌کنند (Tang et al., 2011). در مقابل، کیموتروف‌ها با اکسیدیشن مرکبات عضوی یا معدنی مانند آمونیا یا نایتريت انرژی لازم را کسب کرده و در تعاملاتی مانند دوران نایتروژن نقش کلیدی دارند (Dams et al., 2015).

تنوع روش‌های تغذیه باکتری‌ها نه تنها از منظر درک وظایف ایکولوژیکی آن‌ها در ایکوسیستم‌ها اهمیت دارد، بلکه در زمینه‌هایی نظیر زراعت پایدار، تصفیه فاضلاب، حفاظت محیط زیست و بیوتکنالوژی نیز کاربردهای گسترده‌ای دارد (Ponoka, 2009). با این وجود، علیرغم نقش حیاتی باکتری‌ها در دوران مواد و پروسه‌های صنعتی، دانش مربوط به تنوع و روش‌های تغذیه‌ای آن‌ها مساله است که در بسیاری از منابع علمی به‌ویژه متون آموزشی فارسی‌زبان به‌درستی معرفی نشده است. اکثر کتاب‌های درسی موجود به طبقه‌بندی‌های ساده بسنده کرده و به بررسی جزئیات بیوکیمیایی و زمینه‌های ایکولوژیک تغذیه باکتریایی نمی‌پردازند (Madigan et al., 2018). این در حالی است که تحقیقات جدید، رفتارهای تغذیه‌ای پیچیده‌تری مانند نباتات میکسوتروفی (استفاده همزمان از منابع عضوی و غیرعضوی) را آشکار کرده‌اند و گروه‌های جدیدی از باکتری‌ها با ظرفیت‌های میتابولیکی ناشناخته شناسایی شده‌اند (Dams et al., 2015; Hug et al., 2016).

اهمیت این موضوع در آن است که تغذیه باکتریایی اساس بسیاری از پروسه‌های بزرگ مقیاس طبیعی و صنعتی را تشکیل می‌دهد. باکتری‌ها در دوران بیولوژیکی عناصر حیاتی مانند کاربن، نایتروژن و سلفر، نقش تعیین‌کننده‌ای داشته و باعث پایداری و دوران دوباره مواد مغذی در محیط

می‌شوند (Falkowski et al., 2008). در ساحات عملی، شناخت دقیق از روش‌های تغذیه‌ای آن‌ها زیربنای تکنالوژی‌هایی همچون تصفیه بیولوژیکی آلوده‌کننده‌ها، کمپوست‌سازی، تولید سوخت‌های بیولوژیکی، و انجینیری میکروبی محسوب می‌شود (Lee et al., 2012). به طور خاص، باکتری‌های کیمولیتوتروف در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و باکتری‌های فوتوتروف در تولید اکسیژن در محیط‌های آبی به کار گرفته می‌شوند (Madigan et al., 2018; Tang et al., 2011).

مطالعه تغذیه باکتری‌ها سابقه‌ای بیش از یک قرن دارد. در اواخر قرن نوزدهم، سرگئی وینوگرادسکی دانشمند روسی برای نخستین بار مفاهیم مرتبط با کیمولیتوتروفي را مطرح کرد. وی نشان داد که برخی باکتری‌ها می‌توانند بدون نیاز به نور خورشید از طریق اکسیدیشن مرکبات غیرعضوی مانند آمونیا ( $\text{NH}_3$ ) و هایدروجن سلفاید ( $\text{H}_2\text{S}$ ) انرژی مورد نیاز خود را تأمین کنند (Dworkin et al., 2006). این کشف نقطه عطفی در تاریخ فیزیولوژی میکروبی بود که نشان داد روش‌های تغذیه‌ای باکتری‌ها فراتر از مسیر کلاسیک فوتوسنتز است. در قرن بیستم و با پیشرفت لوازم لابراتواری و تکنالوژی‌های میکروسکوپی ساختار طبقه‌بندی باکتری‌ها بر اساس منبع انرژی و کاربن تکمیل شد. آثار کلاسیک مانند Brock Biology of Microorganisms این مفاهیم را استندرد ساخته و طبقه‌بندی چهارگانه ی فوتوتروف‌ها، کیموتروف‌ها، لیتوتروف‌ها و ارگانوتروف‌ها را به عنوان بنیان درک میتابولیسم میکروبی تثبیت کرد (Madigan e, 2018). تحقیقات دهه‌های اخیر با ورود تکنالوژی مدرنی مانند میتاجنومیکس، بیوانفورماتیک و ترانسکریپتومیکس افق تازه‌ای را بر درک رفتارهای تغذیه باکتری‌ها گشودند. برای مثال (Hug et al., 2016) با تحلیل میتاجنوم‌های محیطی، گروه‌های جدیدی از باکتری‌ها با توانایی‌های میتابولیکی متفاوت را شناسای کردند. از دیگر دستاورد‌های اخیر می‌توان به کشف گونه‌هایی مانند Nitrospira in piñata اشاره کرد که قادر به انجام نایتریفیکیشن کامل بوده و الگوی‌های کلاسیک چرخه نایترژن را به چالش کشیداند (Dams et al., 2015). همچنین مفهوم میکسوتروفي، یعنی توانایی استفاده همزمان از منابع انرژی و کاربن عضوی و غیرعضوی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. پژوهش‌هایی مانند

