2025, Vol.11, No.4, Pages 55 to 62
Journal of Water and Sustainable Development

سال یازدهم، شماره ۴، ۱۴۰۳، صفحات ۵۵ تا ۶۲
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Comparison of the Effect of Surface and Deep Aeration Methods on Density and Type of Airborne Bacteria and Fungi in Urban Wastewater Treatment Plant (Case study: Khin-Arab and Parkand-Abad 1 Wastewater Treatment Plants)

Z. Abbasnia[1], Sh. Abbasnia[2], M. Pahlevani[3], M. Rouhbakhsh[4], M. Ghasemzadeh[5], S. Amel Jamehdar[6*]

1- Ph.D. Student in Applied Mathematics, Faculty of Mathematical Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. 2- Immunology Research Center, Inflammation and Inflammatory Diseases Division, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran. 3- Director of the Parkand-Abad Wastewater Treatment Plant, Water and Wastewater Company, Mashhad, Iran. 4- Research expert at the Mashhad Water and Wastewater Company, M.Sc. Student in Civil Engineering-Environmental, Khavaran Higher Education Institute, Mashhad, Iran. 5- M.Sc. Student in Biomathematics, Faculty of Mathematical Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. 6- Antibacterial Resistance Research Center, Department of Microbiology and Virology, Faculty of Medicine, Mashhad University of Medical Science, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: AmelJS@mums.ac.ir)

Received: 16-07-2024 Revised: 15-08-2024
Accepted: 17-08-2024 Available Online: 17-02-2025

مقایسه تأثیر روش هوادهی سطحی و عمقی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری بر تراکم و نوع باکتری‌ها و قارچ‌های هوابرد

(مطالعه موردی تصفیه‌خانه فاضلاب خین عرب و پرکندآباد یک)

زهره عباس‌نیا[1]، شادی عباس‌نیا[2]، مهدی پهلوانی[3]، مسعود روحبخش[4]، مریم قاسم‌زاده[5]، سعید عامل جامه‌دار[6*]

۱- دانشجوی دکتری ریاضی کاربردی، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۲- مرکز تحقیقات ایمونولوژی، بخش التهاب و بیماری‌های التهابی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد ، ایران. ۳- مدیر تصفیه‌خانه پرکندآباد یک، شرکت آب و فاضلاب مشهد، مشهد، ایران. ۴- کارشناس دفتر تحقیقات شرکت آب و فاضلاب مشهد، دانشجو کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران-محیط‌زیست، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران. ۵- دانشجو کارشناسی‌ارشد ریاضیات زیستی، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۶- مرکز مقاومت‌های میکروبی، گروه میکروب‌شناسی و ویروس شناسی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: AmelJS@mums.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

Abstract

One of the important problems in the field of water and wastewater treatment is the investigation of microbial air pollution and the release of suspended particles due to wastewater treatment. Harmful microorganisms in wastewater include different types of bacteria, fungi, etc. For this purpose, two wastewater treatment plants, Khin-Arab and Parkand-Abad, which use deep and surface aeration processes, were studied. Sampling was conducted seasonally with a minimum distance of one meter from barriers, and at a height of 1.5 meters above ground level at both wastewaters. Nutrient agar, McConkey agar and Subrodextrose agar were used for environmental sampling, total number of samples was 400. Then intercropping was done to identify bacteria and fungi species. Analysis of results was carried out using SPSSMODELER18 and RAWGraphs software. Mean values for the density of bacteria were reported 26.98 CFU/plate at Khin-Arab and 26.11 CFU/plate at Parkand-Abad. Mean values for the density of fungi were reported as 4.71 CFU/plate at the Khin-Arab treatment plant and 4.40 CFU/plate at Parkand-Abad. Bacterial pollution, except during the spring, was higher at Khin-Arab compared to Parkand-Abad. The process of fungal pollution trend was similar between the two treatment plants, with no statistically significant difference observed. The two treatment plants have behaved almost the same in terms of the amount of pollution in the total sampling seasons, which can be influenced by various factors such as the larger size of the Khin-Arab treatment plant, more polluted units in the Khin-Arab treatment plant, and the difference in aeration systems.

Keywords: Wastewater Treatment Plant, Surface Aeration, Deep Aeration, Bioaerosol.

چکیده

یکی از موضوعات مهم در زمینه آب و فاضلاب، بررسی آلودگی میکروبی هوا و انتشار ذرات معلق ناشی از تصفیه فاضلاب است. میکروارگانیسم‌های مضر موجود در فاضلاب شامل انواع مختلفی از باکتری‌ها، قارچ‌ها و... می‌باشند. برای این منظور دو تصفیه‌خانه خین‌عرب و پرکندآباد یک که از فرآیند هوادهی عمقی و سطحی استفاده می‌کنند، بررسی شدند. نمونه‌برداری در چهار فصل و با رعایت حداقل فاصله یک متر از موانع و در ارتفاع ۱/۵متری از سطح زمین در دو تصفیه‌خانه خین‌عرب و پرکندآباد یک انجام شد. برای نمونه‌برداری از محیط کشت نوترینت آگار، مک کانکی آگار و سابرودکستروز آگار استفاده شد و تعداد کل نمونه‌ها ۴۰۰ نمونه بوده است. سپس کشت افتراقی جهت تشخیص گونه باکتری و قارچ انجام شد. آنالیز نتایج با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS-MODELER18 و RAWGraphs انجام شد. میانگین تراکم باکتری در تصفیه‌خانه خین عرب ۲۶/۹۸ CFU/plate و در پرکند آباد یک ۲۶/۱۱ CFU/plate گزارش شد. میانگین تراکم قارچ در تصفیه‌خانه خین عرب ۴/۷۱ CFU/plate و در پرکندآباد یک ۴/۴۰ CFU/plate گزارش شد. آلودگی باکتری در تمام فصول به استثنا بهار، در تصفیه‌خانه خین‌عرب، بیشتر از پرکند آباد یک بوده است. روند آلودگی قارچی در دو تصفیه‌خانه تقریباً مشابه بوده و از نظر آماری تفاوت معناداری مشاهده نشد. دو تصفیه‌خانه از نظر میزان آلودگی در مجموع فصول نمونه‌برداری تقریباً رفتار مشابهی داشته‌اند، که عوامل مختلفی مانند وسعت بیشتر تصفیه‌خانه خین عرب، واحدهای آلوده بیشتر در تصفیه‌خانه خین عرب و تفاوت سیستم‌های هوادهی می‌تواند موثر باشد.

واژه‌های کلیدی: تصفیه‌خانه فاضلاب، هوادهی سطحی، هوادهی عمقی، بیوآئروسل.

