



Application of Metagenomics in Sustainable Urban Management: A Novel Approach to Improving Environmental Quality and Public Health

Gholamreza Nikbakht Boroujeni¹ | Taghi Zehraei Salehi² | Zahra Aeini³ | Amin Afsahi^{4*}

1. Professor, Department of Microbiology and Immunology, Faculty of Veterinary Medicine, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: nikbakht@ut.ac.ir

2. Professor, Department of Microbiology and Immunology, Faculty of Veterinary Medicine, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: tsalehi@ut.ac.ir

3. Ph.D student, Department of Pathobiology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: zahra.aeini213@yahoo.com

4. Corresponding Author, Ph.D student, Department of Pathobiology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: amin.afsahi@iau.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 07 May 2025

Revised: 24 May 2025

Accepted: 15 June 2025

Published Online: 22 July 2025

ABSTRACT

Objective: This study aims to investigate the potential application of metagenomics as a novel approach in sustainable urban management and its impact on improving environmental quality and public health.

Methods: A structured narrative review of the scientific literature and case study methodology were employed. Applications of metagenomics in urban management were evaluated through a review of reputable scientific sources and an analysis of the MetaSUB project as a successful international example. Challenges and implementation strategies were identified and categorized with a focus on policy implications through qualitative content analysis.

Results: The results indicate that metagenomics has extensive applications in various aspects of urban management, including air and water quality monitoring, waste management, disease control, and early detection of pathogens. The analysis of the MetaSUB case study, beyond microbial findings (identifying 1,688 species and 48% unknown DNA in the initial study), revealed key policy lessons including the necessity of protocol standardization and targeted monitoring of antimicrobial resistance genes. Implementation of this technology faces limitations such as data analysis complexity, high costs, and ethical challenges such as genetic privacy (human DNA), necessitating a data governance framework.

Conclusion: Metagenomics holds the potential to fundamentally transform urban management and can play a key role in creating sustainable, healthy, and smart cities. Successful implementation requires a gradual approach, cross-sectoral partnerships, and the development of a phased operational roadmap for municipalities and urban health institutions.

Keywords: Metagenomics, Microbiota, Public Health, Environmental Monitoring, MetaSUB, Urban Governance.

Cite this article: Nikbakht Boroujeni, Gh.; Zehraei Salehi, T.; Aeini, Z. & Afsahi, A. (2025). Application of Metagenomics in Sustainable Urban Management: A Novel Approach to Improving Environmental Quality and Public Health. *Strategic Urban Management Research*, 1 (2), 189-201.



DOI: <http://doi.org/10.22034/jsrum.2026.557374.1014>

Introduction

Sustainable urban management in the era of urbanization has become one of the greatest challenges of the 21st century. Megacities, particularly in developing countries, face complex problems primarily stemming from rapid population growth, pressure on infrastructure, and the inability to manage natural resources effectively. Large cities are confronted with challenges such as:

- **Population Growth:** Rapid urban population growth exerts significant pressure on urban services such as transportation, water, electricity, and housing, requiring precise planning and effective management.
- **Environmental Pollution:** Air pollution, mainly caused by vehicle emissions and industrial activities, has serious impacts on public health and quality of life.
- **Waste Management:** High waste production in large cities and the lack of efficient management systems lead to environmental degradation and health hazards.
- **Public Health:** A key issue for cities is access to clean water and appropriate sanitation systems, especially in deprived areas, and the management of infectious diseases.

Metagenomics, defined as the study of the complete set of microbial genomes present in a specific environment, can serve as an advanced molecular biology technology to analyze microbial communities in urban environments. Recent research indicates that the urban microbiome plays a vital role in public health and the quality of life of citizens. The comprehensive study by the MetaSUB consortium, which included profiling 4,728 metagenomic samples from public transportation systems in 60 cities worldwide over 3 years, provided the first systematic and global catalog of the urban microbial ecosystem. This large study showed that environmental and demographic factors have a significant impact on the diversity and composition of the urban microbiome.

Methodology

This research is applied in terms of purpose and descriptive-analytical in nature and method, conducted using a mixed approach including a Structured Narrative Review and a case study. Given the emerging nature of the field combining metagenomics and urban management and the lack of documented standard protocols for a systematic review in this interdisciplinary field, a structured narrative review was used to enable the synthesis of findings and extraction of policy implications. Scientific sources were searched in reputable databases including PubMed, Web of Science, Scopus, and Google Scholar using English keywords such as "metagenomics", "urban management", "sustainable cities", "urban microbiome", "environmental monitoring" and their logical combinations. The search timeframe was considered from 2010 to 2024 to ensure the latest findings and technological advancements were covered. The inclusion criterion for articles was a focus on the application of genomic technologies in urban environments and having managerial or health implications; articles that dealt solely with technical laboratory aspects without urban application were excluded from the screening process. As a case study, the MetaSUB International Consortium project was selected due to its comprehensiveness, international scale, and pioneering nature. The analysis of this case study included a detailed examination of the project methodology, results, challenges faced, and its impacts on the development of metagenomics applications in urban management. Data extracted from sources and the case study were categorized using qualitative content analysis. In this process, applications, challenges, and solutions were coded and organized into main themes (environment, public health, urban governance) to develop an operational framework for urban managers.

Results

The results indicate that metagenomics has extensive applications in various areas of urban management, including air and water quality monitoring, waste management, disease control, and early detection of pathogens. The analysis of the MetaSUB case study, beyond microbial findings (identification of 1,688 species and 48 percent unknown DNA in the initial study), revealed key policy lessons including the necessity of protocol standardization and targeted monitoring of antimicrobial resistance genes. Implementation of this technology faces limitations such as data analysis complexity,

high costs, and ethical challenges such as genetic privacy (human DNA), necessitating a data governance framework. Key applications include:

- **Air Quality Monitoring:** Identification of airborne microorganisms and monitoring of biological allergens.
- **Water Resource Management:** Identification of water pathogens and assessment of water quality based on the microbiome.
- **Waste Management:** Optimization of composting processes and biogas production from organic waste.
- **Urban Green Space Planning:** Assessment of soil health and ecological diversity.
- **Disease and Epidemic Control:** Early detection of pathogens and wastewater monitoring for population health surveillance.