(Tang et al., M2011; Erbil Gin et al., 2014). نشان داده اند که بسیاری از باکتری‌ها در محیط‌های طبیعی توانایی تغییر مسیر تغذیه‌ای خود را بسته به شرایط محیطی دارند. که این موضوع نشان دهنده ی انعطاف پذیری بالای آن‌ها است. در مجموع، مرور آثار موجود نشان میدهد که

تغذیه باکتریایی یک حوزه ی پویا و در حال تحول است که نه تنها به فهم بهتر دوران مواد در طبیعت کمک می‌کند، بلکه اساس توسعه بیوتکنالوژی محیط زیست و زراعت پایدار نیز فراهم می‌آورد (Konopk,2009; Xu & Yang,2018).

هدف اصلی این تحقیق، ارائه ی یک مرور منظم و به‌روز از روش‌های تغذیه باکتری‌ها بر پایه ی منابع معتبر علمی است. این تحقیق تلاش دارد تا با بررسی ابعاد گوناگون میتابولیسم تغذیه باکتری‌ها، نقش آن‌ها را در تعاملات ایکولوژیکی و بیوتکنالوژی تبیین کند. اهداف اختصاصی این تحقیق ارائه ی یک طبقه‌بندی جامع از باکتری‌ها بر اساس نوع روش تغذیه آن‌ها، با تمرکز بر منبع انرژی (نوری یا مرکبات کیمیایی) و منبع کاربن (مواد عضوی و غیرعضوی)؛ توصیف میکانیسم میتابولیکی مرتبط با هر گروه تغذیه‌ای، از جمله فوتوتوتروف‌ها، فوتوهترتروف، کیموتوتروف‌ها و کیمو هترتروف‌ها؛ تحلیل اهمیت ایکولوژیکی و کاربردی روش‌های تغذیه باکتری‌ها در محیط‌های مختلف مانند خاک، آب، و صنعت؛ معرفی نمونه‌هایی از گونه‌های باکتریایی شاخص برای هر نوع روش تغذیه‌ای بر اساس یافته‌های نوین علم. با توجه به خلای دانش موجود و لزوم به‌روزرسانی طبقه‌بندی‌ها و کاربردها بر اساس یافته‌های نوین، ضرورت انجام یک مرور ساختاریافته و جامع از منابع علمی معتبر احساس می‌شود؛ مروری که نه‌تنها منطق میتابولیکی انواع تغذیه باکتریایی را تشریح کند، بلکه اهمیت ایکولوژیکی و تکنالوژیکی آن‌ها را نیز مورد تحلیل قرار میدهد. چنین تحقیقی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود آموزش علم میکروبیولوژی، توسعه تکنالوژی‌های بیولوژیکی و ارائه راهکارهای نوین برای چالش‌های محیط زیستی ایفا کند.