HomePage: https://jwsd.um.ac.ir

How to cite this article: Abbasnia, Z., Abbasnia, Sh., Pahlevani, M., Rouhbakhsh, M., Ghasemzadeh, M., & Amel Jamehdar, S. (2025). Comparison of the Effect of Surface and Deep Aeration Methods on Density and Type of Airborne Bacteria and Fungi in Urban Wastewater Treatment Plant (Case study: Khin-Arab and Parkand-Abad 1 Wastewater Treatment Plants). Journal of Water and Sustainable Development, 11(4), 55-62. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v11i4.2407-1347

مقدمه

مدیریت منابع آب و فاضلاب یکی از چالش‌های اساسی در جوامع امروزی است و بهره‌مندی از آن در تصفیه آب و فاضلاب اهمیت زیادی دارد. در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش رشد جمعیت، تعداد تصفیه‌خانه‌ها افزایش یافته است و بسیاری از آن‌ها در نزدیکی مناطق مسکونی قرار دارند لذا با این قاعده که تصفیه‌خانه‌ها باید خارج از مناطق مسکونی باشند در تضاد است، با این حال باتوجه‌به نقش حیاتی این تصفیه‌خانه‌ها در حفظ بهداشت عمومی و حفاظت از محیط‌زیست، آن‌ها می‌توانند عامل آلودگی محیطی نیز شناخته شوند. منابع اصلی آلودگی‌ها در فرآیند تصفیه فاضلاب عبارت است از باکتری‌های بیماری‌زا، قارچ‌ها، ویروس‌ها و همچنین ذراتی که دارای منشا بیولوژیکی هستند. این آلودگی‌ها به سلامت انسان آسیب می‌رسانند و ممکن است باعث بروز برخی بیماری‌ها و عوارض برای کارکنان و ساکنین اطراف تصفیه خانه‌ها شوند. این بیماری‌ها می‌توانند شامل عفونت‌های پوستی و تنفسی، عفونت‌های ویروسی، اختلالات گوارشی و ... باشند. در فرآیندهای هوادهی و اختلاط فاضلاب در تصفیه‌خانه‌ها، بیوآئروسل‌ها به عنوان منابع اصلی آلودگی عمل می‌کنند (Kowalski و همکاران، ۲۰۱۷).

Wang و همکاران (۲۰۱۹) مخزن هوادهی را به‌عنوان منبع بیوآئروسل‌های باکتریایی در تصفیه‌خانه فاضلاب شناسایی کردند (۲۰۱۹) و Heinonen و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند بیشترین غلظت بیوآئروسل‌ها در دانه‌گیری به روش هوادهی می‌باشد. Heinonen و همکاران (۲۰۰۹) و Li و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند بیشترین میزان آلودگی باکتریایی مربوط به بخش آبگیری لجن و بیشترین میزان آلودگی قارچی مربوط به دانه‌گیر می‌باشد (Li و همکاران، ۲۰۱۱). نتایج پژوهش Wlazlo و همکاران (۲۰۲۰) بیان می‌کند سیستم‌های هوادهی سبب انتشار بیشترین بیوآئروسل‌ها در هوای تصفیه‌خانه فاضلاب می‌شوند. شهر مشهد، به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران، دارای تصفیه‌خانه‌های متعدد برای مدیریت آب و فاضلاب است. تصفیه‌خانه‌های این شهر عمدتاً شامل تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و تصفیه‌خانه‌های آب شرب می‌باشد. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب که مسئولیت تصفیه فاضلاب خانگی و صنعتی را بر عهده دارند مکانیسم تصفیه متفاوتی دارند. این تصفیه‌خانه‌ها معمولاً از فناوری‌های مدرن برای کاهش آلودگی و بازیابی منابع آب استفاده می‌کنند. برای این منظور در این پژوهش دو تصفیه‌خانه با سیستم هوادهی سطحی و عمقی جهت مقایسه تاثیر آن‌ها بر آلودگی باکتری‌ها و قارچ‌های هوابرد در نظر گرفته شده است.

تصفیه‌خانه فاضلاب خین عرب (شماره ۵ مشهد) در شمال مشهد با فاصله از محدوده شهر در حدود ۱۵کیلومتر در سال ۱۳۹۶ ساخته شده است. این تصفیه‌خانه حدود ۵۳۰ هزار نفر را تحت پوشش قرار می‌دهد. در حال حاضر، تصفیه‌خانه با ظرفیت روزانه حدود ۶۰۰۰۰ مترمکعب در مدار بهره‌برداری قرار گرفته‌است. فرآیند تصفیه فاضلاب تصفیه‌خانه خین عرب، فرآیند ASBR است که یکی از متداول‌ترین فرآیندهای مؤثر جهت از بین بردن آلودگی‌های فاضلاب است. در این روش واحد هوادهی مشتمل بر دوازده حوض بیولوژیکی است. تصفیه‌خانه فاضلاب خین عرب، شامل ۱۲ واحد SBR می‌باشد که در آن به استفاده از دیفیوزر عملیات هوادهی و اکسیژن‌رسانی به‌صورت عمقی انجام می‌پذیرد.

تصفیه‌خانه فاضلاب پرکندآباد ۱ (شماره ۱ مشهد) در کناره جنوبی رودخانه کشف‌رود در شمال‌غرب مشهد واقع شده‌است. این تصفیه‌خانه در سال ۱۳۷۳ به هدف تصفیه فاضلاب‌های شهری و خانگی غرب مشهد با جمعیت حدود ۱۵۰،۰۰ نفر اجرا شد. این تصفیه‌خانه با دو مدول مجموعا به ظرفیت ۱۵۰۰۰ متر مکعب در روز و با فرآیند لاگون هوادهی با اختلاط کامل در مساحتی به وسعت ۲۵ هکتار طراحی و اجرا شده‌است. که در آن با استفاده از هواده‌های مکانیکی سطحی، هوادهی به باکتری‌های موجود در فرآیند بیولوژیکی انجام می‌شود.

روش تحقیق

نمونه‌برداری در چهار فصل، زمستان سال ۱۴۰۱، بهار، تابستان و پاییز سال ۱۴۰۲ در دو تصفیه‌خانه خین عرب با سیستم هوادهی عمقی و پرکندآباد یک با سیستم هوادهی سطحی، شهرستان مشهد انجام شد. در هر فصل نمونه‌برداری به مدت ۴ جلسه متوالی و فاصله زمانی هر ۶ روز یکبار (بر اساس توصیه سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا) انجام شد (Kermani و همکاران، ۲۰۱۵؛ Niazi و همکاران، ۲۰۱۵). در مجموع تعداد کل جلسات نمونه برداری ۱۶ جلسه و تعداد کل نمونه‌ها ۴۰۰ عدد (علاوه‌برآن نقاط کنترل بالادست و پایین دست جهت باد) بوده است.

