



## بررسی کارایی پلاسمای اسپارک با تخلیه مستقیم در محیط آبی و کنترل رشد مجدد آلودگی زیستی پساب فاضلاب شهری

عطیه باریکانی<sup>۱</sup>، مارال خدادادی<sup>۲\*</sup>، ساناژ خرمی پور<sup>۱</sup>

۱. گروه محیط‌زیست، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، صندوق پستی: ۱۴۶۸۷۶۳-۷۸۵ تهران، ایران

۲. پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶ کرج- ایران

\*Email: mkhodadadi@aeoi.org.ir

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۵/۲۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۳/۱۰

### چکیده

هدف مطالعه حاضر بررسی کارایی گندздایی و کنترل رشد مجدد آلودگی زیستی پساب فاضلاب شهری با استفاده از تیمار پلاسمای سرد اتمسفری است. پساب ثانویه تصفیه‌خانه تهران جنوب با استفاده از پلاسمای اسپارک در دو ولتاژ ۲۰ و ۲۵ کیلوولت و زمان‌های ۱، ۳ و ۶ دقیقه با استفاده از گاز اکسیژن تیمار شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قبل و بعد هر تیمار اندازه‌گیری شدند. کارایی گندздایی براساس تعیین تعداد کل کلنی و کلیفرم کل در پساب ثانویه و خروجی تیمارها، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر  $BOD_5$  و COD و نیتروژن کل در هر دو تیمارها به کمتر از حد مجاز برای مصارف کشاورزی رسید لیکن این کاهش به طور معنی‌داری در ولتاژ بالاتر بیشتر بود. کارایی گندздایی در زمان شروع آزمایش در هر دو تیمار ۱۰۰ درصد بود، لیکن تنها پس از گذشت یک روز در همه تیمارها جمعیت کلیفرم کل بیشتر از حد مجاز بود که لزوم بررسی رشد مجدد میکروبی را در زمان بررسی روش‌های مختلف گندздایی ثابت می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که پلاسما اسپارک استفاده شده تأثیری در غیرفعال‌سازی دائمی و غیرقابل برگشت کلیفرم کل نداشت و رشد مجدد میکروبی رخ داد.

**کلیدواژه‌ها:** پلاسمای سرد اتمسفری، گندздایی، رشد مجدد میکروبی، پساب شهری

## Evaluation of direct-in-liquid spark plasma on disinfection effectiveness and regrowth control of microbial contamination in urban wastewater

Atiyeh Barikani<sup>1</sup>, Maral Khodadadi<sup>2\*</sup>, Sanaz Khorami Pour<sup>1</sup>

1. Department of Environment, Management Faculty, Islamic Azad University, West Tehran Branch, P.O. Box: 1468763-785 Tehran, Iran  
2. Nuclear agriculture research school, Nuclear Science and Technology Institute, P.O. Box: 14395-836 Karaj, Iran.

### Research Article

Received 13.8.2019, Accepted 30.5.2020

### Abstract

The aim of present study is to evaluate the disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in urban wastewater effluent using cold atmospheric plasma. Two voltages of spark of 20 and 25 kV were applied to wastewater samples of Tehran wastewater treatment plant, Tehran, Iran on 1, 3, and 6 min using oxygen gas supply. The physicochemical characteristics of the effluent sample were determined before and after the treatments. The disinfection efficiency was assessed based on the total colony count and total coliform. The results showed that the COD,  $BOD_5$ , and the total nitrogen became less than the maximum allowed for agriculture purposes in both treatments, however, this reduction was significantly more in the higher voltage. In terms of bacterial regrowth after disinfection, disinfection efficiency was 100 percent at the beginning of the experiment in all spark treatments, however, total coliform population has become higher than the allowed limit after only one day. This confirms the importance of investigating microbial regrowth in wastewater disinfection studies. The spark plasma had no effect on permanent and irreversible inactivation of the total coliform and microbial regrowth occurred.

**Keywords:** Cold atmospheric plasma, Disinfection, Microbial regrowth, Urban wastewater.



## ۱. مقدمه

[۹، ۸]. از این‌رو روش پلاسمای سرد اتمسفری در این تحقیق

مورد بررسی قرار گرفته است.

پلاسمای به عنوان حالت چهارم ماده شناخته شده است که برای تشکیل آن باید دمای گاز افزایش یابد که این امر موجب افزایش انرژی مولکولی و تغییر حالت ماده می‌شود و گازی از اتم‌ها شکل می‌گیرد که ذرات باردار، الکترون‌ها، یون‌های مثبت و ذرات خنثی آزادانه حرکت می‌کنند. طبقه‌بندی پلاسمای بر اساس سطوح دارای انرژی نسبی در الکترون‌ها و گونه‌های سنگین پلاسمای سرد اتمسفری نوع خاصی از پلاسما است که در نقطه کاربرد دمایی کمتر از  $10^4$  درجه فارنهایت یا  $40$  درجه سلسیوس دارد [۹، ۸].

تخليه الکتریکی پلاسمای در محیط آبی منجر به نتایج فیزیکی و شیمیایی مختلفی نظیر شکل‌گیری اولیه گونه‌های اکسیده رادیکال‌ها ( $H\cdot$ ،  $O\cdot$  و  $OH\cdot$ )، مولکول‌ها ( $H_2O_2$  و  $O_3$ )، موچ شوک<sup>۵</sup> و اشعه ماورابینفس می‌شود [۱۰-۱۲]. در کل عواملی مختلفی مثل سیستم راکتور، الکترود، انرژی ورودی، pH محلول، نوع گاز ورودی، دما و رسانایی محلول می‌توانند بر عملکرد سیستم‌های پلاسمای تأثیر بگذارند [۱۳].

انواع مختلفی از پلاسمای سرد اتمسفری وجود دارد. یکی از انواع مؤثر در حذف آلاینده‌های آلی پلاسمای اسپارک است. کیم و همکاران [۱۴] به طور موقت‌آمیزی از پلاسمای اسپارک جهت کاهش بار میکروبی آب خنک‌کننده سیستم‌های هیدرولیکی استفاده کردند [۱۴]. هر چند برخی محققین تخلیه سد دی‌الکتریک<sup>۶</sup> (DBD) با تخلیه پایدار و یکنواخت را مؤثرترین نوع آن جهت حذف آلاینده‌های آلی دانسته‌اند [۱۵، ۹]. با وجودی که در این نوع پلاسمای تخلیه با اعمال ولتاژ بالای متناسب بین دو الکترود انجام گرفته و وجود یک لایه دی‌الکتریک مانع از عبور جریان شدید میان دو الکترود و وقوع آرک و جرقه می‌گردد، لیکن بهره‌وری انرژی روش اسپارک به مراتب بیشتر است [۱۶]. از این‌رو از این نوع پلاسمای در این تحقیق استفاده گردید.

هر چند محققین مختلف پلاسمای سرد اتمسفری را روشی مؤثر در گندزدایی آب و پساب معرفی نموده‌اند؛ به عنوان مثال کیم و همکاران [۱۴]، هرناندز آریاس و همکاران [۱۷]، گرینویچ و همکاران [۱۸]، ون‌نگایون و همکاران [۱۹]، محمد و همکاران [۲۰]، هازمی و همکاران [۲۱]، نجومیم و همکاران [۲۲]، ستوه [۲۳]، ستو [۲۴]، کوریاکا و همکاران [۲۵]، پنتاگ و همکاران [۲۶، ۲۷]، اومنیگن و همکاران [۲۸] و لیو و همکاران [۲۹]. لیکن، براساس دانش نویسنده‌گان تاکنون تحقیقات بسیار محدودی، همچون السید و همکاران [۹]، در

امروزه، با توجه به ارتقا سطح استانداردهای رفاهی، گسترش شهرنشینی و رشد روزافزون جمعیت، میزان سرانه مصرف آب افزایش یافته است [۱]. یکی از مشکلات جدی جوامع بهویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تأمین آب کافی و با کیفیت مناسب است. با توجه به بحران کمبود آب در ایران، استفاده از آب‌های نامتعارف نظیر فاضلاب شهری در بخش کشاورزی یکی از راهکارهای مقابله با این مشکل است. در کشور از میزان ۳/۹ میلیارد مترمکعب فاضلاب شهری ایجاد شده، تنها ۹٪ آن تصفیه و ۹۱٪ دیگر بدون تصفیه وارد چاههای جذبی، رودخانه‌ها و یا زمین‌های کشاورزی می‌شود [۲].