این تحقیق یک مطالعه مروری است که به هدف جمع‌آوری، تحلیل و سازمان‌دهی دانش موجود در زمینه ی روش‌های تغذیه باکتری‌ها انجام شده است. جستجوی منابع علمی از پایگاه‌های معتبر انجام گرفت. کلمات مورد استفاده در این جستجو عبارت از: کیموتروف، فوتوتروف‌ها، میتابولیزم، استراژی‌های تغذیه باکتری‌ها، روش ایکالوژی باکتری‌ها، صنف بندی باکتری‌ها، میکسوتروف‌ها، اورگانوتروف‌ها، میکروبیولوژی محیط زیستی و لیتوتروف‌ها می‌باشد.

### تغذیه باکتری‌ها

باکتری‌ها موجودات یک حجروی کوچک و ذره بینی می‌باشد و برای نمو و تامین انرژی مورد نیاز خویش به تغذیه مواد غذای ضرورت دارند که به حیث منبع انرژی جهت اجرای عملیه های حیاتی

و به قسم مواد ساختمانی برای اعمار اجزای حجره به مصرف میرسند و از منابع مختلف آن را تامین می کنند (Tang et al., 2011).

### روش های تغذیه باکتریها

مرور نظام مند منابع علمی نشان می دهد که روش های تغذیه باکتریها بر اساس منبع انرژی و منبع کاربن قابل طبقه بندی به چهار گروه اصلی هستند. این گروه بندی نه تنها نشان دهنده تنوع متابولیکی باکتریها است، بلکه انعکاس دهنده نقش ایکولوژیکی گسترده ای آنها در ایکوسیستم های طبیعی و مصنوعی نیز است (Madigan et al., 2018).

#### ۱. فوتو اتوتروف ها

این گروه از نور آفتاب به عنوان منبع انرژی و از کاربن دای اکساید ( $CO_2$ ) به عنوان منبع کاربن استفاده می کنند. نمونه های برجسته آن شامل سیانوباکتریها و باکتریهای سلفردار سبز می باشند که در سطح اقیانوس ها، دریاچه ها و خاک های مرطوب یافت می شوند.

**نقش ایکولوژیکی:** این باکتریها در تثبیت بیولوژیکی کاربن نقش کلیدی دارند و به واسطه ای تولید اکسیژن، نقش عمده ای در تکامل ایکوسیستم های آبی و شکل گیری زنجیره غذایی ایفا می کنند. (Stale, 2012)

#### ۲. فوتو هتروتروف

این باکتریها از نور برای تأمین انرژی استفاده می کنند، ولی برای تأمین کاربن خود به مرکبات عضوی مانند اسیدهای عضوی، الکل ها یا قندها وابسته اند. نمونه هایی از این گروه شامل باکتریهای بنفش غیرسلفردار هستند که توانایی رشد در شرایط غیرهوازی یا میکروآیروفیل را دارند (Tang et al, 2011).

نقش ایکولوژیکی: این باکتریها عمدتاً در محیط های کم نور، مانند تالاب ها، رسوبات بدون اکسیژن و فاضلاب ها فعال اند و در دوران و تجزیه مواد عضوی سهم دارند (Stale, 2012).

#### ۳. کیمو اتوتروف ها (یا کیمولیتو اتوتروف ها)

این باکتریها انرژی خود را از طریق اکسیدیشن مرکبات غیرعضوی مانند آمونیا ( $NH_3$ )، هیدروجن سلفاید ( $H_2S$ )، یا آهن ( $Fe^{2+}$ ) به دست می آورند و از  $CO_2$  به عنوان منبع کاربن استفاده می کنند. به طور مثال، Nitrobacteria، Nitrosamines و Beggiatoa از جمله باکتریهایی هستند که در تعامل نایتریفیکیشن و دوران های بیوجیو کیمیاوی مشارکت دارند (Tang et al., 2011).

نقش ایکولوژیکی: این باکتری‌ها در تثبیت نایتروژن، اکسیدیشن سلفر، و بازیافت فلزات نقش دارند که در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، خاک‌های اسیدی و بسترهای دریا قابل مشاهده‌اند (Dams et al., 2015).