نمونه‌برداری در دو تصفیه‌خانه علاوه بر فاصله‌های ۲ و ۲۰ متر از سیستم‌های هوادهی سطحی و عمقی واحدهای مورد مطالعه، در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک از واحد اداری و آزمایشگاه و در تصفیه‌خانه خین عرب از دپو لجن، واحد دانه گیر، واحد لجن، طبقه همکف و طبقه یک واحد اداری نمونه‌برداری، با رعایت حداقل فاصله یک متر از موانع و در ارتفاع ۱،۵ متری از سطح زمین انجام شد. همچنین مدت زمان نمونه‌برداری ۱ ساعت بود. برای نمونه‌برداری محیط کشت نوترینت آگار، مک کانکی آگار، برای کشت باکتری‌ها و برای کشت قارچ‌ها محیط سابرودکستروز آگار در پلیت هایی آماده شد، و در شرایط استریل به تصفیه‌خانه‌ها منتقل شد (لازم به ذکر است برای جلوگیری از رشد باکتری، به محیط کشت قارچ آنتی بیوتیک کلرامفنیکل و برای جلوگیری از رشد قارچ در محیط کشت باکتری آنتی بیوتیک سیکلوهگزامید اضافه شد). بعد از نمونه‌برداری از هوا اطراف مکان‌های مورد مطالعه، جهت کشت باکتری و قارچ،

پلیت ها به آزمایشگاه منتقل شد، در آزمایشگاه کشت افتراقی جهت تشخیص نوع و تراکم باکتری‌ها و قارچ‌ها انجام شد. انواع محیط‌های افتراقی برای باکتری‌ها شامل: Simmon ،TSI Agar Citrate، Urea Agar، SIM و Bile Escline Agar بود. در صورت رشد در محیط نوترینت آگار و عدم رشد در محیط مک‌کانکی آگار، باکتری گرم مثبت می‌باشد که در این مرحله یک اسمیر رنگ‌آمیزی گرم تهیه شد، سپس مشخص شد، کوکسی یا باسیل گرم مثبت است. در کوکسی‌های گرم مثبت کاتالاز مثبت (مانند: استافیلوکوک، میکروکوک و..)؛ تست‌های مانیتول سالت آگار، DNase، کواگولاز لوله‌ای، Clumping Factor، حساسیت به باسیتراسین و نووبیوسین و تست اوره آز برای تشخیص انواع گونه‌های این گروه از باکتری‌ها استفاده شد. در کوکسی های گرم مثبت کاتالاز منفی (انواع استرپتوکوک ها و..)؛ تست‌های بایل اسکولین، PYR، همولیز در آگار خون‌دار، حلالیت در صفرا، تست کمپ و حساسیت به اپتوچین و باسیتراسین برای تشخیص انواع گونه‌های این گروه از باکتری‌ها استفاده شد. اگر رشد میکروارگانیسم‌ها روی محیط مک‌کانکی آگار دیده شد، دلیل بر گرم منفی بودن باکتری بوده و پس از رنگ‌آمیزی گرم، برای تأیید نهایی، تست‌های اکسیداز، تخمیر قندهای گلوکز و لاکتوز، تولید H_2S، تولید گازهای CO_2 و H_2، حرکت، تولید اندل، تولید آنزیم اوره آز و مصرف سیترات برای تشخیص انواع گونه‌های این گروه از باکتری‌ها استفاده شد. برای تشخیص انواع گونه‌های قارچ، در آزمایشگاه قارچ شناسی پلیت ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داده شد وسپس کلنی‌ها بررسی شد. در این مرحله از تمام کلنی‌های قارچی رشد یافته در پلیت، نمونه مرطوب با استفاده از محلول لاکتوفنل کاتن بلو تهیه شد. سپس نوع و تعداد کلنی قارچ بر اساس شواهد ماکروسکوپی و میکروسکوپی تعیین شد. سپس آنالیز نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSSMOD-ELER18، EXCEL و Row Graph انجام شد.

شماره دستورالعمل‌ها بر اساس آزمایشگاه مرجع سلامت وزارت بهداشت به شرح زیر است:

- کد دستورالعمل آماده سازی، تهیه و کنترل کیفی محیط‌های کشت (M-01)
- کد دستورالعمل جداول شناسایی میکروارگانیسم‌ها (M-03)
- کد دستورالعمل راهنمای رنگ آمیزی گرم (M-12)

این دستورالعمل‌ها به‌دلیل نقش کلیدی آن‌ها در استانداردسازی فرآیندهای آزمایشگاهی و کنترل کیفیت در تشخیص و ارزیابی میکروارگانیسم‌ها، در این مقاله گنجانده شده‌اند.

نتایج

در این بخش توصیفی از نتایج مقایسه آلودگی باکتریایی و قارچی برای دو تصفیه‌خانه به تفکیک جلسات مختلف نمونه‌برداری، تفاوت در نوع منطقه (سرپوشیده و باز) در دو تصفیه‌خانه، سرعت باد و تغییرات دما آورده شده است. در ادامه برای بررسی دقیق‌تر از آزمون‌های آماری مرتبط با فرضیات استفاده شده است؛ برای مقایسه میزان تراکم باکتری و قارچ در دو تصفیه‌خانه از آزمون T مستقل، برای مقایسه آلودگی باکتری و قارچ در دما و سرعت مختلف از آزمون آنوا استفاده شد.

طبق آزمون‌های آماری انجام شده میانگین تراکم باکتری در خین عرب ۲۶/۹۸ CFU/plate و در پرکندآباد یک ۲۶/۱۱ CFU/plate است. میانگین تراکم باکتری در خین عرب از میانگین تراکم باکتری در پرکند آباد یک، کمی بیشتر است. همچنین میزان تراکم قارچ در خین عرب ۴/۷۱ CFU/plate و در پرکندآباد یک ۴/۴۰ CFU/plate است. میانگین تراکم قارچ در خین عرب بیشتر از پرکندآباد یک است.

در تصفیه‌خانه خین عرب، کمترین پراکندگی آلودگی باکتریایی در اردیبهشت ماه مشاهده شد و در تیر و مهر، پراکندگی آلودگی باکتریایی در تمام نقاط تصفیه‌خانه یکسان بود. در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک نیز، در اسفند ماه کمترین پراکندگی آلودگی باکتریایی ثبت گردید و در سایر ماه‌ها پراکندگی آلودگی باکتریایی در تمام نقاط تصفیه‌خانه تقریباً یکسان بود. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر عوامل محیطی، از جمله دما و سرعت باد، بر سطح آلودگی باکتریایی و قارچی در تصفیه‌خانه‌ها است (شکل ۱).

مقایسه آلودگی باکتریایی بین دو تصفیه‌خانه پرکندآباد یک و خین عرب در شانزده جلسه نمونه‌برداری نشان می‌دهد که تصفیه‌خانه خین عرب در جلسه دوم (۱۴۰۱/۱۲/۰۴) و تصفیه‌خانه پرکندآباد یک در جلسه چهارم (۱۴۰۱/۱۲/۱۸) بیشترین میزان آلودگی خارج از بازه منطقی را داشته‌اند. همچنین، تصفیه‌خانه خین عرب در جلسات اول، هشتم و چهاردهم بیشترین پراکندگی را ثبت کرده و کمترین مقدار پراکندگی را در جلسات سوم و چهارم داشته است. به‌طور مشابه، تصفیه‌خانه پرکندآباد یک در جلسه هشتم بیشترین پراکندگی و در جلسات دوم، سوم و چهارم کمترین مقدار پراکندگی را نشان داده است (شکل ۲).