Conclusion

Metagenomics holds the potential to fundamentally transform urban management and can play a key role in creating sustainable, healthy, and smart cities. Successful implementation requires a gradual approach, cross-sectoral partnerships, and the development of a phased operational roadmap for municipalities and urban health institutions. Based on research findings and international experiences, the following executive suggestions are presented in a phased manner:

- **Short-term (1-2 years):** Execution of pilot projects in a metro line or urban district, drafting ethical protocols and data anonymization, and forming a specialized urban metagenomics working group.
- **Medium-term (3-5 years):** Launching the city microbiome information bank, training specialized human resources in the municipality, and integrating microbial data with existing environmental monitoring systems.
- **Long-term (5+ years):** Integrating metagenomics data with the smart city platform, monitoring wastewater and air for epidemic prediction, and developing a regional consortium for data sharing.

Key policy suggestions include forming an "Urban Metagenomics Steering Committee", allocating targeted research budgets, drafting a "Urban Microbial Data Strategic Document", and developing public participation through "Citizen Education" programs. Ultimately, cities that start smart investment in urban metagenomics today will enjoy significant competitive advantages in public health, environmental sustainability, and data-driven governance in the near future. Success in this path requires long-term commitment, interdisciplinary cooperation, and a learning approach that can keep ethical and legal frameworks up-to-date alongside technological progress.



فصلنامه
تحقیقات راهبردی
مدیریت شهری

سایت نشریه: <https://jsrum.ir>

کاربرد متاژنومیکس در مدیریت شهری پایدار: رویکردی نوین برای بهبود کیفیت محیط زیست و سلامت عمومی

غلامرضا نیکبخت بروجنی^۱ | تقی زهرائی صالحی^۲ | زهرا آئینی^۳ | امین افصیحی^{۴*}

۱. استاد، گروه میکروبیولوژی و ایمونولوژی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: nikbakht@ut.ac.ir
۲. استاد، گروه میکروبیولوژی و ایمونولوژی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: salehi@ut.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری (Ph.D)، گروه پاتوبیولوژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: zahra.aeini213@yahoo.com
۴. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری (Ph.D)، گروه پاتوبیولوژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: amin.afsahi@iau.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: هدف از این مطالعه، بررسی پتانسیل کاربرد متاژنومیکس به عنوان رویکردی نوین در مدیریت شهری پایدار و تأثیر آن بر بهبود کیفیت محیط زیست و سلامت عمومی است.

روش: این پژوهش با استفاده از روش مرور روایی ساختاریافته ادبیات علمی و مطالعه موردی انجام شده است. کاربردهای متاژنومیکس در مدیریت شهری از طریق بررسی منابع معتبر علمی و تحلیل پروژه MetaSUB به عنوان نمونه موفق بین‌المللی مورد ارزیابی قرار گرفت. چالش‌ها و راهکارهای پیاده‌سازی نیز با تمرکز بر دلالت‌های سیاستی از طریق تحلیل محتوای کیفی شناسایی و دسته‌بندی شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد متاژنومیکس کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف مدیریت شهری از جمله نظارت بر کیفیت هوا و آب، مدیریت پسماند، کنترل بیماری‌ها و تشخیص زودهنگام پاتوژن‌ها دارد. تحلیل مطالعه موردی MetaSUB علاوه بر یافته‌های میکروبی (شناسایی ۱۶۸۸ گونه و ۴۸ درصد DNA ناشناخته در مطالعه اولیه)، درس‌های سیاستی کلیدی شامل لزوم استانداردسازی پروتکل‌ها و پایش هدفمند ژن‌های مقاومت آنتی‌میکروبی را آشکار ساخت. پیاده‌سازی این فناوری با محدودیت‌هایی همچون پیچیدگی تحلیل داده‌ها، هزینه‌های بالا و چالش‌های اخلاقی نظیر حریم خصوصی ژنتیکی (DNA انسانی) مواجه است که به سازوکار حکمرانی داده نیاز دارد.

نتیجه‌گیری: متاژنومیکس پتانسیل تحول بنیادین مدیریت شهری را دارد و می‌تواند نقش کلیدی در ایجاد شهرهای پایدار، سالم و هوشمند ایفا کند. موفقیت در پیاده‌سازی نیازمند رویکرد تدریجی، شراکت‌های بین‌بخشی و تدوین نقشه راه اجرایی مرحله‌بندی‌شده برای شهرداری‌ها و نهادهای سلامت شهری است.

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

کلیدواژه: متاژنومیکس، میکروبیوتا، سلامت عمومی، پایش محیطی، MetaSUB، حکمرانی شهری.

استناد: نیکبخت بروجنی، غلامرضا؛ زهرائی صالحی، تقی؛ آئینی، زهرا و افصیحی، امین (۱۴۰۴). کاربرد متاژنومیکس در مدیریت شهری پایدار: رویکردی نوین برای بهبود کیفیت محیط زیست و سلامت عمومی. *تحقیقات راهبردی مدیریت شهری*، ۱ (۲) ۱۸۹-۲۰۱.

DOI: <http://doi.org/10.22034/jsrum.2026.557374.1014>



۱. مقدمه

مدیریت پایدار شهرها در عصر شهرنشینی به یکی از چالش‌های بزرگ قرن بیست و یکم تبدیل شده است (United Nations, 2019). کلان‌شهرها، به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه، با مشکلات پیچیده‌ای که عمدتاً ناشی از رشد سریع جمعیت، فشار بر زیرساخت‌ها و ناتوانی در مدیریت منابع طبیعی است، مواجه‌اند (Elmqvist et al., 2013). شهرهای بزرگ با چالش‌هایی نظیر موارد زیر مواجه هستند:

رشد جمعیت: رشد سریع جمعیت شهری فشار زیادی بر خدمات شهری مانند حمل‌ونقل، آب، برق و مسکن وارد کرده و نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت مؤثر است.

آلودگی محیط زیست: آلودگی هوا که عمدتاً ناشی از گازهای خروجی خودروها و فعالیت‌های صنعتی است، تأثیرات جدی بر سلامت عمومی و کیفیت زندگی مردم دارد.

مدیریت پسماند: تولید زیاد پسماند در شهرهای بزرگ و نبود سیستم‌های مدیریت کارآمد، به تخریب محیط زیست و خطرات بهداشتی منجر شده است.

بهداشت عمومی: یکی از مسائل اصلی شهرها، دسترسی به آب تمیز و سیستم‌های بهداشتی مناسب، به‌ویژه در مناطق محروم و مدیریت بیماری‌های عفونی است.