پساب فاضلاب شهری بسته به منشأ آن‌ها دارای انواع آلوگی‌های میکروبی، آلی و معدنی بوده و استفاده کشاورزی یا رهاسازی آن‌ها در محیط‌زیست می‌تواند خطرناک باشد. گندزدایی پساب نهایی تصفیه‌خانه فاضلاب، یکی از مهم‌ترین مراحل تصفیه فاضلاب بوده که جهت حفاظت منابع آب و یا استفاده مجدد از آن انجام می‌پذیرد. در کشورهای در حال توسعه برای گندزدایی عمده‌اً از روش‌های شیمیایی مبتنی بر ترکیب‌های کلر بهدلایل سهولت کاربرد و هزینه کمتر استفاده می‌کنند [۳]. لیکن این روش بهدلیل مخاطرات زیست‌محیطی ترکیب‌های کلر که محصولات ناخواسته گندزدایی DBPs<sup>۷</sup> از قبیل تری‌الومتان‌ها<sup>۸</sup> را که ترکیب‌های سمی و مقاوم‌تر از ترکیب‌های اولیه هستند را تولید می‌کنند، تقریباً منسخ شده است. از طرفی باقی‌مانده کلر حتی در مقداری کم برای آبزیان سمی است در نتیجه حذف کلر ضروری می‌باشد. در کل با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی نیاز به استفاده از روش‌های ایمن‌تر گندزدایی پساب می‌باشد. یک مشکل عمده دیگر در ارتباط با فرایند گندزدایی این است که میکرووارگانیسم‌ها می‌توانند پس از تخریب بازسازی شوند و در نتیجه رشد مجدد باکتریایی رخ دهد [۴]. بنابراین، استفاده از روش‌های نوین گندزدایی ضروری است [۵].

امروزه روش‌های اکسیداسیون پیشرفته<sup>۹</sup> به عنوان یک روش جایگزین مطرح گردیده است. روش اکسیداسیون پیشرفته طیف وسیعی شامل ازن، اشعه ماورابینفس، تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا، کاویتاسیون، فنتون، پلاسمای ... است [۶] که این فرایندها پتانسیل زیادی برای رفع انواع آلوگی‌ها دارند [۷]. امروزه استفاده از فناوری پلاسمای سرد اتمسفری<sup>۱۰</sup>، به عنوان یکی از روش‌های اکسیداسیون پیشرفته، برای حذف آلاینده‌های آلی در محیط‌های آبی عمده‌اً بهدلیل سازگاری محیط‌زیست و راندمان حذف بالا مورد توجه قرار گرفته است

1. Disinfection By-Products

2. Trihalomethane

3. Advanced Oxidation Processes

4. Cold Atmospheric Plasma (CAP)

### 5. Shock Wave

### 6. Dielectric Barrier Discharge (DBD)



مثال، هیدرولیز آب مایع،  $\text{OH}^-$  و هیدروژن تولید می‌کند. تولید  $\text{OH}^-$  منجر به تولید پراکسید هیدروژن با عمر بالا می‌شود. این تخلیه مستقیم همچنین موج شوک و UV را تولید می‌کند که در تخریب آلاینده‌های آلی در محلول از جمله میکرووارگانیسم‌ها بسیار مؤثر است. هر چند این روش انرژی ورودی بالایی نیاز دارد، لیکن می‌تواند به طور مستقیم در مایع رادیکال آزاد تولید کند [۳۲]. در روش غیرمستقیم، تخریب بر اساس انتشار پلاسما در محلول استوار است. الکترون‌های آزاد در سطح مایع، تولید  $\text{OH}^-$  می‌کند. گونه‌های گازی مانند اکسیژن واکنش‌پذیر و گونه‌های نیتروژن همراه با پراکسید هیدروژن تولید می‌شود که در آب نفوذ می‌کنند. ولتاژ مورد نیاز برای شروع تخلیه غیرمستقیم در مقایسه با تخلیه مستقیم کمتر می‌باشد و از لحاظ مصرف انرژی مقرر به صرفه‌تر از روش مستقیم است. در روش حبابی، پلاسما در داخل حباب تزریق شده در آب تولید می‌شود. در این حالت، حباب‌ها به عنوان حمل‌کننده‌های گونه‌های اکسیژن واکنشی عمل می‌کنند [۳۳-۳۵]. به دلیل کارایی زیاد روش تخلیه مستقیم در محلول در از بین بردن آلاینده‌های آلی، در مطالعه حاضر از این روش استفاده شد.

از طرفی نوع گاز ورودی تأثیر مستقیم بر رادیکال‌های آزاد و گونه‌های فعال بر یونیزاسیون دارد. عطری و همکاران [۱۵] در تصفیه فاضلاب توسط پلاسمای سرد اتمسفری از نوع تخلیه سد دی الکتریک از مخلوط گازهای مختلف در راکتور پلاسما تخلیه سد دی الکتریک استفاده نمودند (هوا و ترکیب هوا دیگر گازها مانند اکسیژن، نیتروژن و آرگون). نتایج آن‌ها نشان داد که گاز اکسیژن، کارایی بیشتری در تصفیه پساب نسبت به هوا، گاز نیتروژن و گاز آرگون داشت. هرناندز آریاس و همکاران [۱۷] نیز گزارش نمودند که تزریق گاز اکسیژن در سیستم سد دی الکتریک پالسی در مقایسه با هوا کارایی غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی را به طور معنی‌داری افزایش داد. دلیل این امر را چنین توضیح دادند، زمانی که هوا داخل سیستم تزریق می‌گردد، تعداد زیادی مولکول  $\text{N}_2$  برانگیخته و داخل مایع نیتروژن می‌شود، لیکن در صورت تزریق اکسیژن رادیکال‌های OH در محلول غالب می‌شوند. در واقع ارتباط معنی‌داری بین تزریق می‌شود. حضور رادیکال‌های هیدروکسیل و غیرفعال‌سازی باکتریایی وجود دارد. همچنین گزارش شده است در صورت استفاده از هوا در سیستم‌های تخلیه سد دی الکتریک، غلظت نیترات و نیتریت را به دلیل وجود نیتروژن در هوای مرطوب به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۱۸، ۱۹]. در واقع در محفظه پس از ورود گاز اکسیژن و اعمال اختلاف پتانسیل عمل یونیزاسیون و واکنش‌های زنجیره‌ای پس از آن شروع شده و گونه‌های فعال شیمیایی اکسیژن، رادیکال‌های آزاد، امواج مرئی و فرابنفش و موج شوک با محیط پساب واکنش می‌کنند.

رابطه با غیرفعال‌سازی دائمی میکروارگانیسم‌ها با استفاده از پلاسمای سرد اتمسفری در محیط آبی گزارش شده است. در نتیجه نیاز به بررسی بیشتر تأثیر پلاسمای سرد اتمسفری بر کارایی گندزدایی و کنترل رشد مجدد میکروبی پساب می‌باشد. از این‌رو با توجه به معاایب روش‌های متداول گندزدایی پساب فاضلاب از قبیل مشکلات زیستمحیطی، عدم گندزدایی کامل و رشد مجدد بیمارگرها از یک سو و اطلاعات محدود در ارتباط با کارایی روش‌های مختلف گندزدایی بر رشد مجدد ریزجانداران از سوی دیگر، مطالعه حاضر جهت بررسی کارایی پلاسمای سرد اتمسفری در رشد مجدد آلوگی زیستی پساب فاضلاب شهری صورت گرفته است.

## ۲. مواد و روش‌ها

نمونه‌های پساب ثانویه از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری جنوب تهران جمع‌آوری شد. این تصفیه‌خانه با شدت جریانی معادل  $45000$  متر مکعب در روز، جمعیتی معادل  $2/1 \times 10^6$  نفر را پوشش می‌دهد. نوع فرایند تصفیه فاضلاب از نوع لجن فعال همراه با حذف نیتروژن است و پساب تصفیه شده جهت آبیاری زمین‌های کشاورزی دشت ورامین استفاده می‌شود [۳۰]. فرایند تصفیه پساب در این تصفیه‌خانه شامل پمپاژ، غربالگری حذف شن، روغن و گریس، تنه‌نشینی اولیه، مخازن هوازی و لجن فعال، تنه‌نشینی ثانویه و واحد کلرزنی است. نمونه‌های پساب مورد آزمایش قبل از واحد کلرزنی در ظروف استریل تیره جمع‌آوری شده و برای جلوگیری از تغییر کیفیت در کوتاه‌ترین زمان ممکن و در درجه حرارت پایین (حدود  $4^\circ\text{C}$ ) درجه سانتی گراد) به آزمایشگاه انتقال داده شدند.