#### ۴. کیموهتروتروف‌ها

باکتری‌های این گروه از مرکبات عضوی مانند گلوکوز، لکتات (Lactate)، اسیدهای چرب و پروتئین‌ها به‌طور همزمان به‌عنوان منبع انرژی و کاربن استفاده می‌کنند. نمونه‌هایی عده ای این ها مانند ایشیریشیا کولی در روده انسان، پسیدوموناس (Pseudomonas) در خاک و محیط‌های مرطوب، لکتوباسیلوس (Lactobacillus) در تخمیر غذا شامل این گروه باکتری‌ها اند. برخی این ها به شکل ساپروفایت بالای اجساد مرده حیوانی و نباتی زندگی نموده و از انساج آن ها تغذیه می‌کنند که اجساد تمام حیوانات و نباتات مرده، مواد فاضله حیوانی و نباتی، شیر و نان که دارای مواد عضوی می‌باشند تجزیه نموده و غذای قابل استفاده را از آن ها به دست می‌آورند. در نتیجه فعالیت تغذیوی، ساپروفایت ها باعث پوسیدن مواد عضوی میگردند. این میکرواورگانیزم ها به دوران انداختن مواد عضوی بیکاره جهانی نیز میگردند محصول نهایی تجزیه مواد عضوی آب، کاربن دی اکساید و نایتروجن می‌باشند و این مواد مجدداً به محیطی که در ابتدا از آن به دست آمده بود آزاد می‌گردد.

نقش ایکولوژیکی: این باکتری‌ها نقش اساسی در تجزیه مواد عضوی، تعاملات تخمیری مانند تولید ماست و سرکه، عامل امراض در بدن میزبان و زندگی همزیستی با نباتات ایفا می‌کنند (Xu & Yang, 2018).

#### یافته‌ها

مطالعه حاضر با مرور منابع علمی معتبر و به‌روز، انواع طبقه‌بندی و میخانیکیت تغذیه باکتری‌ها را مورد بررسی قرار داد. یافته‌ها نشان می‌دهند که تغذیه باکتری‌ها نه‌تنها تابع منبع انرژی و منبع کاربن است، بلکه تحت تأثیر انعطاف‌پذیری میتابولیکی، شرایط محیطی، و توانایی استفاده ترکیبی از منابع غذایی نیز قرار دارد. بر اساس تحلیل منابع علمی، یافته‌های کلیدی این تحقیق نشان می‌دهند که چهار گروه اصلی تغذیه شامل فوتواتوتروف‌ها، فوتوهتروتروف‌ها، کیمواتوتروف‌ها و کیموهتروتروف‌ها، همچنان چوکات مؤثری برای تفکیک روش‌های تغذیه باکتری‌ها فراهم می‌کنند. با این حال، شواهد میتاجنومیکی نشان می‌دهد که بسیاری از گونه‌ها دارای انعطاف‌پذیری بالا بوده

و در شرایط خاص قادر به تغییر نوعیت تغذیه هستند. هر نوع باکتریا دارای وظایف خاص ایکولوژیکی نیز می‌باشند:

۱. فوتوتوتروف‌ها: در تولید اولیه در تثبیت کاربن و تولید اکسیژن نقش دارند و در آب‌های سطحی و خاک‌های مرطوب غالب اند.

۲. فوتوهتروتروف‌ها: در محیط‌های کم نور و غنی از مواد عضوی فعالیت می‌کنند و در تجزیه مرکبات عضوی مؤثراند.

۳. کیمواوتوتروف‌ها: از طریق اکسیدیشن مواد غیرعضوی در دوران نایتروژن، سلفر و آهن نقش دارند.

۴. کیموهتروتروف‌ها: در تجزیه مواد عضوی، تخمیر، تولید مرض و هم‌زیستی نقش اساسی ایفا می‌کنند.

همچنان کشف باکتریایی مانند (*Nitrospira inopinata*) که قادر به انجام نایتریفیکیشن کامل است، نشان می‌دهد که باکتری‌ها می‌توانند وظایفی را انجام دهند که پیش‌تر تصور می‌شد نیازمند کانسرسيوم میکروبی است. بسیاری از باکتری‌ها نظر به شرایط محیطی، بین روش‌های تغذیه‌ای مختلف جابه‌جا می‌شوند. این ویژگی که با عنوان میکسوتروفی شناخته می‌شود، در ایکوسیستم‌های آبی و خاکی گزارش شده و نشان‌دهنده‌ی سازگاری قابل‌توجه باکتری‌ها با محیط است. یافته‌ها همچنان نشان می‌دهد که اگرچه دانش تغذیه باکتریایی در سطح بنیادی به‌خوبی توسعه یافته، اما کاربرد آن در پالیس‌های اقلیمی، زراعت پایدار، و تصفیه بیولوژیکی هنوز محدود و پراکنده است.