متاژنومیکس که به عنوان مطالعه مجموعه کامل ژنوم‌های میکروبی موجود در یک محیط خاص تعریف می‌شود، می‌تواند به عنوان یک فناوری پیشرفته زیست‌شناسی مولکولی، امکان تحلیل جوامع میکروبی محیط‌های شهری را فراهم کند (Handelsman, 2004). تحقیقات اخیر نشان داده‌اند میکروبیوم شهری نقش حیاتی در سلامت عمومی و کیفیت زندگی شهروندان ایفا می‌کند. مطالعه جامع کنسرسيوم MetaSUB¹ که شامل پروفایل‌بندی ۴,۷۲۸ نمونه متاژنومی از سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی در ۶۰ شهر جهان طی ۳ سال بوده، اولین کاتالوگ سیستماتیک و جهانی از اکوسیستم میکروبی شهری را ارائه داده است (Danko et al., 2021). این مطالعه بزرگ نشان داد عوامل محیطی و جمعیت‌شناختی تأثیر قابل توجهی بر تنوع و ترکیب میکروبیوم شهری دارند (MetaSUB Consortium, 2016).

۲. بیان مسئله

مدیریت شهری مدرن با پیچیدگی‌های فزاینده‌ای مواجه است که روش‌های سنتی قادر به پاسخ‌گویی مؤثر به آن‌ها نیستند. شهرها به عنوان اکوسیستم‌های پیچیده، میزبان طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها هستند که نقش حیاتی در سلامت عمومی، کیفیت محیط زیست و عملکرد زیرساخت‌های شهری ایفا می‌کنند. با این حال، درک جامع از میکروبیوم شهری و کاربرد آن در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد.

مسئله اصلی پژوهش حاضر، شکاف موجود بین پتانسیل عظیم فناوری متاژنومیکس و کاربرد محدود آن در مدیریت شهری پایدار است. روش‌های موجود نظارت بر محیط شهری عمدتاً بر پارامترهای فیزیکوشیمیایی متمرکز هستند و بُعد بیولوژیکی محیط شهری را نادیده می‌گیرند. این در حالی است که میکروارگانیسم‌ها نقش کلیدی در فرایندهای مختلفی از جمله تصفیه طبیعی آلاینده‌ها، انتشار بیماری‌ها و حتی تأثیر بر کیفیت هوا ایفا می‌کنند. علاوه بر این، نبود چارچوب جامع و منسجم برای پیاده‌سازی متاژنومیکس در مدیریت شهری، یکی از موانع اصلی بهره‌برداری از این فناوری محسوب می‌شود. در حالی که مطالعات پراکنده‌ای در زمینه کاربرد متاژنومیکس در محیط‌های شهری انجام شده، هنوز رویکرد یکپارچه و سیستماتیک برای استفاده از این فناوری در مدیریت شهری توسعه نیافته است. همچنین چالش‌های فنی، اقتصادی و اخلاقی مرتبط با پیاده‌سازی این فناوری نیاز به بررسی عمیق و ارائه راهکارهای عملی دارند.

بر این اساس، سؤالات اصلی تحقیق عبارت‌اند از:

- چگونه متاژنومیکس می‌تواند در بهبود مدیریت شهری پایدار مورد استفاده قرار گیرد؟

- کاربردهای بالقوه متاژنومیکس در حوزه‌های مختلف مدیریت شهری کدام‌اند؟
- چالش‌های اصلی پیاده‌سازی متاژنومیکس در مدیریت شهری چیست و چه راهکارهایی برای غلبه بر آن‌ها وجود دارد؟
- چگونه می‌توان چارچوب عملیاتی مؤثری برای بهره‌گیری از متاژنومیکس در شهرها طراحی کرد؟

۳. روش تحقیق

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش، توصیفی - تحلیلی است که با رویکرد ترکیبی شامل مرور روایی ساختاریافته^۱ و مطالعه موردی انجام شده است. با توجه به نوظهور بودن حوزه تلفیق متاژنومیکس و مدیریت شهری و نبود پروتکل‌های استاندارد مدون برای مرور نظام‌مند در این حوزه بین‌رشته‌ای، از روش مرور روایی ساختاریافته استفاده شد تا امکان سنتر یافته‌ها و استخراج دلالت‌های سیاستی فراهم شود. جست‌وجوی منابع علمی در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر شامل PubMed، Web of Science، Scopus و Google Scholar با استفاده از کلیدواژه‌های انگلیسی «metagenomics»، «urban management»، «sustainable cities»، «urban microbiome»، «environmental monitoring» و ترکیب‌های منطقی آن‌ها (با عملگرهای AND/OR) انجام شد. محدوده زمانی جست‌وجو از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ در نظر گرفته شد تا اطمینان حاصل شود که جدیدترین یافته‌ها و پیشرفت‌های فناوری پوشش داده می‌شوند. معیار ورود مقالات، تمرکز بر کاربرد فناوری‌های ژنومیک در محیط‌های شهری و داشتن دلالت‌های مدیریتی یا بهداشتی بود و مقالاتی که فقط به جنبه‌های فنی آزمایشگاهی بدون کاربرد شهری پرداخته بودند، از فرایند غربالگری حذف شدند. به عنوان مطالعه موردی، پروژه کنسرسیوم بین‌المللی MetaSUB به دلیل جامعیت، مقیاس بین‌المللی و ماهیت پیشگامانه انتخاب شد. تحلیل این مطالعه موردی شامل بررسی دقیق روش‌شناسی پروژه، نتایج به دست آمده، چالش‌های مواجهه و تأثیرات آن بر توسعه کاربردهای متاژنومیکس در مدیریت شهری بود. اطلاعات از منابع مختلف شامل مقالات اصلی پروژه، گزارش‌های کنسرسیوم و اسناد عمومی پروژه جمع‌آوری شد. داده‌های استخراج‌شده از منابع و مطالعه موردی، با استفاده از تحلیل محتوای کیفی دسته‌بندی شدند. در این فرایند، کاربردها، چالش‌ها و راهکارها کدگذاری شده و در قالب مضامین اصلی (محیط زیست، سلامت عمومی، حکمرانی شهری) سازماندهی شدند تا چارچوب عملیاتی برای مدیران شهری تدوین شود.