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی شامل pH، EC، کدورت<sup>۱</sup>، اکسیژن موردنیاز شیمیایی (COD)<sup>۲</sup>، اکسیژن موردنیاز بیولوژیکی<sup>۳</sup> (BOD<sub>5</sub>)، میزان فسفات کل، نیتروژن کل، آمونیم و نیترات در پساب ثانویه و پساب تیمار شده اندازه‌گیری شدند. از روش‌های استاندارد تجزیه آب و پساب [۳۱] برای این منظور استفاده شد، شامل اکسیژن موردنیاز شیمیایی (روش  $5220\text{D}$ ، اکسیژن موردنیاز بیولوژیکی (روش  $5210\text{B}$ ، کدورت (روش  $2130\text{B}$ ، نیتروژن کل (روش  $4500\text{B}$ ، نیترات (روش  $4500\text{B}$ ، آمونیم (روش  $4500\text{B}$ ، فسفات (روش  $4500\text{-PE}$ ) و کل مواد جامد معلق (TSS) (روش  $5904$ ).

پلاسمای سرد اتمسفری می‌تواند به صورت‌های مختلف؛ شامل روش مستقیم، غیرمستقیم و حبابی، وارد محیط آبی شوند [۳۲]. در روش مستقیم، الکترودها در آب مایع غوطه‌ور می‌شوند. مسیر یونیزاسیون جریان، که عموماً چند شاخه است، منبع تولید رادیکال‌های اکسیژن واکنشی است. به عنوان

1. Turbidity

2. Chemical oxygen demand

3. Biological oxygen demand



کارایی گندزدایی با استفاده از تعیین تعداد کل کلنی‌ها و کلیفرم کل به عنوان شاخص عوامل بیماری‌زای باکتریایی در نمونه‌های پساب ثانویه و خروجی هر یک از تیمارها، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از روش شمارش پلیت<sup>۲</sup> (۹۲۱۵ ب) استفاده شد و نتایج برحسب واحد تشکیل‌دهنده کلنی<sup>۳</sup> در میلی‌لیتر گزارش گردید. نمونه‌ها بر روی دو محیط کشت نوترینت آگار و محیط کشت ویولت رد بایل آگار به ترتیب برای کل کلنی‌ها و کلیفرم کل و در دمای  $37 \pm 0.5$  درجه سانتی‌گراد به مدت  $48 \pm 2$  ساعت در انکوباتور نگهداری شدند و تغییرات روزانه در مدت انکوباسیون پایش شد و تعداد کلنی‌ها به صورت دستی شمارش شدند. جهت رشد مجدد میکروارگانیسم‌ها نمونه‌های تیمارشده به مدت ۵ روز و در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد در شرایط تاریک و ۱۰۰ دور در دقیقه، در شیکر انکوباتور نگهداری شدند. در روزهای اول، سوم و پنجم یک میلی‌لیتر از نمونه جهت بررسی رشد مجدد کل کلنی‌ها و باکتری کلیفرم کل جمع‌آوری شد. آزمون در سه تکرار صورت پذیرفت. نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS به طور توصیفی و تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفت. از آزمون دانکن ( $p < 0.05$ ) جهت بررسی اختلاف معنی‌دار در میانگین تیمارهای مختلف استفاده شد.

### ۳. نتایج و بحث

۱۳ خصوصیات فیزیکی شیمیایی پساب ثانویه و تیمار شده از آنجایی که مواد شیمیایی آلی موجود در پساب برای موجودات آبزی خطرناک است، بدون توجه به نوع گندزدایی، بایستی قبل از گندزدایی کنترل شوند [۳۶]. خصوصیات شیمیایی پساب ثانویه قبل از گندزدایی و پس از هر تیمار اندازه‌گیری شد (جدول ۱). pH و هدایت الکتریکی پساب ثانویه به ترتیب برابر با  $7/4$  و  $0/۹۳$  دسی‌زیمنس بر متر بود. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، پلاسمای اسپارک باعث کاهش قابل ملاحظه مقادیر نیتروژن کل، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی شده است.

مقدار اکسیژن مورد نیاز شیمیایی از  $۸۰/۵$  میلی‌گرم در لیتر در پساب ثانویه قبل از گندزدایی به مقادیر  $۳۶/۶7$  و  $۳۴/۳۳$  به ترتیب برای اسپارک ولتاژهای  $۲۰$  و  $۲۵$  کیلوولت کاهش یافته است. مقدار اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی نیز از  $۳۷۳/۶7$  میلی‌گرم در لیتر در پساب ثانویه قبل از گندزدایی به مقادیر  $۲۱/۶7$  و  $۱۷/۲7$  میلی‌گرم در لیتر به ترتیب در اسپارک ولتاژ  $۲۰$  و  $۲۵$  کیلوولت کاهش یافته است. هم‌چنین نیتروژن کل که مقدار آن در پساب ثانویه قبل از گندزدایی  $۲۱/۲8$  میلی‌گرم در لیتر بوده، در تیمار اسپارک  $۲۰$  کیلوولت  $۱۴/۹8$  و اسپارک  $25$  کیلوولت  $۱۴/۳4$  میلی‌گرم در لیتر شده است. در

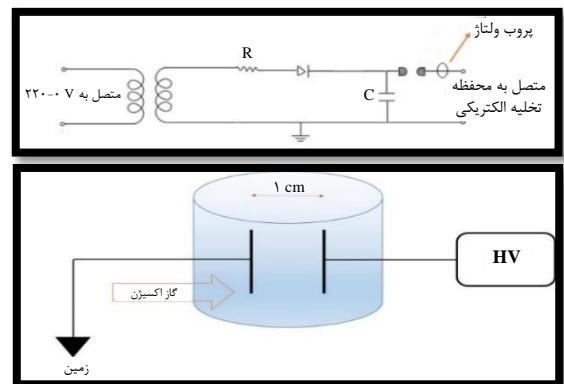
2. Plate count method

3. Colony Forming Units (CFU)

هم‌چنین سرعت جریان گاز و فشار آن نیز حائز اهمیت است. افزایش جریان گاز، جریان شار گونه‌های فعال و اثربخشی تابش را افزایش می‌دهد. افزایش فشار گاز می‌تواند اثرات رقابتی در فرایند استریلیزه کردن داشته باشد. هم‌چنین ولتاژ ورودی و توان نیز بایستی انتخاب گردد. زیرا افزایش ولتاژ و توان سبب افزایش تولید الکترون آزاد و گونه‌های واکنشی فعال می‌شود.

به دلیل این‌که سیستم تخلیه سد دی‌الکتریک موجود در پژوهشکده لیزر و پلاسمای دانشگاه شهید بهشتی، در مقایسه با سیستم اسپارک موجود، امکان ایجاد شدت جریان الکتریکی کمتری داشته و مصرف برق آن نیز به مراتب بیشتر از اسپارک می‌باشد (۱۵۰۰۰۰ ژول در دقیقه در مقابل  $70$  ژول در دقیقه)، پلاسمای اسپارک جهت این تحقیق انتخاب شد. از طرفی با توجه به این‌که سیستم اسپارک برخلاف پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک موج شوک ایجاد می‌کند که تأثیر زیادی در غیرفعال‌سازی میکروارگانسیم‌ها دارد. گاز اکسیژن کارایی بالاتری در تصفیه پساب دارد، از این‌رو در این مطالعه گاز ارودی اکسیژن انتخاب شد.