در مقایسه آلودگی قارچی، هر دو تصفیه‌خانه خین عرب و پرکندآباد یک در جلسه هشتم (۱۴۰۲/۰۳/۰۸) بیشترین آلودگی خارج از بازه منطقی را نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۳)، مشخص می‌شود که در اردیبهشت ماه، هر دو تصفیه‌خانه نیز دارای بیشترین پراکندگی قارچی بوده و در سایر ماه‌ها پراکندگی قارچی مشابهی دارند. بیشترین پراکندگی آلودگی در خین عرب در جلسات پنجم، هفتم و هشتم و در پرکندآباد یک در جلسات پنجم و هفتم مشاهده شده است، در حالی که کمترین پراکندگی نیز در چند جلسه بعدی در هر دو تصفیه‌خانه ثبت گردیده است (شکل ۳ و ۴). با توجه به نتایج آزمون لون و آزمون تی میزان پراکندگی تراکم باکتری و قارچ در دو تصفیه‌خانه یکسان می‌باشد و اختلاف معناداری میان تراکم باکتری بین این دو تصفیه‌خانه وجود ندارد.

تراکم باکتری در پرکندآباد یک در ابتدا پایین‌تر از تراکم باکتری در خین عرب قرار دارد. هر دو روند حرکتی نوسانی را نشان می‌دهند و ابتدا کاهش و سپس افزایش را تجربه می‌کنند. به‌طور مشابه، تراکم قارچ در پرکندآباد یک نیز در ابتدای کار پایین‌تر از تراکم قارچ در خین عرب است، ولی پس از افزایش، به کاهش می‌انجامد و در برخی نقاط به شدت به هم نزدیک می‌شوند. این الگوهای مشابه در تغییرات باکتری و قارچ می‌تواند به تأثیرات محیطی و شرایط عملیاتی مشترک در این دو تصفیه‌خانه اشاره داشته باشد (شکل ۵ و ۶).

نتایج حاصل از آزمون آنوا (آنالیز واریانس) مقایسه آلودگی باکتری و قارچ در تصفیه‌خانه‌های پرکندآباد یک و خین عرب در سرعت باد مختلف، نشان داد، بالاترین میانگین آلودگی باکتری مربوط به‌سرعت باد بیشتر از ۱۲ km/h و کمترین آن مربوط به‌سرعت باد کمتر از ۷ km/h می‌باشد. همچنین بالاترین میانگین آلودگی قارچ مربوط به سرعت باد بیشتر از ۱۲ km/h و کمترین آن مربوط به‌سرعت باد ۷ تا ۱۲ km/h می‌باشد. در نتایج آزمون، سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و به این معنا است که در سرعت باد مختلف در حوضچه‌های هوادهی آلودگی‌های مختلف باکتریایی و قارچی وجود دارد.

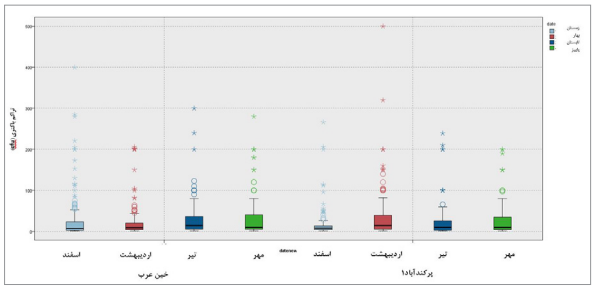
آزمون آنوا مقایسه آلودگی باکتری و قارچ در تصفیه‌خانه‌های پرکندآباد یک و خین عرب در دمای مختلف نشان داد، بالاترین میانگین آلودگی باکتری مربوط به دمای کمتر از ۱۴ درجه سانتیگراد و کمترین آن مربوط به دمای بین ۱۴ و ۲۴ درجه سانتیگراد است. بیشترین میانگین آلودگی قارچی مربوط به دمای بیشتر از ۲۴ درجه سانتیگراد و کمترین آن مربوط به دمای بین ۱۴ و ۲۴ درجه سانتیگراد است. از آنجایی که، سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد آلودگی باکتریایی و قارچی در دماهای مختلف متفاوت می باشد.

به‌طورکلی، از نظر نوع و فراوانی باکتری، در تصفیه‌خانه خین عرب، GPB با میزان ۱۱۸۴۸ CFU و Corynebacterium spp با CFU ۴۳۷۱ بیشترین مقادیر آلودگی را دارند؛ درحالی‌که در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک، GPB با ۸۲۰۶ CFU و Corynebacterium spp با ۲۱۳۹ CFU بالاترین میزان آلودگی را نشان می‌دهند. همچنین، از نظر قارچ، در خین عرب، Alternaria با ۸۴۴ CFU و Aspergillus spp با ۵۸۷ CFU و در پرکندآباد یک، Alternaria با ۵۶۰ CFU و Yeast با ۲۴۹ CFU بیشترین مقادیر آلودگی را دارند.

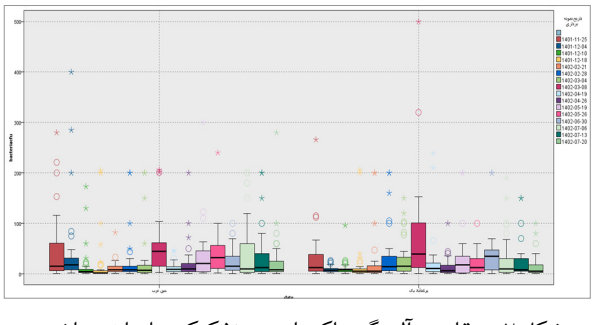
با توجه به شکل (۱) در تصفیه‌خانه خین عرب اردیبهشت ماه کمترین پراکندگی آلودگی باکتریایی مشاهده شد و در تیر و مهر پراکندگی آلودگی باکتریایی در تمام نقاط تصفیه‌خانه یکسان می‌باشد. در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک در اسفند ماه کمترین پراکندگی آلودگی باکتریایی مشاهده شد، و در سایر ماه‌ها پراکندگی آلودگی باکتریایی در تمام نقاط تصفیه‌خانه تقریباً یکسان می‌باشد.

شکل (۲) مربوط به مقایسه آلودگی باکتریایی میان دو تصفیه‌خانه پرکندآباد یک و خین عرب می‌باشد. این مقایسه به تفکیک در دو تصفیه‌خانه در شانزده جلسه صورت گرفته است. این نمودار نشان می‌دهد تصفیه‌خانه خین عرب در جلسه دوم (۱۴۰۱/۱۲/۰۴) بیشترین میزان آلودگی خارج از بازه منطقی و تصفیه‌خانه پرکندآباد یک نیز در جلسه چهارم (۱۴۰۱/۱۲/۱۸) بیشترین میزان آلودگی خارج از بازه منطقی را داشته است. تصفیه‌خانه خین عرب در جلسات اول (۱۴۰۱/۱۱/۲۵)، هشتم (۱۴۰۲/۰۳/۰۸) و چهاردهم (۱۴۰۲/۰۷/۰۶) بیشترین میزان پراکندگی را داشته است و در جلسات سوم (۱۴۰۱/۱۲/۱۰) و چهارم (۱۴۰۱/۱۲/۱۸) کمترین میزان پراکندگی را داشته است. همچنین تصفیه‌خانه پرکندآباد یک در جلسه هشتم (۱۴۰۲/۰۳/۰۸) بیشترین میزان پراکندگی و در جلسات دوم (۱۴۰۱/۱۲/۰۴) و سوم (۱۴۰۱/۱۲/۱۰) و چهارم (۱۴۰۱/۱۲/۱۸) کمترین میزان پراکندگی را داشته است.