۴. مبانی نظری

۴-۱. مفاهیم کلیدی متاژنومیکس

متاژنومیکس: به عنوان یکی از شاخه‌های مهم زیست‌شناسی مولکولی مدرن، شامل مطالعه مستقیم مواد ژنتیکی موجود در نمونه‌های محیطی است. این روش بدون نیاز به کشت میکروب‌ها، امکان بررسی ژنوم‌های جوامع میکروبی را فراهم می‌کند (Handelsman, 2004).

متاژنوم: به کل محتوای ژنتیکی یک جامعه میکروبی در یک نمونه محیطی اشاره دارد. این شامل تمام توالی‌های DNA استخراج‌شده از میکروارگانسیم‌های موجود در نمونه‌ای مانند خاک، آب یا فاضلاب است.

میکروبیوم: مجموعه‌ای از میکروارگانسیم‌ها (باکتری‌ها، قارچ‌ها، ویروس‌ها) و ژن‌های آن‌هاست که به طور طبیعی در یک محیط خاص زندگی می‌کنند.

توالی‌یابی نسل بعدی^۲: فناوری پیشرفته‌ای است که امکان خوانش سریع و هم‌زمان میلیون‌ها قطعه DNA را فراهم می‌کند. **ابزارهای بیوانفورماتیک در متاژنومیکس:** مجموعه‌ای از نرم‌افزارها و الگوریتم‌ها که برای پردازش، تحلیل و تفسیر داده‌های حجیم تولیدشده از NGS طراحی شده‌اند. از جمله این ابزارها می‌توان، QIIME2 و Kraken2 برای فیلترینگ و اسمبلی داده‌ها، MetaPhlan2 برای طبقه‌بندی تاکسونومیک جوامع میکروبی، HUMAnN برای تحلیل مسیرهای عملکردی ژنومی و MEGAN برای تجسم و کاوش داده‌های را نام برد.

1. Structured Narrative Review

2. Next-Generation Sequencing – NGS

۴-۲. مفهوم مدیریت شهری پایدار

مدیریت شهری پایدار به عنوان رویکردی جامع برای برنامه‌ریزی و اداره شهرها تعریف می‌شود که هدف آن، حفظ تعادل بین نیازهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است. این مفهوم بر اساس سه رکن اصلی پایداری اقتصادی، پایداری اجتماعی و پایداری زیست‌محیطی استوار است (Bibri & Krogstie, 2017).

بُعد زیست‌محیطی: مدیریت شهری پایدار بر حفظ و بهبود کیفیت محیط زیست شهری تأکید دارد. این بعد شامل کنترل آلودگی هوا و آب، مدیریت پسماند، حفاظت از تنوع زیستی و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی است.

بُعد اجتماعی: بر ارتقای کیفیت زندگی شهروندان، تأمین سلامت عمومی و ایجاد محیط‌های مساعد برای زندگی متمرکز است.

بُعد اقتصادی: استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند در بلندمدت به کاهش هزینه‌های نظارت، پیشگیری از بیماری‌ها و بهبود کارایی سیستم‌های شهری منجر شود.

۵. کاربردهای متاژنومیکس در مدیریت شهری

پیشرفت‌های اخیر در متاژنومیکس شهری منجر به معرفی مفهوم «Urban Genome»، به عنوان پارادایم جدیدی برای برنامه‌ریزی پایدار شهرها شده است. این مفهوم ژنوم شهری را به عنوان مجموعه‌ای از داده‌های ژنتیکی میکروبی، محیطی و انسانی در نظر می‌گیرد و امکان مدیریت پیچیدگی‌های شهری مانند توزیع ARGs (ژن‌های مقاوم آنتی‌بیوتیکی) و پاتوژن‌ها را فراهم می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند این رویکرد می‌تواند در شهرهای هوشمند برای بهینه‌سازی منابع و کاهش ریسک‌های اکولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد. این مفهوم مبنایی برای کاربردهای عملی متاژنومیکس در حوزه‌های مختلف مدیریت شهری فراهم می‌آورد، که در ادامه به تفصیل بررسی می‌شوند.

۵-۱. نظارت بر کیفیت هوا

کیفیت هوا یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر سلامت شهروندان است و متاژنومیکس ابزار قدرتمندی برای نظارت جامع بر آن فراهم می‌کند. به خلاف روش‌های سنتی که بر اندازه‌گیری آلاینده‌های شیمیایی متمرکز است، متاژنومیکس امکان شناسایی و پایش آلاینده‌های بیولوژیکی را نیز فراهم می‌آورد (Yamamoto et al., 2012). یکی از کاربردهای اصلی متاژنومیکس در نظارت بر کیفیت هوا، شناسایی میکروارگانیسم‌های هوابرد و پایش آلرژن‌های بیولوژیکی است. هوای شهری حاوی طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، ویروس‌ها، جلبک‌ها، دانه‌های گرده، اسپورهای قارچی و سایر آلرژن‌های طبیعی است که می‌توانند تأثیرات مختلفی بر سلامت انسان داشته باشند (Peccia et al., 2008). تحلیل الگوهای فصلی و مکانی تغییرات میکروبیوم هوا نیز اطلاعات مهمی را در اختیار مدیریت شهری قرار می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند ترکیب میکروبیوم هوا به شدت تحت تأثیر فصل، شرایط آب‌وهوایی، منابع آلودگی و حتی فعالیت‌های انسانی قرار دارد (Bowers et al., 2013).

۵-۲. مدیریت منابع آب

شناسایی پاتوژن‌های آب یکی از کاربردهای اصلی متاژنومیکس در مدیریت منابع آب است. روش‌های سنتی معمولاً بر شناسایی باکتری‌های شاخص آلودگی مانند E. Coli متمرکز هستند، اما متاژنومیکس امکان شناسایی طیف وسیع‌تری از میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا شامل ویروس‌ها، انگل‌ها و باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک را فراهم می‌کند (Girones et al., 2010). ارزیابی کیفیت آب بر اساس میکروبیوم نیز رویکرد نوآورانه‌ای است که بر پایه تحلیل جامع جوامع میکروبی استوار است. میکروبیوم سالم آب شاخص مهمی از کیفیت اکولوژیکی منابع آبی محسوب می‌شود (Newton et al., 2015).