مشخصات دستگاه استفاده شده در ادامه آورده شده است. محفظه از جنس نفلون با گنجایش  $۲۵۰$  میلی‌لیتر و الکترودها به صورت پین‌های سوزنی<sup>۱</sup> و از جنس تنگستن با فاصله  $1$  سانتی‌متر طراحی شده‌اند. در بدنه دستگاه محل ورود گاز اکسیژن با نرخ شارش،  $۱/۵$  لیتر در دقیقه در محفظه تعییه شده است. یکی از الکترودها زمین شده و الکترود دیگر به منبع تغذیه  $۴۰$  کیلوولت متصل است که توسط سوییچ گازی کلیدزنی می‌شود. به این صورت که با استفاده از منبع تغذیه ابتدا بانک خازنی تخلیه و سپس پلاسمای اسپارک درون محفظه شکل می‌گیرد (شکل ۱). همان‌طور که اشاره شد دستگاه استفاده شده از نوع روش مستقیم بود که تخلیه پلاسمای سرد در داخل مایع انجام می‌شود. نمونه‌های پساب با حجم  $۲۵۰$  میلی‌لیتر درون محفظه ریخته می‌شود و با دو ولتاژ کاری  $۲۰$  و  $۲۵$  کیلوولت (فرکانس  $۵۰$  هرتز) و در سه زمان  $۱$ ،  $۳$  و  $۶$  دقیقه تیمار صورت گرفت. آزمایش در سه تکرار در مجموع با احتساب نمونه شاهد در  $21$  نمونه صورت پذیرفت.



شکل ۱. طرح‌واره دستگاه اسپارک.

1. Pin to pin



پارامتر	پساب ثانویه قبل از گندزدایی	اسپارک ولتاژ ۲۰ کیلوولت	اسپارک ولتاژ ۲۰ کیلوولت
اکسیژن مورد نیاز شیمیایی	۶۸۰/۵۰ <sup>a</sup> * ±۰/۵۱	۳۶۶۷ <sup>b</sup> ±۰/۹۸	۳۴/۳۳ <sup>c</sup> ±۰/۸۷
(میلی گرم در لیتر)			
اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (میلی گرم در لیتر)	۳۷۳/۶۷ <sup>a</sup> ±۰/۲۲	۲۱/۶۷ <sup>b</sup> ±۰/۶۷	۱۷/۲۷ <sup>c</sup> ±۰/۷۵
کدورت (NTU)	۷۱/۸۰ <sup>a</sup> ±۰/۵۲	۶۱/۱۲ <sup>a</sup> ±۰/۲۲	۲۷/۳۴ <sup>b</sup> ±۰/۲۲
کل ماده معلق (میلی گرم در لیتر)	۵۴ <sup>a</sup> ±۰/۰۲	۳۵ <sup>b</sup> ±۰/۲۲	۱۷ <sup>c</sup> ±۰/۵۲
نیتروژن کل (میلی گرم در لیتر)	۲۱/۲۸ <sup>a</sup> ±۰/۳۴	۱۴/۹۸ <sup>b</sup> ±۰/۸۱	۱۴/۳۴ <sup>c</sup> ±۰/۶۲
نیترات (میلی گرم در لیتر)	۱۸/۴۰ <sup>a</sup> ±۰/۲۵	۱۲/۷۸ <sup>b</sup> ±۰/۱	۱۱/۵۰ <sup>c</sup> ±۰/۵۴
آمونیوم (میلی گرم در لیتر)	۰/۹۲ <sup>a</sup> ±۰/۱۲	۰/۶۶ <sup>b</sup> ±۰/۲۰	۰/۵۵ <sup>c</sup> ±۰/۰۸
فسفات کل (میلی گرم در لیتر)	۲/۱۴ <sup>a</sup> ±۰/۱۴	۲/۰۷ <sup>b</sup> ±۰/۲۵	۱/۸۲ <sup>c</sup> ±۰/۱۹

\* حروف نشان‌دهنده اختلاف معنی دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد در هر سطر است

### ۲.۳ کارایی گندزدایی به روش پلاسما

اثر زمان تیمار اسپارک یعنی ۱، ۳ و ۶ دقیقه و ولتاژهای مختلف اعمال شده در آزمایش یعنی ۲۰ و ۲۵ کیلوولت به طور مجزا در رشد مجدد تعداد کل کلنی‌ها و کلیفرم کل بررسی شد.

### ۲.۴ اثر زمان تیمار

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، در شروع آزمایش (در زمان صفر) در هر دو ولتاژ و زمان‌های ۱، ۳ و ۶ دقیقه جمعیت کل کلنی صفر شده است. لیکن با گذشت زمان (در روزهای اول، سوم و پنجم آزمایش) جمعیت میکروبی افزایش پیدا کرده است. در ولتاژ ۲۰ کیلوولت این افزایش در برخی زمان‌ها حتی بیشتر از نمونه شاهد بوده که دلیل آن می‌تواند حذف برخی میکروارگانیسم‌ها و جایگزین شدن آن با برخی میکروارگانیسم‌های با رشد سریع باشد. در ولتاژ ۲۵ کیلوولت جمعیت میکروبی پس از روز سوم در اغلب زمان‌ها کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل کاهش مواد غذایی محیط و ورود به فاز مرگ باشد.

همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود مشابه با کلنی کل در شروع آزمایش (در زمان صفر) در هر دو ولتاژ و در هر سه زمان ۱، ۳ و ۶ دقیقه جمعیت کلیفرم کل صفر شده است. لیکن با گذشت زمان (در روزهای اول، سوم و پنجم آزمایش) کلیفرم کل رشد قابل توجهی داشته است و پلاسمای اسپارک قادر به کنترل رشد مجدد نبوده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، پس از گذشت پنج روز تفاوت معنی

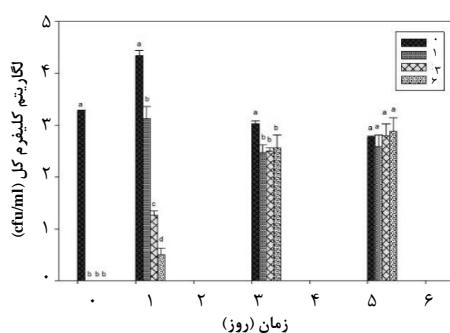
کل مقادیر اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و نیتروژن کل در پساب ثانویه به طور قابل ملاحظه‌ای در تیمار پلاسمای اسپارک کاهش یافتند. درصد کاهش مقادیر اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و نیتروژن کل نسبت به پساب ثانویه برای روش اسپارک ولتاژ ۲۰ کیلوولت به ترتیب حدود ۰/۹۴، ۰/۹۴، ۰/۹۶ و ۰/۹۶ درصد و برای روش اسپارک ولتاژ ۲۵ کیلوولت به ترتیب حدود ۰/۹۵، ۰/۹۵، ۰/۹۵ و ۰/۹۶ درصد بود. این کاهش را می‌توان ناشی از معدنی شدن عناصر با قابلیت اکسید شدن ناشی از تیمار پلاسما تشریح کرد. پلاسما اسپارک با تولید پلاسما غیرحرارتی منحصر به فرد با چگالی نسبتاً زیاد، دمای الکترونی بالا و گونه‌های شیمیایی فعال متعدد به واکنش با محیط پساب می‌پردازد. تخلیه H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> است و در نتیجه منجر به بازده انرژی بالاتر برای تولید OH• می‌شود. اکسیژن تشکیل شده توسط عمل تخلیه می‌تواند O• از ایجاد کند، تخلیه اسپارک در آب در صورت عدم وجود اکسیژن خارجی از واکنش‌های ۱ و ۲ تبعیت می‌کند [۳۷].



