

Machine Learning Applications in Biothreat Modeling: A Systematic Review of *Bacillus anthracis* Dispersion Prediction

Yalda Hosseini Emad, Zahra Safarzadeh HasanBarough

Department of Microbiology, Ard.C., Islamic Azad University, Ardabil, Iran

ABSTRACT

Bioterrorism refers to the intentional release of viruses, bacteria, toxins, or fungi to induce panic, mass casualties, or severe economic disruption. Among potential biological threats, *Bacillus anthracis*, the causative agent of anthrax, has long been regarded as one of the most critical bioterrorism agents. This Gram-positive, spore-forming bacterium exists as vegetative cells and highly resilient spores capable of surviving for decades under extreme environmental conditions such as heat, radiation, desiccation, and pH fluctuations. Human infections typically arise from contact with contaminated animals or animal products, while airborne spores can be dispersed through wind or transported via contaminated surfaces. The increasing volume and complexity of biological datasets have accelerated the integration of machine learning (ML) into microbiology, enabling the development of predictive and mechanistic models for infectious agents. ML algorithms have been employed to simulate and forecast the spatiotemporal dynamics of *B. anthracis* under environmental and climate change scenarios, allowing identification of future high-risk outbreak regions. Furthermore, advanced deep-learning approaches such as convolutional neural networks combined with holographic imaging have demonstrated rapid, label-free detection of anthrax spores. Collectively, existing research highlights the growing potential of artificial intelligence and machine learning as powerful tools for early detection, surveillance, and risk assessment of *B. anthracis*, particularly in bioterrorism-related contexts. These technologies offer promising opportunities to enhance preparedness strategies and mitigate the threats posed by biological agents.

KEYWORDS: Bioterrorism, *Bacillus anthracis*, Machine learning, Dispersion Modeling, Predictive Simulation

کاربردهای یادگیری ماشین در مدل سازی تهدیدات زیستی: مروری سیستماتیک بر پیش بینی پراکندگی باسیلوس

آنتراسیس

یلدا حسینی عماد، زهرا صفرزاده حسن باروق

گروه میکروبیولوژی، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

چکیده

بیوتروریسم به انتشار عمدی ویروس ها، باکتری ها، سموم یا قارچ ها برای ایجاد وحشت، تلفات جمعی یا اختلال شدید اقتصادی اشاره دارد. در میان تهدیدات بیولوژیکی بالقوه، باسیلوس آنتراسیس، عامل ایجاد کننده سیاه زخم، مدت هاست که به عنوان یکی از مهمترین عوامل بیوتروریسم در نظر گرفته می شود. این باکتری گرم مثبت و اسپورزا، به صورت سلول های رویشی و اسپورهای بسیار مقاوم وجود دارد که قادر به زنده ماندن برای دهه ها در شرایط شدید محیطی مانند گرما، تابش، خشکی و نوسانات pH هستند. عفونت های انسانی معمولاً از تماس با حیوانات یا محصولات حیوانی آلوده ناشی می شوند، در حالی که اسپورهای موجود در هوا می توانند از طریق باد پراکنده شوند یا از طریق سطوح آلوده منتقل شوند. افزایش حجم و پیچیدگی مجموعه داده های بیولوژیکی، ادغام یادگیری ماشین (ML) را در میکروبیولوژی تسریع کرده و امکان توسعه مدل های پیش بینی کننده و مکانیکی برای عوامل عفونی را فراهم کرده است. الگوریتم های ML برای شبیه سازی و پیش بینی دینامیک مکانی-زمانی باسیلوس آنتراسیس تحت سناریوهای تغییرات محیطی و اقلیمی به کار گرفته شده اند و امکان شناسایی مناطق شیوع پرخطر در آینده را فراهم می کنند. علاوه بر این، رویکردهای پیشرفته یادگیری عمیق مانند شبکه های عصبی کانولوشنی همراه با تصویربرداری هولوگرافی، تشخیص سریع و بدون برچسب اسپورهای سیاه زخم را نشان داده اند. در مجموع، تحقیقات موجود، پتانسیل رو به رشد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین را به عنوان ابزارهای قدرتمندی برای تشخیص زودهنگام، نظارت و ارزیابی ریسک *B. anthracis*، به ویژه در زمینه های مرتبط با بیوتروریسم، برجسته می کند. این فناوری ها فرصت های امیدوارکننده ای را برای افزایش استراتژی های آمادگی و کاهش تهدیدات ناشی از عوامل بیولوژیکی ارائه می دهند.

کلمات کلیدی: بیوتروریسم، باسیلوس آنتراسیس، یادگیری ماشین، مدل سازی پراکندگی، شبیه سازی پیش بینی کننده

REFERENCES

1. Rathjen, Nicholas A., and S. David Shahbodaghi. "Bioterrorism." *American Family Physician* 104.4 (2021): 376-385.
2. Sternbach, G. (2003). The history of anthrax. *Journal of Emergency Medicine*, 24(4), 463-467.
3. Wang, Dian-Bing, et al. "Biosensors for the detection of *Bacillus anthracis*." *Accounts of chemical research* 54.24(2021): 4451-4461.
4. Jain, U., Mishra, R.P., Meena Goswami, P., Sharma, B., & Sharma, A. ANTHRAX: BIOLOGICAL AGENT FOR BIOTERRORISM.
5. Greener, Joe G., et al. "A guide to machine learning for biologists." *Nature reviews Molecular cell biology* 23.1 (2022): 40-55
6. Khalaf SMH, Alqahtani MSM, Selim YA, Elsayed KO, Bendary HA. Spatiotemporal dynamics of *Bacillus anthracis* under climate change: a machine learning approach. *Front Microbiol.* 2025 Oct 14;16:1659876.
7. Harrigan, W.; La, T.H.A.; Dahal, P.; Belcaid, M.; Norris, M.H. Machine Learning-Based Characterization of *Bacillus anthracis* Phenotypes from pXO1 Plasmid Proteins. *Pathogens* 2025, 14, 1019.
8. Jo Y, Park S, Jung J, Yoon J, Joo H, Kim MH, Kang SJ, Choi MC, Lee SY, Park Y. Holographic deep learning for rapid optical screening of anthrax spores. *Sci Adv.* 2017 Aug 4;3(8):e1700606.