۵-۳. مدیریت پسماند

بهینه‌سازی فرایندهای کمپوست یکی از کاربردهای مهم متاژنومیکس در مدیریت پسماند است. کمپوست‌سازی فرایند پیچیده میکروبی شامل تعاملات میان گونه‌های مختلف میکروارگانیسم‌ها است. تحلیل متاژنومی این فرایندها امکان شناسایی

میکروارگانسیم‌های کلیدی، بهینه‌سازی شرایط فرایند و تولید کمپوست با کیفیت بالا را فراهم می‌کند (Partanen et al., 2010). تولید بیوگاز از پسماندهای آلی نیز فرایندی است که به‌شدت وابسته به فعالیت میکروارگانسیم‌های هضم‌کننده بی‌هوازی است. متاژنومیکس با شناسایی میکروبیوم این سیستم‌ها می‌تواند به افزایش بازده تولید گاز، کاهش زمان فرایند و بهبود پایداری عملیاتی سیستم‌های بیوگاز کمک کند (Maus et al., 2016).

۵-۴. برنامه‌ریزی فضای سبز شهری

فضای سبز شهری نقش حیاتی در بهبود کیفیت زندگی، تنظیم آب‌وهوا و حفظ تنوع زیستی دارد. متاژنومیکس می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند برای درک اکولوژی این فضاها و برنامه‌ریزی مؤثر مورد استفاده قرار گیرد. ارزیابی سلامت خاک یکی از کاربردهای اصلی متاژنومیکس در برنامه‌ریزی فضای سبز است. میکروبیوم خاک نقش کلیدی در باروری، چرخه مواد مغذی و سلامت گیاهان دارد. این ابزار با تحلیل متاژنومی خاک می‌تواند به ارزیابی سلامت اکولوژیکی، شناسایی کمبودها و طراحی برنامه‌های بهبود خاک کمک کند (Fierer, 2017).

۵-۵. کنترل بیماری‌ها و اپیدمی‌ها

پایش پاتوژن‌ها در محیط شهری یکی از کاربردهای متاژنومیکس در کنترل بیماری‌ها است. بسیاری از پاتوژن‌ها قبل از بروز علائم بالینی در محیط شهری قابل شناسایی هستند. تحلیل متاژنومی نمونه‌های محیطی امکان شناسایی زودهنگام این پاتوژن‌ها و اتخاذ تدابیر پیشگیرانه را فراهم می‌کند (Bibby & Peccia, 2013). نظارت بر فاضلاب رویکرد نوآورانه‌ای برای پایش سلامت جمعیت است که در دوران پاندمی کووید ۱۹ اهمیت ویژه‌ای یافت. تحلیل متاژنومی فاضلاب امکان شناسایی حضور پاتوژن‌ها، ارزیابی شیوع بیماری‌ها و حتی شناسایی گونه‌های جدید میکروارگانسیم‌ها را فراهم می‌کند (Nemudryi et al., 2020).

جدول ۱. مروری بر کاربردهای متاژنومیکس در حوزه‌های مدیریت شهری

| حوزه کاربرد | مثال‌های کلیدی | مزایا | چالش‌ها | رفرنس‌های کلیدی |
|----------------------|--|---------------------------------------|----------------------------------|---|
| نظارت بر کیفیت هوا | شناسایی آلاینده‌های بیولوژیکی و الگوهای فصلی | دقت بالا در پایش آلرژن‌ها و پاتوژن‌ها | تأثیر عوامل آب‌وهوایی بر داده‌ها | Bowers et al., 2013 Yamamoto et al., 2012 |
| مدیریت منابع آب | تشخیص پاتوژن‌ها و ارزیابی کیفیت اکولوژیکی | شناسایی گونه‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک | محدودیت در پوشش گونه‌های نادر | Girones et al., 2010 Newton et al., 2015 |
| مدیریت پسماند | بهینه‌سازی کمپوست و تولید بیوگاز | افزایش بازده فرآیندهای میکروبی | پیچیدگی تعاملات گونه‌ها | Partanen et al., 2010 Maus et al., 2016 |
| برنامه‌ریزی فضای سبز | ارزیابی سلامت خاک و تنوع زیستی | بهبود باروری خاک و حفظ اکوسیستم | نیاز به داده‌های بلندمدت | Fierer, 2017 |
| کنترل بیماری‌ها | پایش پاتوژن‌ها در فاضلاب و هوا | تشخیص زودهنگام اپیدمی‌ها و AMR | مسائل اخلاقی در داده‌های عمومی | Bibby & Peccia, 2013 Nemudryi et al., 2020 |

۶. مطالعه موردی: کنسرسیوم بین‌المللی MetaSUB؛ الگویی برای حکمرانی داده‌های میکروبی شهری

پروژه کنسرسیوم بین‌المللی MetaSUB به عنوان پیشروترین ابتکار جهانی در زمینه پایش میکروبیوم محیط‌های شهری، مطالعه موردی این پژوهش را تشکیل می‌دهد. انتخاب این پروژه به دلیل مقیاس بین‌المللی، استانداردسازی روش‌شناسی و تولید داده‌های قابل تعمیم برای سیاست‌گذاری شهری بوده است. این کنسرسیوم با تحلیل ۴,۷۲۸ نمونه متاژنومی از سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی در ۶۰ شهر جهان، نخستین اطلس جهانی میکروبیوم شهری را تدوین کرد (Danko et al., 2021). یافته‌های این پروژه را می‌توان در دو سطح طبقه‌بندی کرد:

۱. سطح بنیادی (شناسایی تنوع زیستی): مطالعه اولیه در مترو نیویورک به شناسایی ۱,۶۸۸ گونه میکروبی منجر شد و نشان داد ۴۸ درصد از DNA موجود در محیط‌های شهری با هیچ مرجع شناخته‌شده‌ای تطبیق ندارد (Afshinnkoo et al., 2021).

2015). این یافته بر ضرورت سرمایه‌گذاری در کشف «میکروبیوم ناشناخته شهری» به عنوان یک منبع بالقوه برای خدمات اکوسیستمی تأکید دارد.

۲. سطح کاربردی (پایش سلامت و مقاومت): در مقیاس جهانی، بازسازی ۱۰,۹۲۸ ژنوم میکروبی (MAGs) و شناسایی ۴,۷۳۳ ژن مقاومت آنتی‌میکروبی (AMR) نشان داد زیرساخت‌های شهری می‌توانند به عنوان مخازن پراکندگی ژن‌های مقاومت عمل کنند (Danko et al., 2021). توزیع جغرافیایی این ژن‌ها (مثلاً فراوانی ژن‌های مقاوم به کاربامپنم در شهرهای آسیایی) الگوی مهمی برای هدف‌گذاری مداخلات بهداشتی منطقه‌ای ارائه می‌دهد.