حباب‌های هوا از طریق تخلیه اسپارک، بهره‌وری انرژی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۳۸]. این بهبود کارایی به دلیل اثرات مثبت افزودن گازها به منطقه تخلیه می‌باشد [۳۷]. هر چند در سازمان بهداشت جهانی [۳۹] و فائو [۴۰] هیچ دستور العمل روشنی برای مقادیر اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی برای مصارف کشاورزی توصیه نشده است، لیکن اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی در آذانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده امریکا [۴۱] برای استفاده مجدد از پساب جهت تولید محصولات کشاورزی کمتر از ۱۰ میلی گرم در لیتر ذکر شده است. براساس استاندارد خروجی فاضلاب (کد مدرک ST-۰۴۰) سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران [۴۲] مقادیر اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر تعیین شده است که در هر دو تیمار پلاسما مقادیر این دو پارامتر به کمتر از حد مجاز رسیده است. در مطالعه گرینویچ و همکاران [۱۸]، از سیستم پلاسمای سد دی‌الکتریک جهت تصفیه پساب استفاده نمودند. نتایج، کاهش قابل ملاحظه‌ای را در مقدار اکسیژن مورد نیاز شیمیایی نشان دادند که کارایی بالای پلاسمای سرد را در تجزیه ترکیبات آلی تأیید می‌کند. در مطالعه ون‌نگایون و همکاران [۱۹] که از پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک برای تصفیه آب‌های سطحی استفاده نمودند نیز مقدار اکسیژن مورد نیاز شیمیایی تا حد زیادی کاهش پیدا کرد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی شیمیایی پساب ثانویه و تیمار شده





شکل ۵. لگاریتم میانگین کلیفرم کل و مقدار انحراف معیار آن در زمان‌های تیمار مختلف ولتاژ ۲۵ کیلوولت اسپارک و رشد مجدد آن در روزهای مختلف.

جدول ۲. بررسی اثر متقابل ولتاژ بر لگاریتم تعداد کل کلنی‌ها مدت زمان یک دقیقه تیمار اسپارک

روز	ولتاژ (kV)	کل (1)	کل (2)	کل (3)	کل (4)
۵	۴۲۶ <sup>D</sup> <sub>b±0.5</sub>	۵۵۰ <sup>C</sup> <sub>a±0.2</sub>	۵۷۹ <sup>A</sup> <sub>a±0.3</sub>	۴۷۸ <sup>B*</sup> <sub>a***±0.1</sub>	۰
۳	۵۵۰ <sup>A</sup> <sub>a±0.20</sub>	۵۴۰ <sup>A</sup> <sub>b±0.6</sub>	۵۰۲ <sup>B</sup> <sub>b±0.7</sub>	۰ <sup>C</sup> <sub>b±0.5</sub>	۲۰
۱	۳۹۸ <sup>A</sup> <sub>c±0.10</sub>	۵۲۸ <sup>A</sup> <sub>c±0.2</sub>	۴۰۴ <sup>A</sup> <sub>c±0.2</sub>	۰ <sup>B</sup> <sub>b±0.5</sub>	۲۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰

\* حرف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد در هر ردیف است

\*\* حرف کوچک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد در هر ستون است

جدول ۳. بررسی اثر متقابل ولتاژ بر لگاریتم تعداد کل کلنی‌ها مدت زمان سه دقیقه تیمار اسپارک

روز	ولتاژ (kV)	کل (1)	کل (2)	کل (3)	کل (4)
۵	۴۲۶ <sup>D</sup> <sub>b±0.5</sub>	۵۵۰ <sup>B</sup> <sub>a±0.2</sub>	۵۷۹ <sup>A</sup> <sub>a±0.3</sub>	۴۷۸ <sup>C*</sup> <sub>a***±0.1</sub>	۰
۳	۵۶۹ <sup>A</sup> <sub>a±0.10</sub>	۵۴۰ <sup>B</sup> <sub>ab±0.10</sub>	۵۰۰ <sup>C</sup> <sub>b±0.2</sub>	۰ <sup>D</sup> <sub>b±0.5</sub>	۲۰
۱	۳۶۶ <sup>C</sup> <sub>c±0.17</sub>	۵۳۹ <sup>A</sup> <sub>b±0.8</sub>	۴۰۲ <sup>B</sup> <sub>c±0.5</sub>	۰ <sup>D</sup> <sub>b±0.5</sub>	۲۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰

\* حرف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد در هر ردیف است

\*\* حرف کوچک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد در هر ستون است

جدول ۴. بررسی اثر متقابل ولتاژ بر لگاریتم تعداد کل کلنی‌ها مدت زمان شش دقیقه تیمار اسپارک

روز	ولتاژ (kV)	کل (1)	کل (2)	کل (3)	کل (4)
۵	۴۲۶ <sup>D</sup> <sub>c±0.5</sub>	۵۵۰ <sup>B</sup> <sub>b±0.2</sub>	۵۷۹ <sup>A</sup> <sub>a±0.3</sub>	۴۷۸ <sup>C*</sup> <sub>a***±0.1</sub>	۰
۳	۵۶۸ <sup>B</sup> <sub>a±0.3</sub>	۵۷۴ <sup>A</sup> <sub>a±0.1</sub>	۵۰۰ <sup>C</sup> <sub>b±0.1</sub>	۰ <sup>D</sup> <sub>b±0.5</sub>	۲۰
۱	۴۷۱ <sup>B</sup> <sub>b±0.22</sub>	۵۷۴ <sup>A</sup> <sub>a±0.5</sub>	۴۰۲ <sup>C</sup> <sub>c±0.4</sub>	۰ <sup>D</sup> <sub>b±0.5</sub>	۲۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰

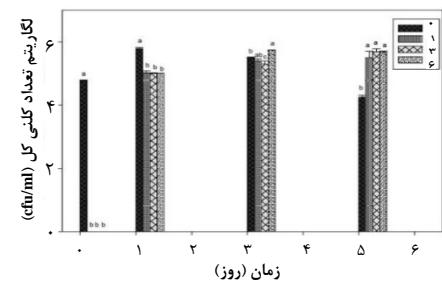
\* حرف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد در هر ردیف است

\*\* حرف کوچک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد در هر ستون است

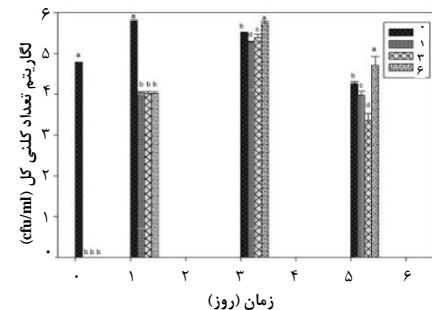
داری بین ولتاژ زیاد و در هر زمان تیمار با نمونه مشاهده شود.

### ۲۰۳.۲ اثر ولتاژ

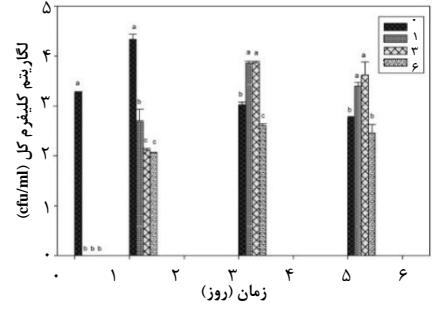
همان‌طورکه در جداول ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود، در شروع آزمایش (در روز صفر) در زمان‌های متفاوت تیمار اسپارک در هر دو ولتاژ ورودی، کارایی گندздایی ۱۰۰ درصد است و جمعیت کلنی کل به صفر رسیده است. لیکن با گذشت زمان (در روزهای اول، سوم و پنجم آزمایش) افزایش ولتاژ تأثیر معنی‌داری در کنترل رشد مجدد کلنی‌ها نداشته است و جمعیت آن‌ها افزایش داشته است. با توجه به جداول ۵ تا ۷، تقریباً در همه زمان‌های تیمار، ولتاژ دوم در کنترل رشد مجدد کلیفرم کل اثر داشته و جمعیت بهویژه تا روز سوم در ولتاژ بالاتر کمتر بوده است.



شکل ۲. لگاریتم میانگین تعداد کل کلنی‌ها و مقدار انحراف معیار آن در زمان‌های تیمار مختلف ولتاژ ۲۰ کیلوولت اسپارک و رشد مجدد آن در روزهای مختلف.



شکل ۳. لگاریتم میانگین تعداد کل کلنی‌ها و مقدار انحراف معیار آن در زمان‌های تیمار مختلف ولتاژ ۲۵ کیلوولت اسپارک و رشد مجدد آن در روزهای مختلف.



شکل ۴. لگاریتم میانگین کلیفرم کل و مقدار انحراف معیار آن در زمان‌های تیمار مختلف ولتاژ ۲۰ کیلوولت اسپارک و رشد مجدد آن در روزهای مختلف.