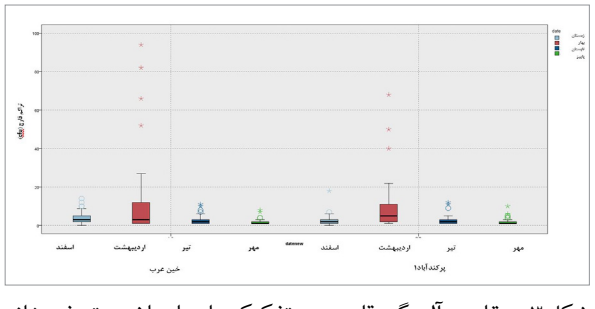
باتوجه‌به شکل (۳) هر دو تصفیه‌خانه در اردیبهشت ماه بیشترین پراکندگی قارچی و سایر ماه‌ها پراکندگی قارچی مشابهی دارند.



شکل ۱- مقایسه آلودگی باکتریایی به تفکیک ماه‌ها میان دو تصفیه‌خانه خین‌عرب و پرکندآباد یک

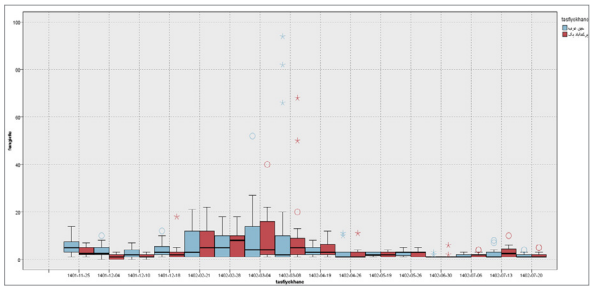


شکل ۲- مقایسه آلودگی باکتریایی به تفکیک جلسات میان دو تصفیه‌خانه خین‌عرب و پرکندآباد یک



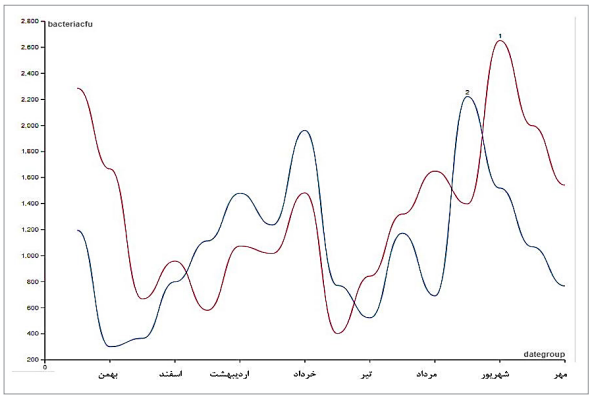
شکل ۳- مقایسه آلودگی قارچی به تفکیک ماه‌ها میان دو تصفیه‌خانه خین‌عرب و پرکندآباد یک

شکل (۴) مربوط به مقایسه آلودگی قارچی میان دو تصفیه‌خانه پرکندآباد یک و خین عرب می‌باشد. این مقایسه به تفکیک در دو تصفیه‌خانه و در شانزده جلسه صورت گرفته است. این نمودار نشان می‌دهد تصفیه‌خانه خین عرب در جلسه هشتم (۱۴۰۲/۰۳/۰۸) بیشترین میزان آلودگی خارج از بازه منطقی و تصفیه‌خانه پرکندآباد یک نیز در جلسه هشتم (۱۴۰۲/۰۳/۰۸) بیشتری میزان آلودگی خارج از بازه منطقی را داشته است. تصفیه‌خانه خین عرب در جلسات پنجم (۱۴۰۲/۰۲/۲۱)، هفتم (۱۴۰۲/۰۳/۰۴) و هشتم (۱۴۰۲/۰۳/۰۸) بیشترین پراکندگی و در جلسات یازدهم (۱۴۰۲/۰۵/۱۹)، دوازدهم (۱۴۰۲/۰۵/۲۶)، سیزدهم (۱۴۰۲/۰۶/۳۰)، چهاردهم (۱۴۰۲/۰۷/۰۶) و شانزدهم (۱۴۰۲/۰۷/۲۰) کمترین پراکندگی را داشته است و تصفیه‌خانه پرکندآباد یک در جلسات پنجم (۱۴۰۲/۰۲/۲۱) و هفتم (۱۴۰۲/۰۳/۰۴) بیشترین پراکندگی و در جلسات سوم (۱۴۰۱/۱۲/۱۰)، چهارم (۱۴۰۱/۱۲/۱۸)، یازدهم (۱۴۰۲/۰۵/۱۹)، سیزدهم (۱۴۰۲/۰۶/۳۰)، چهاردهم (۱۴۰۲/۰۷/۰۶) و شانزدهم (۱۴۰۲/۰۷/۲۰) کمترین پراکندگی را داشته است.



شکل ۴- مقایسه آلودگی قارچی به تفکیک جلسات میان دو تصفیه‌خانه خین‌عرب و پرکندآباد یک *(رنگ آبی تصفیه‌خانه خین عرب - رنگ قرمز تصفیه‌خانه پرکندآبادیک)

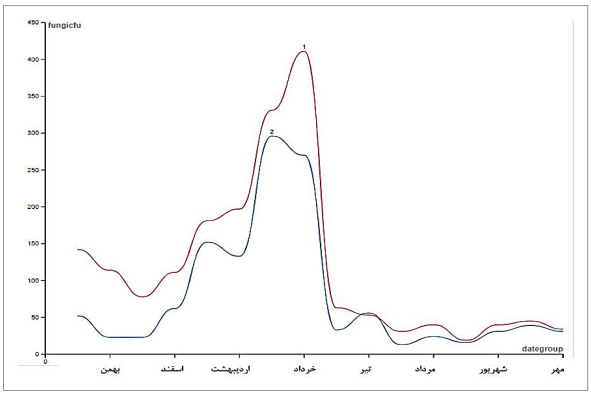
با توجه به شکل (۵) در ابتدا منحنی آبی که نشان‌دهنده تراکم باکتری در پرکندآباد یک است پایین‌تر از منحنی قرمز که نشان‌دهنده تراکم باکتری در خین عرب است قرار دارد. درحالی‌که هر دو منحنی در حال کاهش و سپس افزایش بوده و حرکت نوسانی دارند.