### مناقشه

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که باکتری‌ها از طریق روش‌های تغذیه‌ای متنوع، توانایی بالایی برای تطابق با شرایط محیطی مختلف دارند. طبقه‌بندی سنتی روش‌های تغذیه باکتری‌ها را بر اساس منبع انرژی (نور یا مرکبات کیمیاوی) و منبع کاربن (مواد عضوی یا غیرعضوی) طبقه‌بندی می‌کند. با این حال، شواهد جدید تحقیقی نشان می‌دهند که متابولیسم باکتریایی بسیار پویاتر و منعطف‌تر از آن چیزی است که در تقسیم‌بندی‌های کلاسیک منعکس شده است. یکی از نکات برجسته در مطالعات اخیر، توانایی برخی باکتری‌ها برای تغییر روش تغذیه خود در پاسخ به تغییرات محیطی است. به‌عنوان مثال، گونه‌هایی وجود دارند که نظر به شرایطی چون دسترسی به اکسیژن، شدت نور یا غلظت مواد مغذی، میان اتوتروف‌ها و هتروتروف‌ها جابه‌جا می‌شوند (Hug et al., 2016). این



انعطاف‌پذیری میتابولیکی بستر مناسبی برای بقا و سازگاری باکتری‌ها در ایکوسیستم‌های متنوع، از اقیانوس‌ها گرفته تا رسوبات غیرهوازی، فراهم می‌سازد. از دیگر دستاوردهای تحقیقات جدید، کشف باکتری‌های کومیکس (Commix) که قادراند پروسه نایتریفیکیشن کامل آمونیا را به‌تنهایی انجام دهند (Dams et al., 2015). این کشف یافته‌های کلاسیک از نقش‌های متمایز باکتری‌ها که دوران نایترژن را به چالش کشیده است. همچنین، شواهد رو به افزایش از وجود روش‌های میکسوتروفی در محیط‌های خاکی و آبی نشان‌دهنده پیچیدگی بیشتر رفتارهای تغذیه‌ای است (Morris et al., 2011).

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، همچنان خلاهای دانشی قابل‌توجهی در زمینه تغذیه باکتری‌ها وجود دارد. از جمله این موارد می‌توان به نقش گونه‌های غیرقابل کشت، مسیرهای میتابولیکی کمتر شناخته‌شده مانند اکسیدیشن میتان یا آهن، و بهره‌برداری از مودل‌های میتابولیکی برای مدیریت پایدار محیط زیست و زراعت اشاره کرد (Zengler & Zara mile, 2018; Schmidt et al., 2016).

### نتیجه‌گیری

این مطالعه، مرور جامعی بر روش‌های تغذیه باکتری‌ها، میکانیزم میتابولیکی، نقش‌های ایکولوژیکی و کاربردهای بیوتکنالوژی آن‌ها تاکید کرده است. تنوع چشمگیر روش‌های تغذیه، نشان دهنده انعطاف‌پذیری و سازگاری بالای باکتری‌ها با شرایط محیطی متغیر است. باکتری‌ها در پروسه‌های کلیدی همچون تولید اولیه، دوران مواد، تجزیه بیولوژیکی مواد عضوی، و تصفیه آلوده‌کننده‌ها نقش اساسی ایفا می‌کنند. درحالی که طبقه‌بندی کلاسیک (فتواتوتروف، فتوهترتروف، کیمواتوتروف، کیموهترتروف) همچنان مفید است، اما یافته‌های اخیر بر وجود روش‌های تغذیه‌ای ترکیبی و میتابولیسم‌های غیرسنتی تأکید دارند. پیشرفت‌های میکروبیولوژی محیطی در سال‌های اخیر، چشم‌انداز تازه‌ای از پیچیدگی و تنوع روش‌های تغذیه باکتری‌ها در اختیار محققان قرار داده است. در نهایت، درک بهتر از این روش‌ها نه تنها به روشن‌تر شدن نقش باکتری‌ها در ایکوسیستم‌ها منجر می‌شود، بلکه زمینه‌ساز انکشاف کاربردهای جدید در زراعت، مدیریت زباله، و تصفیه بیولوژیکی خواهد بود.