دائمی و غیرقابل برگشت کلیفرم کل نداشت و رشد مجدد میکروبی رخ داد. در کل نتایج نشان داد، بالاترین ولتاژ اعمالی و طولانی‌ترین زمان تیمار بیشترین میزان غیرفعال‌سازی را به همراه داشت. ولتاژ بالا می‌تواند منجر به افزایش غلظت گونه‌های فعال شود که اثرات منفی بر اسیدهای نوکلیک داشته و منجر به از بین بردن سلول‌های قابل کشت می‌شود [۴۷-۴۹]. پلاسمای اتمسفری غیرحرارتی در مطالعات فراوانی جهت کاهش بار میکروبی پساب یا آب به‌طور موققیت‌آمیزی استفاده شده است [۵۰-۵۲]. به عنوان مثال، در مطالعه ون نکایون و همکاران [۱۹] در بررسی کارایی تصفیه آب‌های سطحی با استفاده از پلاسمای سرد، جمعیت کلیفرم کل و اشرشیاکلی پس از تیمار پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک به‌طور چشمگیری کاهش پیدا کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان ولتاژ پلاسمای سرد به‌طور معنی‌داری در از بین بردن باکتری‌ها تأثیر دارد. جمعیت اشرشیاکلی به ترتیب ۹۹٪ و ۱۰۰ درصد به ترتیب برای ولتاژ اعمالی ۱۵ و ۱۸ کیلوولت کاهش پیدا کرد. برای جمعیت کلیفرم کل نیز افزایش ولتاژ باعث افزایش بازدهی نابودی باکتری‌ها شد [۵۳] و ۹۸٪ درصد به ترتیب برای ۱۵ و ۱۸ کیلوولت). افزایش ولتاژ اعمال شده باعث افزایش غلظت ازن و گونه‌های فعال می‌شود و در نتیجه باعث افزایش بازدهی از بین رفتن باکتری‌ها می‌شود. به عنوان مثال، دورس و همکاران توانستند با استفاده از تخلیه کرونا آب رودخانه آلوده به باکتری کلیفرم را گندزدایی نمایند. به‌طوری که تعداد کلیفرم کل غیرفعال شده در مدت فقط ۲ دقیقه تیمار برابر با سه واحد لگاریتمی بود [۲۶]. در مطالعه دیگری پتانگ و همکاران [۲۶] نشان دادند که جمعیت میکروبی پس از ۱۲۰ ثانیه تیمار پساب صنایع غذایی با استفاده از تخلیه سد دی‌الکتریک کاهش پیدا کرده و پس از ۳۰۰ ثانیه از بین رفتند. همان‌طور که اشاره شد، مطالعات محدودی رشد مجدد میکروبی را با استفاده از پلاسمای سرد اتمسفری بررسی نمودند. براساس دانش نویسنده‌گان، تاکنون تنها تحقیقی که غیرفعال سازی دائمی میکرووارگانسیم‌ها را در پساب بررسی نموده است، السید و همکاران [۹] می‌باشد. در تحقیق آن‌ها که در مقیاس پسیار کوچک پلیت صورت گرفت، در شدت جریان الکتریکی پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک برابر با ۸۵٪ میلی‌آمپر با در زمان ۶۰ ثانیه، باکتری‌ها به‌طور کامل غیرفعال شدند. آن‌ها چنین نتیجه‌گیری نمودند که پلاسما یک روش مؤثر برای تصفیه فاضلاب به‌دلیل توانایی آن برای از بین بردن تقریباً تمام جمعیت‌های باکتری در یک مدت زمان تیمار کوتاه می‌باشد. لیکن نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق السید و همکاران همخوانی نداشت. دلایل این عدم‌همخوانی می‌تواند به دلایل ذیل باشد. تیمار پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک در مطالعه السید و همکاران [۹] که در مقیاس پتری دیش صورت گرفت

جدول ۵. بررسی اثر متقابل ولتاژ بر لگاریتم تعداد کل کلیفرم مدت زمان یک دقیقه تیمار اسپارک

روز	ولتاژ (kV)			
۵	۳	۱	۰	۰
۲,۷۷ <sup>D</sup> <sub>a±۰.۲</sub>	۲,۰۳ <sup>C</sup> <sub>a±۰.۵</sub>	۴,۳۴ <sup>A</sup> <sub>a±۰.۱۰</sub>	۲,۲۷ <sup>B*</sup> <sub>a***±۰.۲</sub>	۰
۳,۴۰ <sup>B</sup> <sub>a±۰.۷</sub>	۳,۸۶ <sup>A</sup> <sub>a±۰.۴</sub>	۲,۷۰ <sup>C</sup> <sub>b±۰.۲۴</sub>	۰ <sup>D</sup> <sub>b±۰.۱</sub>	۲۰
۲,۵۹ <sup>B</sup> <sub>b±۰.۲۲</sub>	۲,۴۷ <sup>B</sup> <sub>c±۰.۱۵</sub>	۲,۱۲ <sup>A</sup> <sub>b±۰.۲۴</sub>	۰ <sup>C</sup> <sub>b±۰.۱</sub>	۲۵

\* حرف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰,۰۵ درصد در هر ردیف است

\*\* حرف کوچک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰,۰۵ درصد در هر ستون است

جدول ۶. بررسی اثر متقابل ولتاژ بر لگاریتم تعداد کل کلیفرم مدت زمان سه دقیقه تیمار اسپارک

روز	ولتاژ (kV)			
۵	۳	۱	۰	۰
۲,۷۷ <sup>D</sup> <sub>b±۰.۲</sub>	۲,۰۳ <sup>C</sup> <sub>b±۰.۵</sub>	۴,۳۴ <sup>A</sup> <sub>a±۰.۱۰</sub>	۲,۲۷ <sup>B*</sup> <sub>a***±۰.۲</sub>	۰
۳,۶۲ <sup>A</sup> <sub>a±۰.۲۶</sub>	۳,۸۷ <sup>A</sup> <sub>a±۰.۳</sub>	۲,۱۲ <sup>B</sup> <sub>b±۰.۰۳</sub>	۰ <sup>C</sup> <sub>b±۰.۱</sub>	۲۰
۲,۸۰ <sup>A</sup> <sub>b±۰.۲۲</sub>	۲,۵۰ <sup>B</sup> <sub>c±۰.۰۶</sub>	۱,۷۲ <sup>C</sup> <sub>c±۰.۰۷</sub>	۰ <sup>D</sup> <sub>b±۰.۱</sub>	۲۵

\* حرف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰,۰۵ درصد در هر ردیف است

\*\* حرف کوچک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰,۰۵ درصد در هر ستون است

جدول ۷. بررسی اثر متقابل ولتاژ بر لگاریتم تعداد کل کلیفرم مدت زمان شش دقیقه تیمار اسپارک

روز	ولتاژ (kV)			
۵	۳	۱	۰	۰
۲,۷۷ <sup>D</sup> <sub>a±۰.۲</sub>	۲,۰۳ <sup>C</sup> <sub>a±۰.۵</sub>	۴,۳۴ <sup>A</sup> <sub>a±۰.۱۰</sub>	۲,۲۷ <sup>B*</sup> <sub>a***±۰.۲</sub>	۰
۲,۴۶ <sup>A</sup> <sub>a±۰.۱۷</sub>	۲,۶۱ <sup>A</sup> <sub>b±۰.۰۴</sub>	۲,۰۶ <sup>B</sup> <sub>b±۰.۰۱</sub>	۰ <sup>C</sup> <sub>b±۰.۱</sub>	۲۰
۲,۸۸ <sup>A</sup> <sub>b±۰.۲۵</sub>	۲,۵۶ <sup>A</sup> <sub>c±۰.۲۵</sub>	۰,۵۰ <sup>B</sup> <sub>c±۰.۱۲</sub>	۰ <sup>C</sup> <sub>b±۰.۱</sub>	۲۵

\* حرف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰,۰۵ درصد در هر ردیف است

\*\* حرف کوچک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰,۰۵ درصد در هر ستون است