شکل ۵- روند آلودگی باکتریایی دو تصفیه‌خانه خین عرب و پرکندآبادیک

*(رنگ قرمز تصفیه‌خانه خین عرب - رنگ آبی تصفیه‌خانه پرکندآباد یک)

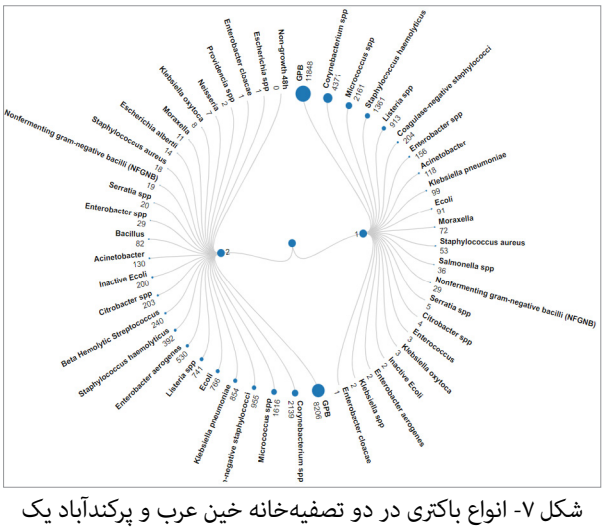
براساس شکل (۶) در ابتدا منحنی آبی که نشان‌دهنده تراکم قارچ در پرکندآباد یک است پایین‌تر از منحنی قرمز که نشان‌دهنده تراکم قارچ در خین عرب است قرار دارد. هر دو منحنی افزایش و سپس کاهش یافته است و در برخی مواقع بسیار به‌هم نزدیک شده‌اند.



شکل ۶- روند آلودگی قارچی دو تصفیه‌خانه خین عرب و پرکندآبادیک

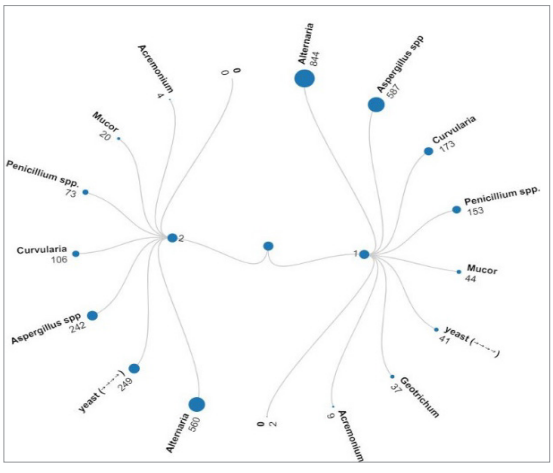
*(رنگ قرمز تصفیه‌خانه خین عرب - رنگ آبی تصفیه‌خانه پرکندآباد یک)

با توجه به شکل (۷) شماره یک تصفیه‌خانه خین عرب و شماره دو تصفیه‌خانه پرکندآباد یک می‌باشد. در این نمودار باکتری GPB با عدد ۱۱۸۴۸ و سپس Corynebacterium spp با عدد ۴۳۷۱ مربوط به تصفیه‌خانه خین عرب که به ترتیب بیشترین مقدار را دارد. همچنین باکتری GPB با عدد ۸۲۰۶ و سپس Corynebacterium spp با عدد ۲۱۳۹ مربوط به تصفیه‌خانه پرکندآباد یک، بیشترین مقدار را دارد.



شکل ۷- انواع باکتری در دو تصفیه‌خانه خین عرب و پرکندآباد یک

در شکل (۸) شماره یک تصفیه‌خانه خین عرب و شماره دو تصفیه‌خانه پرکندآباد یک می‌باشد. قارچ Alternaria با عدد ۸۴۴ و سپس Aspergillus Spp با عدد ۵۸۷ در تصفیه‌خانه خین عرب به ترتیب بیشترین مقادیر را دارد. همچنین Alternaria با عدد ۵۶۰ و سپس Yeast با عدد ۲۴۹ در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک به ترتیب بیشترین مقادیر را دارد.



شکل ۸- انواع قارچ در دو تصفیه‌خانه خین عرب و پرکندآباد یک

بحث

میکروارگانیسم‌های مضر موجود در فاضلاب شامل انواع مختلفی از باکتری‌ها و قارچ‌ها می‌باشند. طبق مطالعات مشابه که توسط Fracchia و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از نمونه‌گیری‌های ثابت انجام شد، دریافتند که سطح انتشار و پراکندگی بیوآئروسل‌ها در تصفیه‌خانه فاضلاب با فصل مرتبط است (F۶). پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که غلظت بیوآئروسل‌ها در تصفیه‌خانه فاضلاب بستگی به مواردی همچون محل نمونه‌گیری (Breza-Boruta و Paluszak، ۲۰۰۷)، نوع میکروارگانیسم‌ها، روش هوادهی (Kruczalak و Olanczuk-Neyman، ۲۰۰۴)، شرایط آب و هوایی (Małecka-Adamowicz و همکاران، ۲۰۱۱)، سرعت باد و رطوبت نسبی دارد (Carducci و همکاران، ۲۰۰۰؛ Karra و Katsivela، ۲۰۰۷). در این مطالعه با درنظر گرفتن تمامی موارد فوق در فاصله ۲ و ۲۰ متری از حوضچه‌های هوادهی به بررسی و مقایسه آلودگی در دو تصفیه‌خانه خین عرب با سیستم هوادهی عمقی و پرکندآباد یک با سیستم هوادهی سطحی پرداخته شد.

روند آلودگی قارچی و باکتریایی در دو تصفیه‌خانه خین عرب و پرکندآباد یک به گونه‌ای بود که، در جلسات مختلف رفتار متفاوتی مشاهده شد، به طوری که بعضی جلسات آلودگی‌های خارج از بازه منطقی، و در مقابل جلساتی پراکندگی آلودگی‌های باکتریایی و قارچی به شدت کم بود.

به‌طورکلی در میانگین آلودگی تصفیه‌خانه خین عرب با سیستم هوادهی عمقی با تصفیه‌خانه پرکندآباد یک با سیستم هوادهی سطحی تفاوت معناداری مشاهده نشد. به این معنا که دو تصفیه‌خانه از نظر میزان آلودگی در مجموع فصول نمونه‌برداری تقریبا رفتار مشابهی داشته‌اند، که عوامل مختلفی مانند: وسعت بیشترحوضچه‌های هوادهی در تصفیه‌خانه خین عرب، واحدهای آلوده بیشتر در تصفیه‌خانه خین عرب و سیستم هوادهی سطحی در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک می‌تواند تاثیرگذار باشد. لیکن تفاوت‌ها به تفکیک متغیرهای پژوهش قابل بررسی بود، که در ادامه به بحث درباره آن پرداخته خواهد شد.

براساس بررسی‌های به‌عمل آمده، ارتباط معناداری بین تراکم باکتری و قارچ با دما وجود دارد، در دماهای پایین (مثل نمونه‌برداری در فصل زمستان) تراکم باکتری‌ها بیشتر بوده ولی با افزایش دما، باکتری‌ها رفتار متفاوتی را نشان دادند، که برای این بررسی، دمای روزهای نمونه برداری به سه گروه تقسیم‌بندی شد؛ دمای کمتر از ۱۴ درجه سانتیگراد، بین ۱۴ تا ۲۴ درجه سانتیگراد و دمای بیشتر از ۲۴ درجه سانتیگراد. همانطور که ذکر شد، بیشترین تراکم باکتری مربوط به دمای کمتر از ۱۴ درجه سانتیگراد و کمترین تراکم مربوط به دمای ۱۴ تا ۲۴ درجه سانتیگراد می‌باشد، با توجه به مشاهدات انجام شده در فصل تابستان که دمای هوا بیشترین مقدار را دارد، تراکم باکتری‌های مورد مشاهده از بقیه فصول کمتر مشاهده شد، که می‌تواند به علت عدم توانایی باکتری‌ها به مقاومت در دمای بالا باشد. درخصوص تراکم قارچ، بیشترین میزان آلودگی مربوط به دمای بالاتر از ۲۴ درجه و کمترین میزان آلودگی قارچی مربوط به دمای ۱۴ تا ۲۴ بوده است.

