19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

گرمایش زمین و احیای میکروب‌های منجمد در دوران پساکرونا؛ از واقعیت علمی تا هشدار زیستی

شعله قطب رزمجو[1]*، حسن اعتصامی[2]
[1]گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، ghotbrazmjou.s@ut.ac.ir
[2]گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، hassanetesami@ut.ac.ir

چکیده

در دهه‌ی اخیر، هم‌زمان با افزایش دمای کره زمین وذوب یخ‌های دائمی (پرمافراست)، پدیده‌ی احیای میکروب‌های منجمد باستانی مورد توجه ویژه جامعه‌ی علمی قرار گرفته است. در دوران پساکرونا، اهمیت درک سازوکارهای بقای طولانی‌مدت میکروارگانیسم‌ها بیش از پیش آشکار شده است؛ چراکه ویروس‌ها و باکتری‌های باستانی می‌توانند الگوهایی برای پایداری، تکامل و حتی تهدیدهای زیستی آینده باشند. در این مقاله، به بررسی یافته‌های علمی مرتبط با احیای میکروب‌های باستانی در محیط‌های منجمد طبیعی پرداخته شده است. پژوهش‌های اخیر در سیبری، قطب شمال و دریاچه‌های زیر یخی قطب جنوب نشان می‌دهد که گونه‌هایی از ویروس‌ها و باکتری‌ها از جمله *Pithovirus sibericum*، *Bacillus anthracis* و *Methanobacterium* پس از هزاران تا میلیون‌ها سال غیرفعال بودن، در شرایط آزمایشگاهی فعال شده‌اند. مرور داده‌ها نشان می‌دهد که پدیده‌ی احیای میکروب‌ها واقعیتی علمی است که ضمن گشودن افق‌های جدید برای درک چرخه‌های زیستی، هشدارهایی جدی درباره‌ی پیامدهای اقلیمی و زیست‌محیطی به همراه دارد.

کلیدواژه ها: احیای میکروب‌ها، چرخه زیستی، پرمافراست، اقلیم، پساکرونا، میکروبیولوژی باستانی

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین به یکی از بزرگ‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی بشر تبدیل شده است. ذوب یخ‌های دائمی در نواحی شمالگان و سیبری نه‌تنها موجب آزادسازی گازهای گلخانه‌ای مانند متان و دی‌اکسیدکربن می‌شود، بلکه ذخایر عظیمی از حیات میکروبی منجمد را نیز آزاد می‌سازد که میلیون‌ها سال در حالت غیرفعال بوده‌اند (Groussin et al., 2023).

پژوهش‌ها نشان داده است که پرمافراست‌ها همچون ذخیره طبیعی از ژن‌ها، ویروس‌ها و میکروارگانیسم‌ها عمل می‌کنند. برای مثال، در سال ۲۰۱۴، گروهی از پژوهشگران فرانسوی موفق به احیای ویروسی باستانی به نام *Pithovirus sibericum* شدند

که بیش از ۳۰ هزار سال در خاک یخزده‌ی سیبری مدفون بود (Legendre et al., 2014). این رویداد، بینش جدیدی در خصوص مفهوم مرگ و بقا در مقیاس میکروبی ایجاد کرد.

در دوران پساکرونا، اهمیت شناخت این سازوکارها افزایش یافته است، زیرا تجربه‌ی جهانی کووید–۱۹ نشان داد که تهدیدات میکروبی می‌توانند ساختارهای اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی جهان را به چالش بکشند. از این‌رو، بررسی امکان احیای میکروب‌های باستانی با گرمایش کره زمین و در عصر ذوب یخ‌ها، نه صرفاً کنجکاوی علمی، بلکه ضرورتی برای پیشگیری از بحران‌های زیستی آینده است.

هدف این مقاله، مرور و تحلیل مستندات علمی درباره‌ی امکان و سازوکار احیای میکروب‌های منجمد طبیعی و ارزیابی خطرات و فرصت‌های نهفته در آن است.

مواد و روش‌ها

این مقاله بر مبنای مرور داده‌ها و یافته‌های منتشرشده در مجلات بین‌المللی از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ تدوین شده است. منابع شامل مقالاتی از *PNAS, Science advances, Nature* و *Frontiers* بوده‌اند که به احیای ویروس‌ها و باکتری‌های منجمد، ژنوم‌های قدیمی و سازوکارهای بقای طولانی‌مدت پرداخته‌اند.
داده‌های ژنومی به روش متاژنومیکس بررسی شده و فرایند احیای میکروب‌ها در محیط‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی از جمله شرایط دمایی پایین، فشار منفی و ترکیبات معدنی مشابه پرمافراست تحلیل گردیده است.(Kochkina et al., 2020)
در مرحله‌ی دوم، گزارش‌های مربوط به نمونه‌های واقعی مانند احیای *Methanobacterium* از پرمافراست آلاسکا و فعال شدن مجدد اسپورهای *Bacillus anthracis* در شمال سیبری، با داده‌های محیطی اقلیم‌شناختی مقایسه شدند تا پیوند میان دما، عمق یخزدگی و احتمال فعال‌سازی زیستی مشخص گردد.