## پیشنهادهای

۱. بسیاری از گونه‌های باکتریایی در شرایط لابراتواری قابل کشت نیستند، اما در محیط‌های طبیعی فعال هستند. استفاده از میتاجنومیک، میتاترانسکریپتومیک و روش‌های تصویر برداری نوین می‌تواند به شناسایی و تحلیل نقش این باکتری‌ها در دوران مواد مغذی کمک کند.
۲. تحقیق در مورد باکتری‌هایی که همزمان از منابع عضوی و غیرعضوی استفاده می‌کنند، می‌تواند دیدگاه دقیق‌تری از انعطاف‌پذیری میتابولیکی ارائه دهد. بررسی تأثیر فاکتورهای محیطی بر انتقال بین حالت‌های تغذیه‌ای، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.
۳. شناسایی نمودن باکتری‌هایی که در اکسیدیشن آهن، منگنز یا میتان نقش دارند، در محیط‌های خاصی مانند رسوبات، معادن یا تالاب‌ها یافت می‌شوند. مطالعات بیشتر می‌تواند به درک بهتر از این مسیرها و کاربردهای بالقوه آن‌ها در تصفیه بیولوژیکی منجر شود.
۴. ترکیب داده‌های جنومی و ایکولوژیکی با مدل‌سازی ریاضی می‌تواند برای پیش‌بینی وظیفه باکتری‌ها در محیط‌های متغیر و در طراحی سیستم‌های انجینیری بیولوژی، مفید واقع شود.
۵. استفاده از باکتری‌های که دارای توانایی نایتریفیکیشن، تثبیت نایتروژن یا تجزیه آلوده‌کننده‌ها است می‌تواند در مدیریت بیولوژیکی خاک، فاضلاب و بازیافت مواد مغذی در زراعت پایدار مفید باشد.

## منابع

- Dims, H., Lebedeva, E. V., Pjevac, P., Han, P., Herbold, C., Albertson, M., et al. (2015). Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria. *Nature*, 528(7583), 504–509. <https://doi.org/10.1038/nature16461>
- Dworkin, M., Falkow, S., Rosenberg, E., Schleifer, K.-H., & Stack Brandt, E. (Eds.). (2006). *The Prokaryotes: Vol. 6: Proteobacteria: Gamma Subclass*. Springer.
- Erbilgin, O., Portis, M., & Dagan, T. (2014). Mix trophic and heterotrophic growth of bacteria in soil: Implications for carbon cycling. *Environmental Microbiology*, 16(9), 2915–2926. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12405>
- Hug, L. A., Baker, B. J., Anantharaman, K., Brown, C. T., Probst, A. J., Castelli, C. J., et al. (2016). A new view of the tree of life. *Nature Microbiology*, 1, 16048. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.48>
- Konopka, A. (2009). What is microbial community ecology? *The ISME Journal*, 3(11), 1223–1230. <https://doi.org/10.1038/ismej.2009.88>

- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). Brock Biology of Microorganisms (15th Ed.). Pearson.
- Madigan, M. T., & Martinko, J. M. (2005). Brock Biology of Microorganisms (11th Ed.). Pearson Prentice Hall.
- Morris, J. J., Johnson, Z. I., Szul, M. J., Keller, M., & Zinsser, E. R. (2011). Dependence of the cyanobacterium *Prochlorococcus* on hydrogen peroxide scavenging microbes for growth at the ocean's surface. *Plows ONE*, 6(2), e16805.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016805>
- Schmidt, M., Müller, C., & Tinge, S. (2016). Functional diversity of soil microbiomes: implications for ecosystem services. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1204. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01204>
- Stale, L. J. (2012). Cyanobacteria in coral reef ecosystems: A review. *Journal of Phycology*, 48(3), 455–467
- Xu, X., & Yang, S. T. (2018). Metabolic engineering of *Escherichia coli* for the production of biofuels and biochemical. *Biotechnology Advances*, 36(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.11.001>
- Zengler, K., & Zara mela, L. S. (2018). The social network of microorganisms. How auxo trophies shape complex commune