طبق آنالیز آماری، آلودگی باکتری در تمام فصول به استثنا فصل بهار در تصفیه‌خانه خین عرب، بیشتر از پرکندآباد یک بوده است. باتوجه‌به وسعت بیشتر واحدهای آلوده در تصفیه‌خانه خین عرب این مسئله قابل توجیه می‌باشد.

روند آلودگی قارچی در دو تصفیه‌خانه تقریبا مشابه بوده است و از نظر آماری تفاوت معناداری مشاهده نشده است.

همچنین برای تاثیر سیستم‌های هوادهی بر آلودگی محیطی، فواصل نزدیک (۲ و ۲۰ متر) در نظر گرفته شد؛ طبق این بررسی‌ها، تصفیه‌خانه خین عرب آلودگی بیشتری نسبت به تصفیه‌خانه پرکندآباد یک دارد. باوجود سیستم هوادهی سطحی در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک، که ذرات آلوده را بیشتر به محیط اطراف پراکنده می‌کند، ولی با توجه به وجود فضاهای آلوده بیشتر (شامل، واحد لجن، واحد دانه‌گیر، دپو لجن) در تصفیه‌خانه خین عرب و همچنین وسعت بیشتر حوضچه‌های هوادهی این نتیجه قابل توجیه می‌باشد.

بررسی تراکم آلودگی باکتری و قارچی دو تصفیه‌خانه در سرعت باد مختلف، نشان داد تفاوت معناداری میان سرعت باد، با تراکم باکتری و قارچ وجود دارد. تراکم باکتری در سرعت باد بیشتر از ۱۲ کیلومتر بر ساعت، بیشترین میزان و در سرعت باد کمتر از ۷ کیلومتر بر ساعت، کمترین میزان خود را داشته است. درخصوص تراکم قارچ، کمترین میزان آلودگی مربوط به سرعت باد بین ۷ تا ۱۲ کیلومتر بر ساعت بوده است و در سایر سرعت‌های باد رفتار مشابهی از خود نشان داده است.

جهت بررسی ارتباط متغیرهای پژوهش با تراکم باکتری و قارچ آزمون همبستگی اسپیرمن انجام شد و نتایج آن نشان داد تراکم باکتری با فاصله نمونه‌برداری، سرعت باد، رطوبت، دما و روز

نمونه‌برداری ارتباط معنادار دارد و تراکم قارچ با دما، سرعت باد، رطوبت و روز نمونه برداری ارتباط معناداری دارد.

مطالعات مشابه دیگر مانند مطالعه‌ای که توسط Fernando و Fedorak (۲۰۰۵)، Schmid و Puxbaum (۲۰۰۲)، Gotkowska-Płachta و همکاران (۲۰۱۳)، Małecka-Adamowicz و همکاران (۲۰۱۱)، Oppliger و همکاران، (۲۰۰۵)، Wlazło و همکاران (۲۰۰۲)، Bauer و همکاران (۲۰۰۲) و Xu و همکاران (۲۰۱۸) انجام شد، سیستم هوادهی را عامل اصلی انتشار بیوآئروسل‌ها معرفی کردند. اما باتوجه‌به نتایج متفاوت مطالعه حاضر می‌توان این‌اینگونه عنوان کرد که عوامل مداخله‌گر می‌توانند تاثیر زیادی در میزان آلودگی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری داشته باشند.

بنابراین در معرض قرار گرفتن کارکنان تصفیه‌خانه مخصوصا در مرحله هوادهی باید کاهش یابد تا از میزان ابتلای آن‌ها به بیماری‌هایی که بر اثر میکروارگانیسم‌های مضر موجود در تصفیه‌خانه‌ها ناشی می‌شود، کاسته شود. همچنین تسهیلات مناسبی برای بهداشت شخصی ازجمله حمام و اتاق‌های تعویض لباس می‌تواند خطر آلودگی را به حداقل برساند (LeChevallier و همکاران، ۲۰۲۰)

بیشترین جنس و گونه‌های باکتری‌های مورد مشاهده در دو تصفیه‌خانه شامل، باسیل‌های گرم مثبت و کورینه باکتریوم بود، مطالعات مشابه که توسط Prazmo و همکاران، (۲۰۰۳) و Kaarakainen و همکاران، (۲۰۱۱) و Gangamma و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد، نشان داد باکتری‌های گرم مثبت بیشترین میکروارگانیسم‌های موجود در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری بوده‌اند. بیشترین گونه‌های قارچی مورد مشاهده در تصفیه‌خانه خین عرب با سیستم هوادهی عمقی آلترناریا و پس از آن آسپرژیلوس بود، در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک با سیستم هوادهی سطحی بیشترین گونه قارچی مورد مشاهده اول آلترناریا و بعد از آن مخمر بوده است.

در رابطه با قارچ‌های مورد مشاهده می‌توان گفت؛ گونه آلترناریا بیشتر در نزدیکی سیستم‌های هوادهی، گونه کورووولاریا در مناطق دورتر از حوضچه‌های هوادهی، به ویژه در نواحی خاکی، مشاهده شد. برخی گونه‌ها مانند موکور اصلا در فصل زمستان مشاهده نشد، پنیسیلیوم در تمام فصول مشاهده شد ولی تراکم بیشتری در روزهایی که دمای محیط پایین‌تر بود، داشت.

به‌طورکلی، میانگین تراکم باکتری در تصفیه‌خانه خین عرب ۲۶/۹۸ CFU و در پرکند آباد یک ۲۶/۱۱ CFU گزارش شد. میانگین تراکم قارچ در تصفیه‌خانه خین عرب ۴/۷۱ CFU و در پرکندآباد یک ۴/۴۰ CFU گزارش شد.