هر دو تیمار روش پلاسمای سرد اتمسفری، در شروع آزمایش (بالاصله بعد از تیمار) توانست جمعیت کلیفرم کل را به صفر برساند. در خصوص رشد مجدد میکروبی، با گذشت زمان (در روزهای اول، سوم و پنجم آزمایش) کلیفرم کل رشد قابل توجهی داشت. به عبارت دیگر با گذشت پنج روز در هر دو ولتاژ ۲۰ و ۲۵ کیلوولت) و هر سه زمان (۱، ۳ و ۶) جمعیت کلیفرم کل بیشتر از تعداد مجاز برای مصارف کشاورزی بود. در واقع کل بیشتر از تعداد مجاز برای مصارف کشاورزی شده و رشد مجدد میکروارگانسیم‌ها پس از تخریب بازسازی شده میکروبی صورت گرفته است. هر چند گونه‌های فعال پلاسما اسپارک باقی‌مانده در محلول پس از پایان تیمار مانند OH<sup>-</sup>، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و NO<sub>x</sub> بتویله هیدروکسیل در اکسیداسیون آلینده‌ها و غیرفعال‌سازی باکتری‌ها مؤثر می‌باشد [۴۳-۴۶]. لیکن در تحقیق حاضر پلاسما اسپارک تأثیری در غیرفعال‌سازی



اتمسفری مانند تخلیه سد دیالکتریک در شدت جریان‌های ورودی بیش‌تر بررسی گردد. کارایی گندزدایی و قابلیت کنترل رشد مجدد میکروبی انواع پلاسمای سرد اتمسفری در ترکیب با روش‌های معمول تصفیه فاضلاب بررسی گردد. مطالعه حاضر در مقیاس پایلوت ۲۵۰ لیتری و سیستم بسته صورت پذیرفت لذا پیشنهاد می‌شود که مطالعه مشابهی در مقیاس بزرگ‌تر و یا واقعی و به صورت جریان پیوسته صورت گیرد. به دلیل تغییرات پارامترهای فیزیکی مانند ذرات معلق نمونه‌های پساب فاضلاب شهری در فصول مختلف جمع‌آوری و کارایی گندزدایی و رشد مجدد میکروبی با روش پلاسمای سرد با هم مقایسه شوند. همچنان پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، ارزیابی اقتصادی با در نظر گرفتن عواملی مانند مصرف برق، هزینه احداث، نگهداری تجهیزات، نیروی انسانی مورد نیاز و ... صورت گیرد.

## مراجع

1. N. Mansouri, in: *Environmental Pollution*, Ind ed. (Arad Book, Tehran, 2011), pp. 163-286. (In Persian)
2. J. Shayegan, A. Afshari, *The Treatment Situation of Municipal and Industrial Wastewater in Iran, Journal of Water and Wastewater*. **15**, 58-69 (2004). (In Persian)
3. J. Abedi Koupai, M. Javahery Tehrani, K. Behfarnia, *Improvement the Quality of Wastewater using Porous Concrete for Irrigation*, JWSS. **19**, 93-107 (2015). (In Persian)
4. O.M. Lee, H.Y. Kim, W. Park, T.H. Kim, S. Yu, *A comparative study of disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in secondary wastewater effluent using UV, ozone, and ionizing irradiation process*, J Hazard Mater. **295**, 201-208 (2015).
5. Environmental Criteria of Treated Waste Water and Return Flow Reuse No. 535, [https://health.umsu.ac.ir/uploads/effluent\\_reuse.pdf](https://health.umsu.ac.ir/uploads/effluent_reuse.pdf). (In Persian)
6. D. Vujevic, N. Koprivanac, A. Loncaric Bozic, B.R. Locke, *The removal of direct orange 39 by pulsed corona discharge from model wastewater*, Environ Technol. **25**(7) , 791-800, (2004), doi:10.1080/0959330.2004.9619370
7. A. Karimpour, in *Fourth Specialized Conference on Environmental Engineering, Advanced Oxidation Process and its Application in Industrial Wastewater Treatment* (University of Tehran, 2010). (In Persian)
8. E.S.M. Mouele, J.O. Tijani, O.O. Fatoba, L. F. Petrik, *Degradation of organic pollutants and microorganisms from wastewater using different dielectric barrier discharge configurations-a*

و نسبت به حجم پساب استفاده شده در این تحقیق (۲۵۰ میلی‌لیتر) به مراتب کمتر بود. دلیل دیگر می‌تواند شدت جریان اعمالی باشد. در تحقیق حاضر شدت جریان‌ها برابر با  $5/4$  و  $10/5$  میلی‌آمپر بود در مقابل شدت جریان اعمال شده توسط السید و همکاران [۹] تا  $90$  میلی‌آمپر بود. آن‌ها فرایند استریل شدن حاصل از پلاسما را به تولید برخی گونه‌های فعال بهویژه NO دانستند که گونه گازی غالب با عمر طولانی است [۱۵]، که تولید آن وابسته به شدت جریان الکتریکی ورودی است و با افزایش شدت جریان تولید این گونه افزایش می‌یابد.

## ۴. نتیجه گیری

نمونه‌های پساب ثانویه تصفیه‌خانه فاضلاب شهری جنوب تهران در این تحقیق استفاده شد. پساب شهری تحت پلاسمای سرد اتمسفری از نوع اسپارک با تخلیه مستقیم در مایع قرار گرفت. از دو ولتاژ  $20$  و  $25$  کیلوولت و زمان‌های  $1$ ،  $3$  و  $6$  دقیقه و گاز ورودی اکسیژن استفاده شد. پارامترهای کیفی مهم پساب نمونه از جمله pH، EC، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، میزان نیتروژن کل، نیترات، آمونیم، فسفر کل و کل مواد جامد معلق (TSS) قبل و بعد هر تیمار براساس روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. کارایی گندزدایی با استفاده از تعیین تعداد کل کلنی‌ها و کلیفرم کل به عنوان شاخص عوامل بیماری‌زای باکتریایی قبل و بعد از هر تیمار بررسی گردید و رشد مجدد کل کلنی‌ها و باکتری کلیفرم کل تعیین گردید. آزمون در سه تکرار صورت گرفت.

نتایج نشان داد که مقادیر اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی و نیتروژن کل در پساب ثانویه به طور قابل ملاحظه‌ای در تیمارهای پلاسمای اسپارک کاهش یافته‌ند و در هر دو تیمارها مقادیر این دو پارامتر به کمتر از حد مجاز برای مصارف کشاورزی رسیده است. لیکن این کاهش به طور معنی‌داری در ولتاژ بالاتر بیش‌تر بود. روش پلاسمای سرد اتمسفری، در شروع آزمایش توانست جمعیت کلیفرم کل را به صفر برساند. لیکن پس از گذشت تنها یک روز کلیفرم کل رشد قابل توجهی داشت و بیش‌تر از تعداد مجاز بود. این احتمال وجود دارد که میکرووارگانیسم‌ها پس از تخریب بازسازی شده و رشد میکروبی صورت گرفته باشد.

در مجموع چالش‌هایی مانند معدنی شدن ناقص آلاینده‌ها، ایجاد آلودگی ثانویه، هزینه‌های بالا و مصرف بالای انرژی، رشد مجدد باکتریایی و غیره وجود دارد که بایستی در سیستم‌های تصفیه پلاسما در نظر گرفته شود. همچنان موانع باقی‌مانده زیادی در زمینه تحقیق و توسعه پلاسما وجود دارد.

در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود که کارایی گندزدایی و قابلیت کنترل رشد مجدد میکروبی با انواع پلاسمای سرد