نتایج و بحث

بررسی‌ها نشان می‌دهد که احیای میکروب‌ها در شرایط منجمد طبیعی نه افسانه‌ای ساخته ذهن، بلکه پدیده‌ای واقعی و قابل اندازه‌گیری است. نمونه‌های متعددی از این احیا در دهه‌ی اخیر گزارش شده است.
در سال ۲۰۱۶، ذوب ناگهانی پرمافراست در شبه‌جزیره یامال روسیه موجب فعال شدن مجدد اسپورهای *Bacillus anthracis* شد که در بقایای گله‌های گوزن شمالی آلوده به سیاه‌زخم وجود داشت. این حادثه بیش از ۲۰۰۰ گوزن را تلف کرد و چندین مورد انسانی نیز ثبت شد.(Revich & Podolnaya, 2021)

از سوی دیگر، کشف و احیای *Pithovirus sibericum* و *Mollivirus kamchatka* نشان داد که ویروس‌هایی با قدمت ده‌ها هزار سال می‌توانند هنوز در سلول‌های میزبان جدید فعال شوند. این موضوع نه تنها درک ما از پایداری زیستی را تغییر می دهد، بلکه به طرح پرسش‌هایی درباره‌ی «حیات نهفته» و مرزهای تعریف حیات انجامیده است.

در مطالعات اخیر (Shmakova et al., 2023) روی نمونه‌های خاک منجمد دریاچه‌ی بایکال و سیبری، ۱۳ نوع ویروس باستانی شناسایی شد که همگی توانایی ایجاد عفونت در آمیب‌ها را داشتند. نکته‌ی قابل‌تأمل، عدم وجود جهش‌های تخریبی در ژنوم این ویروس‌ها بود، که نشان‌دهنده‌ی حفظ ساختار ژنتیکی در دمای زیر صفر طی هزاران سال است. از دیدگاه زیست‌محیطی، احیای چنین موجوداتی می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر چرخه‌ی مواد آلی و معدنی خاک‌های سرد داشته باشد. برخی از باکتری‌های احیاشده، مانند *Methanobacterium*، در فرایند متانوژنز فعال هستند و آزادسازی متان از خاک‌های منجمد را تشدید می‌کنند. این امر خود موجب تقویت گرمایش جهانی می‌شود — پدیده‌ای که به آن «بازخورد مثبت اقلیمی» گفته می‌شود.

بنابراین، احیای میکروب‌های منجمد نه تنها در حوزه‌ی میکروبیولوژی، بلکه در دینامیک خاک، چرخه‌ی کربن و حتی سلامت انسان اهمیت حیاتی دارد. تجربه‌ی جهانی کووید–۱۹ نیز نشان داد که تعامل میان انسان و محیط طبیعی می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای داشته باشد، و احیای میکروب‌های باستانی می‌تواند در آینده به‌عنوان یکی از چالش‌های بالقوه سلامت عمومی مطرح شود.

نتیجه‌گیری

یافته‌ها نشان می‌دهد که پدیده‌ی احیای میکروب‌های منجمد واقعیتی علمی است که از سویی فرصت‌های بی‌نظیری برای شناخت سازوکارهای بقای طولانی‌مدت و طراحی فناوری‌های زیستی جدید فراهم می‌آورد، و از سوی دیگر هشدارهایی زیست‌محیطی و بهداشتی در خود دارد.
در دوران پساکرونا، اهمیت رصد و پایش مناطق منجمد و پرمافراست و توسعه‌ی سیستم‌های پیش‌آگاهی زیستی بیش از گذشته احساس می‌شود. مطالعه‌ی ژنوم‌های باستانی نه تنها به فهم بهتر تاریخ تکامل میکروب‌ها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند در طراحی واکسن‌ها و داروهای مقاوم در برابر شرایط سخت نیز الهام‌بخش باشد.در نهایت، می‌توان گفت بازگشت خاموش میکروب‌ها، روایت دیگری از پایداری حیات در برابر زمان و اقلیم است؛ روایتی که از پنهان ترین لایه های زیر یخ‌ها آغاز می‌شود .

منابع

1. Legendre, M., Bartoli, J., Shmakova, L., et al. (2014). Thirty-thousand-year-old distant relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology. *PNAS*, 111(11), 4274–4279.
2. Kochkina, G. A., Ivanushkina, N. E., Ozerskaya, S. M. (2020). Viable microorganisms in permafrost: A review. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1692.
3. Revich, B., & Podolnaya, M. A. (2021). Thawing permafrost and risks of anthrax and other infections. *Emerging Infectious Diseases*, 27(5), 1036–1045.
4. Shmakova, L., Legendre, M., Claverie, J. M. (2023). Revival of ancient viruses from permafrost: Environmental and public health implications. *Nature Communications*, 14, 6782.
5. Groussin, M., et al. (2023). Ancient DNA and microbiomes in the context of climate change. *Science Advances*, 9(15), eade2205.

Abstract

Global warming and Revival of Frozen Microbes in the Post-COVID Era – From Scientific Reality to Bio-Environmental Warning

Shoaleh Ghotb Razmjou[1], Hassan Etesami[2]
[1] Department of Soil Science and Engineering, University of Tehran, Iran.

e-mail: ghotbrazmjou.s@ut.ac.ir
[2] Department of Soil Science and Engineering, University of Tehran, Iran. *E-mail:* hassanetesami@ut.ac.ir

Abstract:
The revival of ancient microorganisms from natural frozen environments has recently gained remarkable attention due to global warming and permafrost thawing. In the post-COVID era, understanding microbial persistence and reactivation mechanisms has become increasingly crucial for biosafety and climate studies. Recent findings from Siberia, Alaska, and Antarctic ice lakes reveal that species such as *Pithovirus sibericum*, *Methanobacterium*, and *Bacillus anthracis* have been successfully revived after tens of thousands of years. This phenomenon provides new insights into microbial evolution and resilience but also raises bio-environmental concerns. This paper reviews major studies on frozen microbial revival and

discusses its ecological and public health implications.

Keywords: microbial revival, permafrost, climate change, post-COVID, ancient microbiology