جدول ۲. درس‌های سیاستی و اجرایی پروژه MetaSUB برای مدیریت کلان‌شهرها

| یافته کلیدی پروژه | چالش مدیریتی مرتبط | درس سیاستی/راهکار اجرایی برای شهرداری‌ها |
|---------------------------------|--|---|
| شناسایی ۴۸ درصد DNA ناشناخته | عدم آگاهی از پتانسیل‌ها و ریسک‌های میکروبی محیط شهری | تخصیص بودجه برای ایجاد «بانک مرجع میکروبیوم بومی» قبل از تصمیم‌گیری‌های کلان |
| پراکندگی جغرافیایی ژن‌های AMR | خطر گسترش مقاومت آنتی‌بیوتیکی در شبکه حمل‌ونقل | ادغام نمونه‌برداری متاژنومیک در ایستگاه‌های پرتردد به عنوان بخشی از برنامه نظارت بهداشتی شهری |
| استانداردسازی روش نمونه‌برداری | عدم قابلیت مقایسه داده‌های بین منطقه‌ای | ایجاد دستورالعمل واحد نمونه‌برداری و تحلیل برای تمام مناطق شهری به منظور یکپارچگی داده‌ها |
| شناسایی فازهای حامل ژن AMR | پیچیدگی انتقال افقی ژن‌های مقاومت در محیط | پایش و کنترلهای بیولوژیک (مانند فازها) در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی |
| مشارکت بین‌المللی و اشتراک داده | هزینه‌های بالای فناوری و تحلیل داده | ایجاد کنسرسیوم‌های منطقه‌ای برای تقسیم هزینه‌ها و بهره‌برداری جمعی از زیرساخت‌های تحلیلی |

تجربه MetaSUB نشان می‌دهد موفقیت در پیاده‌سازی متاژنومیکس شهری منوط به سه عامل کلیدی است:

۱. ایجاد سازوکار شفاف برای مدیریت، اشتراک‌گذاری و حفاظت از داده‌های میکروبی شهری.
۲. تشکیل تیم‌های مشترک میان شهرداری، دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و بخش خصوصی برای تأمین تخصص و منابع.
۳. آغاز با پروژه‌های پایلوت در یک خط مترو یا یک منطقه شهری و تعمیم تدریجی بر اساس آموخته‌ها.

۷. چالش‌ها و موانع پیاده‌سازی متاژنومیکس در مدیریت شهری

پیاده‌سازی متاژنومیکس در اکوسیستم مدیریت شهری پایدار، با وجود پتانسیل‌های تحول‌آفرین، با موانع ساختاری و عملیاتی متعددی روبه‌رو است که شناسایی و مدیریت آن‌ها برای موفقیت پروژه‌ها ضروری است. تحلیل موانع موجود نشان می‌دهد این چالش‌ها را می‌توان در سه دسته کلی فنی و زیرساختی، اقتصادی و مالی، و قانونی، اخلاقی و حکمرانی داده طبقه‌بندی کرد.

۷-۱. چالش‌های فنی و زیرساختی

یکی از موانع اصلی فنی، پیچیدگی و حجم عظیم داده‌های تولیدشده (Big Data) است. یک نمونه متاژنومی محیطی می‌تواند به تولید چندین گیگابایت داده خام توالی‌یابی منجر شود که پردازش، ذخیره‌سازی و تحلیل آن‌ها نیازمند زیرساخت‌های محاسباتی با کارایی بالا (HPC) و الگوریتم‌های پیشرفته بیوانفورماتیکی است (Thomas et al., 2012). علاوه بر قدرت پردازش، تفسیر این داده‌ها نیازمند تخصص میان‌رشته‌ای ترکیبی از زیست‌شناسی، علوم داده و مدیریت شهری است که کمبود نیروی انسانی آموزش‌دیده در این حوزه مشهود است. چالش فنی دیگر، نبود پروتکل‌های استاندارد یکپارچه برای نمونه‌برداری، استخراج و آنالیز داده‌ها در سطح کلان‌شهرهاست. نبود استانداردهای مرجع به تولید داده‌های ناهمگن منجر می‌شود که قابلیت مقایسه‌پذیری بین منطقه‌ای و تلفیق در سامانه‌های شهر هوشمند را کاهش می‌دهد (Riesenfeld et al., 2004). تجربه پروژه MetaSUB نشان می‌دهد بدون هماهنگی در روش‌شناسی، داده‌های حاصل از ایستگاه‌های مختلف قابل استناد برای تصمیم‌گیری‌های کلان نخواهند بود.

۷-۲. چالش‌های اقتصادی و مالی

از منظر اقتصادی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (CAPEX) شامل خرید تجهیزات توالی‌یابی نسل جدید (NGS)، سیستم‌های سرور و راه‌اندازی آزمایشگاه‌های تخصصی، یکی از موانع اصلی برای شهرداری‌ها و نهادهای عمومی است. علاوه بر هزینه‌های ثابت، هزینه‌های عملیاتی مستمر (OPEX) نظیر نگهداری تجهیزات، خرید کیت‌های مصرفی، به‌روزرسانی نرم‌افزارها و آموزش پرسنل نیز بار مالی قابل توجهی ایجاد می‌کند. چالش اقتصادی کلیدی دیگر، ابهام در مدل بازگشت سرمایه (ROI) است؛ زیرا منافع متاژنومیکس عمدتاً ماهیت پیشگیرانه و بلندمدت دارند (مانند پیشگیری از اپیدمی‌ها یا کاهش هزینه‌های درمان) و سنجش دقیق و کوتاه‌مدت اثرات اقتصادی آن برای توجیه بودجه‌های سالانه شهری دشوار است. این عدم قطعیت اقتصادی، سرمایه‌گذاران بخش خصوصی و تصمیم‌گیران شهری را در تخصیص منابع محتاط می‌سازد.