اما نتیجه‌گیری به تفکیک متغیرهای پژوهش؛ در تصفیه‌خانه خین‌عرب، بیشترین آلودگی باکتریایی از حوضچه یک به سمت حوضچه اندازه‌گیری بای پس و کمترین آن مربوط به سمت هاضم لجن بود. بیشترین آلودگی قارچی مربوط به جهت هاضم لجن و کمترین آن از سمت حوضچه دوازده تا درب ورودی بود. همچنین در مقایسه با واحدهای سرپوشیده، واحد لجن بیشترین آلودگی را داشت. در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک، بیشترین آلودگی باکتریایی مربوط به جهت نزدیک مقسم و کمترین آن مربوط به سمت ته‌نشینی شرقی بود. بیشترین آلودگی قارچی مربوط به جهت مقسم و کمترین آن مربوط به جهت ته‌نشینی غربی بود. همچنین یکی دیگر از مشاهدات این پژوهش بررسی میزان آلودگی درفضاهای سرپوشیده بود، طبق بررسی‌های انجام شده واحد لجن و آزمایشگاه از نظر باکتری و قارچ آلوده‌ترین مکان‌های بسته بودند. آلوده‌ترین فصل در تصفیه‌خانه خین عرب فصل زمستان و در تصفیه‌خانه پرکندآباد یک فصل بهارگزارش شد. طبق مطالعات مشابه که توسط Fracchia و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از نمونه‌گیری‌های ثابت انجام شد، دریافتند که سطح انتشار و پراکندگی بیوآئروسل‌ها در تصفیه‌خانه فاضلاب با فصل مرتبط است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از مسئولین محترم تصفیه‌خانه خین عرب و پرکندآباد یک به دلیل همکاری صمیمانه در طول دوره پژوهش داشتند تشکر و قدردانی نمایند. این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی با عنوان مقایسه تأثیر روش هوادهی سطحی و عمقی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری بر تراکم و نوع باکتری‌ها و قارچ‌های هوابرد (مطالعه موردی تصفیه‌خانه فاضلاب خین عرب و پرکندآباد یک)، مصوب سال ۱۴۰۱ به کد ۸۱۳ می‌باشد که با حمایت شرکت آب و فاضلاب مشهد اجرا شده است.

منابع

Bauer, H., Fuerhacker, M., Zibuschka, F., Schmid, H., & Puxbaum, H. (2002). Bacteria and fungi in aerosols generated by two different types of wastewater treatment plants. Water Research, 36(16), 3965-3970.

Breza-Boruta, B., & Paluszak, Z. (2007). Influence of Water Treatment Plant on Microbiological Composition of Air Bioaerosol. Polish Journal of Environmental Studies, 16(5), 663-670.

Carducci, A., Tozzi, E., Rubulotta, E., Casini, B., Cantiani, L., Rovini, E., & Pacini, R. (2000). Assessing airborne biological hazard from urban wastewater treatment. Water Research, 34(4), 1173-1178.

Fernando, N. L., & Fedorak, P. M. (2005). Changes at an activated sludge sewage treatment plant alter the numbers of airborne aerobic microorganisms. Water Research, 39(19), 4597-4608. doi: 10.1016/j.watres.2005.08.010

LeChevallier, M. W., Mansfield, T. J., & Gibson, J. M. (2020). Protecting wastewater workers from disease risks: Personal protective equipment guidelines. Water Environment Research, 92(4), 524-533. doi: 10.1002/wer.1249

Li, L., Gao, M., & Liu, J. (2011). Distribution characterization of microbial aerosols emitted from a wastewater treatment plant using the Orbal oxidation ditch process. Process Biochemistry, 46(4), 910-915. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.12.016

Małecka-Adamowicz, M., Donderski, W., & Dokładna, W. (2011). Microflora of Air in the Sewage Treatment Plant of Kapuściska in Bydgoszcz. Polish Journal of Environmental Studies, 20(5), 1235-1242.

Niazi, S., Hassanvand, M. S., Mahvi, A. H., Nabizadeh, R., Alimohammadi, M., Nabavi, S., & Moradi-Joo, M. (2015). Assessment of bioaerosol contamination (bacteria and fungi) in the largest urban wastewater treatment plant in the Middle East. Environmental Science and Pollution Research, 22, 16014-16021. doi: 10.1007/s11356-015-4793-z

Oppliger, A., Hilfiker, S., & Vu Duc, T. (2005). Influence of seasons and sampling strategy on assessment of bioaerosols in sewage treatment plants in Switzerland. Annals of Occupational Hygiene, 49(5), 393-400. doi: 10.1093/annhyg/meh108.

Prazmo, Z., Krysinska-Traczyk, E., Skorska, C., Sitkowska, J., Cholewa, G., & Dutkiewicz, J. (2003). Exposure to bioaerosols in a municipal sewage treatment plant. Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 10(2), 241-8.

Wang, Y., Li, L., Xiong, R., Guo, X., & Liu, J. (2019). Effects of aeration on microbes and intestinal bacteria in bioaerosols from the BRT of an indoor wastewater treatment facility. Science of the total environment, 648,1453-1461 . doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.244

Wlazło, A., Pastuszka, J. S., & Łudzeń-Izbińska, B. (2002). Assessment of workers' exposure to airborne bacteria at a small wastewater treatment plant. Medycyna pracy, 53(2), 109-114.

Xu, G., Han, Y., Li, L., & Liu, J. (2018). Characterization and source analysis of indoor/outdoor culturable airborne bacteria in a municipal wastewater treatment plant. Journal of Environmental Sciences, 74, 71-78. https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.02.007

Fracchia, L., Pietronave, S., Rinaldi, M., & Martinotti, M. G. (2006). Site-related airborne biological hazard and seasonal variations in two wastewater treatment plants. Water Research, 40(10), 1985-1994. doi: 10.1016/j.watres.2006.03.016

Gangamma, S., Patil, R., & Mukherji, S. (2011). Characterization and proinflammatory response of airborne biological particles from wastewater treatment plants. Environmental science & technology, 45(8), 3282-3287. doi: 10.1021/es103652z

Gotkowska-Płachta, A., Filipkowska, Z., Korzeniewska, E., Janczukowicz, W., Dixon, B., Gołaś, I., & Szwalgin, D. (2013). Airborne microorganisms emitted from wastewater treatment plant treating domestic wastewater and meat processing industry wastes. CLEAN–Soil, Air, Water, 41(5), 429-436. https://doi.org/10.1002/clen.201100466

Heinonen-Tanski, H., Reponen, T., & Koivunen, J. (2009). Airborne enteric coliphages and bacteria in sewage treatment plants. Water Research, 43(9), 2558-2566. https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.006

Kaarakainen, P., Rintala, H., Meklin, T., Kärkkäinen, P., Hyvärinen, A., & Nevalainen, A. (2011). Concentrations and diversity of microbes from four local bioaerosol emission sources in Finland. Journal of the Air & Waste Management Association, 61(12), 1382-1392. doi: 10.1080/10473289.2011.628902

Karra, S., & Katsivela, E. (2007). Microorganisms in bioaerosol emissions from wastewater treatment plants during summer at a Mediterranean site. Water Research, 41(6), 1355-1365. https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.014

Kermani, M., Dehghani, A., Farzadkia, M., Nadafi, K., Bahrami Asl, F., & Zeinalzadeh, D. (2015). Investigation of airborne bactria and fungi in Tehran's Shahrake Ghods WWTP and its association with environmental parameters. Journal of Health, 6(1), 57-68. .

Kowalski, M., Wolany, J., Pastuszka, J., Płaza, G., Wlazło, A., Ulfig, K., & Malina, A. (2017). Characteristics of airborne bacteria and fungi in some Polish wastewater treatment plants. International Journal of Environmental Science and Technology, 14, 2181-2192. doi: 10.1007/s13762-017-1314-2

Kruczalak, K., & Olanczuk-Neyman, K. (2004). Microorganisms in the Air Over Wastewater Treamtment Plants. Polish Journal of Environmental Studies, 13(5), 537-542