۷-۳. چالش‌های قانونی، اخلاقی و حکمرانی داده

شاید پیچیده‌ترین لایه چالش‌ها، موانع حقوقی و اخلاقی مرتبط با حریم خصوصی و حکمرانی داده باشد. نگرانی اصلی، خطر استخراج ناخواسته اطلاعات ژنتیکی انسان از نمونه‌های محیطی است. در محیط‌های پرتراکم شهری (مانند ایستگاه‌های مترو)، نمونه‌های برداشت‌شده از سطوح حاوی مقادیر قابل توجهی DNA انسانی ره‌اشده از طریق سلول‌های پوست یا ترشحات تنفسی شهروندان هستند. در صورت عدم پالایش دقیق، توالی‌یابی کل ژنوم می‌تواند به بازسازی پروفایل‌های ژنتیکی نیمه‌کامل از افراد منجر شود که پتانسیل سوءاستفاده برای تبعیض‌های بیمه‌ای، استخدامی یا نظارت‌های امنیتی غیرقانونی را دارد (Thompson et al., 2017). به خلاف پژوهش‌های بالینی، در نمونه‌برداری از فضای عمومی امکان اخذ رضایت فردی از هزاران شهروند وجود ندارد که ابهام حقوقی جدی در تعریف مرز بین «نظارت بهداشتی عمومی» و «تجاوز به حریم خصوصی ژنتیکی» ایجاد می‌کند. در بسیاری از نظام‌های حقوقی، قوانین موجود با سرعت پیشرفت فناوری همگام نیستند و سوالاتی نظیر مالکیت داده‌های میکروبی شهری (شهرداری، دانشگاه یا عموم؟) و مسئولیت نشت اطلاعات بی‌پاسخ مانده است. برای مدیریت این چالش‌ها، فقط تکیه بر قوانین کلی کافی نیست و نیاز به طراحی سازوکار حکمرانی داده اختصاصی است. این سازوکار باید شامل الزام به پروتکل‌های ناشناس‌سازی دیجیتال (حذف توالی‌های انسانی پیش از تحلیل)، تشکیل کمیته‌های اخلاق زیستی شهری برای نظارت بر پروژه‌ها، و طبقه‌بندی سطح دسترسی به داده‌ها (عمومی، محدود، محرمانه) باشد. بدون ایجاد این چارچوب‌های اعتمادساز، پذیرش اجتماعی این فناوری و همکاری نهادهای نظارتی با موانع جدی روبه‌رو خواهد شد.

۸. نتیجه‌گیری و پیشنهاد‌های اجرایی

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد متاژنومیکس به عنوان یک فناوری تحول‌آفرین، پتانسیل ایجاد تغییر پارادایم در مدیریت شهری پایدار را دارد. این فناوری با فراهم آوردن امکان پایش جامع میکروبیوم محیط‌های شهری، می‌تواند در حوزه‌های کلیدی نظیر نظارت بر کیفیت هوا و آب، مدیریت پسماند، کنترل بیماری‌های عفونی و ارزیابی سلامت اکوسیستم شهری مورد بهره‌برداری قرار گیرد. مطالعه موردی کنسرسیوم MetaSUB به‌وضوح نشان داد رویکردهای مبتنی بر داده‌های میکروبی می‌تواند به شناسایی زودهنگام پاتوژن‌ها، پایش مقاومت آنتی‌میکروبی و تدوین سیاست‌های بهداشتی هدفمند منجر شوند. با این حال، پیاده‌سازی موفق این فناوری مستلزم غلبه بر چالش‌های فنی (پیچیدگی تحلیل داده‌ها)، اقتصادی (هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه) و حکمرانی (مسائل اخلاقی و حریم خصوصی) است. تحلیل حاضر نشان می‌دهد اتخاذ رویکرد تدریجی، ایجاد شراکت‌های بین‌بخشی و تدوین چارچوب‌های قانونی شفاف، سه رکن اساسی برای عبور از این موانع محسوب می‌شوند. بر اساس یافته‌های پژوهش و تجربیات بین‌المللی، پیشنهاد‌های اجرایی زیر به صورت مرحله‌بندی‌شده برای شهرداری‌ها و نهادهای مرتبط ارائه می‌شود:

جدول ۳. نقشه راه اجرایی و مرحله‌بندی‌شده پیاده‌سازی متاژنومیکس در کلان‌شهرهای ایران

| افق زمانی | اقدامات کلیدی | نهاد متولی اصلی | خروجی مورد انتظار |
|---------------------|--|---|--|
| کوتاه‌مدت (۱-۲ سال) | <ul style="list-style-type: none"> اجرای پروژه پایلوت در یک خط مترو یا یک منطقه شهری تدوین پروتکل‌های اخلاقی و ناشناس‌سازی داده‌ها تشکیل کارگروه تخصصی متاژنومیکس شهری | شهرداری تهران + دانشگاه‌های علوم پزشکی | <ul style="list-style-type: none"> ایجاد خط پایه میکروبیومی منطقه پایلوت تدوین منشور اخلاقی نمونه‌برداری |
| میان‌مدت (۳-۵ سال) | <ul style="list-style-type: none"> راه‌اندازی بانک اطلاعاتی میکروبیوم شهر آموزش نیروی انسانی متخصص در شهرداری ادغام داده‌های میکروبی با سامانه‌های پیش‌محیطی موجود | معاونت برنامه‌ریزی شهرداری | <ul style="list-style-type: none"> ایجاد سامانه یکپارچه پایش میکروبی تربیت تیم‌های فنی بومی برای تحلیل داده‌ها |
| بلندمدت (+۵ سال) | <ul style="list-style-type: none"> تلفیق داده‌های متاژنومیکس با پلتفرم شهر هوشمند پایش فاضلاب و هوا برای پیش‌بینی اپیدمی‌ها توسعه کنسرسیوم منطقه‌ای برای اشتراک داده‌ها | شورای عالی شهرسازی و معماری ایران + وزارت بهداشت + وزارت کشور + شهرداری | <ul style="list-style-type: none"> سیستم هشدار زودهنگام بیماری‌های شهری الگوی حکمرانی داده‌های میکروبی برای سایر شهرها |

۸-۱. پیشنهادهای سیاستی کلان

- تشکیل «کمیته راهبری متاژنومیکس شهری» متشکل از نمایندگان شهرداری، دانشگاه‌ها، وزارت بهداشت و سازمان حفاظت محیط زیست برای هماهنگی بین‌بخشی و نظارت بر اجرای پروژه‌ها.
 - تخصیص بودجه پژوهشی هدفمند با در نظر گرفتن ردیف بودجه سالانه برای پروژه‌های پایلوت متاژنومیکس در لایحه بودجه شهرداری‌های کلان‌شهرها.
 - تدوین «سند راهبردی داده‌های میکروبی شهری»، شامل مقررات شفاف درباره مالکیت داده‌ها، سطح دسترسی، پروتکل‌های ناشناس‌سازی و سازوکارهای پاسخ‌گویی در صورت نشت اطلاعات.
 - توسعه مشارکت عمومی با طراحی برنامه‌های «آموزش شهروندی» برای آگاهی‌بخشی به شهروندان و جلب مشارکت آن‌ها در پروژه‌های پایش محیطی.
- در نهایت، شهرهایی که امروز سرمایه‌گذاری هوشمندانه در متاژنومیکس شهری را آغاز کنند، در آینده‌ای نزدیک از مزایای رقابتی قابل توجهی در حوزه سلامت عمومی، پایداری محیط زیست و حکمرانی داده‌محور برخوردار خواهند شد. موفقیت در این مسیر نیازمند تعهد بلندمدت، همکاری بین‌رشته‌ای و رویکردی یادگیرنده است که بتواند هم‌زمان با پیشرفت فناوری، چارچوب‌های اخلاقی و قانونی را نیز به‌روز نگه دارد.

منابع

- Afshinnekoo, E., Meydan, C., Chowdhury, S., Jaroudi, D., Boyer, C., Bernstein, N., ... & Mason, C. E. (2015). Geospatial resolution of human and bacterial diversity with city-scale metagenomics. *Cell Systems*, 1(1), 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.cels.2015.01.001> .
- Bibby, K., & Peccia, J. (2013). Identification of viral pathogen diversity in sewage sludge by metagenome analysis. *Environmental Science & Technology*, 47(4), 1945-1951. <https://doi.org/10.1021/es305181x> .
- Bibri, S. E. (2019). On the sustainability of smart and smarter cities in the era of big data: An interdisciplinary and transdisciplinary literature review. *Journal of Big Data*, 6(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0182-7> .
- Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, 31, 183-212. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.016> .
- Bowers, R. M., Clements, N., Emerson, J. B., Wiedinmyer, C., Hannigan, M. P., & Fierer, N. (2013). Seasonal variability in bacterial and fungal diversity of the near-surface atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 47(21), 12097-12106. <https://doi.org/10.1021/es402046t> .
- Danko, D., Bezdán, D., Afshin, E. E., Alicea, J., Bhattacharya, C., Butler, D., ... & Mason, C. E. (2021). A global metagenomic map of urban microbiomes and antimicrobial resistance. *Cell*, 184(13), 3376-3393. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.05.002> .
- Elmqvist, T., Redman, C. L., Barthel, S., & Costanza, R. (2013). History of urbanization and the missing ecology. In *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities* (pp. 13-30). Springer.
10. Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579-590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87> .
11. Girones, R., Ferrús, M. A., Alonso, J. L., Rodríguez-Manzano, J., Calgua, B., de Abreu Corrêa, A., ... & Bofill-Mas, S. (2010). Molecular detection of pathogens in water—The pros and cons of molecular techniques. *Water Research*, 44(15), 4325-4339. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.030> .
12. Handelsman, J. (2004). Metagenomics: Application of genomics to uncultured microorganisms. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 68(4), 669-685. <https://doi.org/10.1128/MMBR.68.4.669-685.2004> .
14. Maus, I., Koeck, D. E., Cibis, K. G., Hahnke, S., Kim, Y. S., Langer, T., ... & Schlüter, A. (2016). Unraveling the microbiome of a thermophilic biogas plant by metagenome and metatranscriptome analysis complemented by characterization of bacterial and archaeal isolates. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 171. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0581-3> .
15. MetaSUB Consortium. (2023). Projects overview. <https://metasub.org/projects> .
16. MetaSUB International Consortium. (2016). The metagenomics and metadesign of the subways and urban biomes (MetaSUB) international consortium inaugural meeting report. *Microbiome*, 4(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s40168-016-0168-z> .
17. Nemudryi, A., Nemudraia, A., Wiegand, T., Surya, K., Buyukyoruk, M., Cicha, C., ... & Hedberg, C. (2020). Temporal detection and phylogenetic assessment of SARS-CoV-2 in municipal wastewater. *Cell Reports Medicine*, 1(6), 100098. <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2020.100098> .
18. Newton, R. J., McLellan, S. L., Dila, D. K., Vineis, J. H., Morrison, H. G., Eren, A. M., & Sogin, M. L. (2015). Sewage reflects the microbiomes of human populations. *mBio*, 6(2), e02574-14. <https://doi.org/10.1128/mBio.02574-14> .
19. Partanen, P., Hultman, J., Paulin, L., Auvinen, P., & Romantschuk, M. (2010). Bacterial diversity at different stages of the composting process. *BMC Microbiology*, 10(1), 94. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-10-94> .
20. Peccia, J., Milton, D. K., Reponen, T., & Hill, J. (2008). A role for environmental engineering and science in preventing bioaerosol-related disease. *Environmental Science & Technology*, 42(13), 4631-4637. <https://doi.org/10.1021/es087025w> .
21. Riesenfeld, C. S., Schloss, P. D., & Handelsman, J. (2004). Metagenomics: Genomic analysis of microbial communities. *Annual Review of Genetics*, 38, 525-552. <https://doi.org/10.1146/annurev.genet.38.072902.091216> .
22. Silvertown, J. (2009). A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), 467-471. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.017> .
23. Thomas, T., Gilbert, J., & Meyer, F. (2012). Metagenomics—A guide from sampling to data analysis. *Microbial Informatics and Experimentation*, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/2042-5783-2-3> .
24. Thompson, L. R., Sanders, J. G., McDonald, D., Amir, A., Ladau, J., Locey, K. J., ... & Knight, R. (2017). A communal catalogue reveals Earth's multiscale microbial diversity. *Nature*, 551(7681), 457-463. <https://doi.org/10.1038/nature24621> .

25. United Nations. (2015). Sustainable Development Goal 11: Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable. United Nations.
 26. United Nations. (2019). World urbanization prospects: The 2018 revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Yamamoto, N., Bibby, K., Qian, J., Hospodsky, D., Rismani-Yazdi, H., Nazaroff, W. W., & Peccia, J. (2012). Particle-size distributions and seasonal diversity of allergenic and pathogenic fungi in outdoor air. *The ISME Journal*, 6(10), 1801-1811. <https://doi.org/10.1038/ismej.2012.30> .