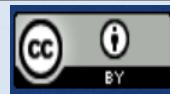
- critical review, Environ Sci Pollut Res Int.* **22(23)**, 18345-18362 (2015).
9. W.S. El-Sayed, S.A. Ouf, A.A.H. Mohamed, *Deterioration to extinction of wastewater bacteria by non-thermal atmospheric pressure air plasma as assessed by 16S rDNA- DGGE fingerprinting, Front Microbiol.* **6**, 1098 (2015).
  10. A.A. Joshi, B.R. Locke, P. Arce, W.C. Finney, *Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution, J. Hazard. Mater.* **41**(1), 3-30 (1995).
  11. A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, J. van der Mullen, *Gas discharge plasmas and their applications, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **57(4)**, 609-658 (2002).
  12. B.R. Locke, M. Sato, P. Sunka, M.R. Hoffmann, J.S. Chang, *Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment, Ind. Eng. Chem. Res.* **45**(3), 882-905 (2006).
  13. B. Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Q. Zhang, Z. Yan, Q. Xue, *Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation, CHEM ENG J.* **236**, 348-368 (2014).
  14. H.S. Kim, K. Wright, J. Piccioni, D.J. Cho, Y.I. Cho, *Inactivation of bacteria by the application of spark plasma in produced water, SEP PURIF TECHNOL.* **156**, 544-552 (2015).
  15. P. Attri, F. Tochikubo, J.H. Park, E.H. Choi, K. Koga, M. Shiratani, *Impact of Gamma rays and DBD plasma treatments on wastewater treatment, Sci. Rep.* **8(1)**, 2926 (2018).
  16. J. Zheng, *Inactivation of Staphylococcus aureus in water by pulsed spark discharge, Sci. Rep.* **7(1)**, 10311 (2017).
  17. A.N. Hernández-Arias, B.G. Rodríguez-Méndez, R. López-Callejas, D. Alcántara-Díaz, R. Valencia-Alvarado, A. Mercado-Cabrera, R. Peña-Eguiluz, A.E. Muñoz-Castro, S.R. Barocio, A. De la Piedad-Beneitez, *Inactivation of Escherichia coli in water by pulsed dielectric barrier discharge in coaxial reactor, J Water Health.* **10(3)**:371-379 (2012).
  18. V.I. Grinevich, E.Y. Kvirkova, N.A. Plastinina, V.V. Rybkin, *Application of dielectric barrier discharge for waste water purification, Plasma Chem. Plasma Process.* **31(4)**, 573-583 (2011).
  19. D. Van Nguyen, P.Q. Ho, T. Van Pham, T. Van Nguyen, L. Kim, *A study on treatment of surface water using cold plasma for domestic water supply, Environ. Eng. Res.* **24(3)**, 412-417 (2019).
  20. A.A.H. Mohamed, S.M. Al Shariff, S.A. Ouf, M. Benghanem, *Atmospheric pressure plasma jet for bacterial decontamination and property improvement of fruit and vegetable processing wastewater, J PHYS D APPL PHYS*, **49(19)**, 195401, (2016).
  21. A. Hazmi, R. Desmiarti, E.P. Waldi, D. Darwison, *Removal of Microorganisms in Drinking Water using Pulsed HighVoltage, JETS.* **45(1)**, 1-8 (2014).
  22. T.E. Njoyim, Y.T. Djoko, J. Ghogomu, S.A. Djepang, S. Laminsi, *Plasma-chemical treatment of industrial wastewaters from brewery "Brasseries du Cameroun", Bafoussam factory, IJERA.* **6**, 60-71 (2016).
  23. K. Satoh, S.J. MacGregor, J.G. Anderson, G. A. Woolsey, R.A. Fouracre, *Pulsed plasma disinfection of water containing Escherichia coli, Jpn. J. Appl. Phys. Pulsed plasma disinfection of water containing Escherichia coli, Jpn. J. Appl. Phys.* **46(3R)**, 1137 (2007).
  24. M. Sato, *Environmental and biotechnological applications of high-voltage pulsed discharges in water, Plasma Sources Sci. Technol.* **17**, 024021 (2008).
  25. M.M. Kuraica, B.M. Obradovic, D. Manojlovic, D.R. Ostojic, J. Puric, *Ozonized water generator based on coaxial dielectric barrier discharge in air, Vacuum.* **73**, 705-708 (2004).
  26. A. Patange, D. Boehm, M. Giltrap, P. Lu, P.J. Cullen, P. Bourke, *Assessment of the disinfection capacity and eco-toxicological impact of atmospheric cold plasma for treatment of food industry effluents, Sci Total Environ.* **631-632**, 298-307 (2018).
  27. A. Patange, P. Lu, D. Boehm, P.J. Cullen, P. Bourke, *Efficacy of cold plasma functionalised water for improving microbial safety of fresh produce and wash water recycling, Food Microbiology.* **84**, 103226 (2019).
  28. K. Oehmigen, M. Hänel, R. Brandenburg, C. Wilke, K.D. Weltmann, T. Von Woedtke, *The role of acidification for antimicrobial activity of atmospheric pressure plasma in liquids, Plasma Process. Polym.* **7**, (2010), doi:10.1002/ppap.200900077
  29. X. Liao, D. Liu, S. Chen, X. Ye, T. Ding, *Degradation of antibiotic resistance contaminantas in wastewater by atmospheric cold plasma: kinetics and mechanisms, environmental technology.* (2019), doi: 10.1080/09593330.2019.1620866
  30. *Tehran water supply and water and wastewater treatment company, Various units and processes in wastewater treatment*, 2016, <https://tww.tpwir.ir>. (In Persian)
  31. APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. (American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, Washington DC,* (1998).
  32. J.E. Foster, *Plasma-based water purification: Challenges and prospects for the future, Physics of Plasmas.* **24(5)**, 05550 (2017).
  33. J. Foster, B.S. Sommer, S.N. Gucker, I.M. Blankson, G. Adamovsky, *Perspectives on the Interaction of Plasmas With Liquid Water for Water Purification, IEEE T PLASMA SCI.* **40**, 1311 (2012)



34. P. Bruggeman, C. Leys, *Non-thermal plasmas in and in contact with liquids*, *J PHYS D APPL PHYS*, **42(5)**, 053001 (2009).
35. P.J. Bruggeman, D.C. Schram, *On OH production in water containing atmospheric pressure plasmas*, *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 045025 (2010).
36. L. Tahri, D. Elgarrouj, S. Zantar, M. Mouhib, A. Azmani, F. Sayah, *Wastewater treatment using gamma irradiation: Tétouan pilot station, Morocco*, *Radiat. Phys. Chem.* **79(4)**, 424-428 (2010).
37. M.A. Malik, *Water Purification by Plasmas: Which Reactors are Most Energy Efficient*, *Plasma Chem Plasma Process.* **30**, 21–31 (2010).
38. Y. Shen, L.C. Lei, X.W. Zhang, M.H. Zhou, Y. Zhang, *Improvement of diagnostic techniques and electrical circuit in azo dye degradation by high voltage electrical discharge*, *Energy conversion and management*. **49**, 2254 (2008).
39. World Health Organization (WHO), *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture*, WHO technical report series, p. **778** (1989).
40. FAO, *Wastewater treatment and use in agriculture*, (*M.B. Pescod, FAO Irrigation and Drainage, Rome 1992*), pp. 47.
41. US Environmental Protection Agency, 2012. *Guidelines for Water Reuse* (No. EPA/600/R-12/618).
42. A.M. Shaeri, A. Rahmati, *Rules, regulations, Human's Environmental, Laws, Regulations Criteria and Standards*, 1nd ed. (Hak Publications, 2012), pp.275. (In Persian)
43. M. Sato, T. Ohgiyama, J. Clements, *Formation of chemical species and their effects on microorganisms using a pulsed high-voltage discharge in water*, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **32 (1)** 106–112, (1996).
44. M. Laroussi, *Low temperature plasma-based sterilization: overview and state-of-the-art*, *Plasma Processes Polym.* **2(5)**, 391–400 (2005)
45. A. Fridman, *Plasma chemistry*. Cambridge university press (2008).
46. P. Bruggeman, C. Leys, *Non-thermal plasmas in and in contact with liquids*, *J. Phys. D Appl. Phys.* **42 (5)**, 053001(2009).
47. L. Han, S. Patil, K. M. Keener, P.J. Cullen, P. Bourke, *Bacterial inactivation by highvoltage atmospheric cold plasma: influence of process parameters and effects on cell leakage and DNA*, *J. Appl. Microbiol.* **116 (4)**, 784–794 (2014).
48. M. Janex, P. Savoye, M. Roustan, Z. Do-Quang, J.M. Laîné, V. Lazarova, *Wastewater Disinfection by Ozone: Influence of Water Quality and Kinetics Modeling*, *Ozone science & engineering*, **22(2)**, 113-121(2000), doi:10.1080/01919510008547215
49. X. Liu, F. Hong, Y. Guo, J. Zhang, J. Shi, *Sterilization of *Staphylococcus aureus* by an atmospheric non-thermal plasma jet*, *Plasma Sci. Technol.* **15 (5)**, 439–442 (2013).
50. M. Zhang, J.K. Oh, L. Cisneros-Zevallos, M. Akbulut, *Bactericidal effects of nonthermal low-pressure oxygen plasma on *S. typhimurium* LT2 attached to fresh produce surfaces*, *J. Food Eng.* **119(3)**, 425–432 (2013).
51. S.A. Ermolaeva, E.V. Sysolyatina, N.I. Kolkova, P. Bortsov, A.I. Tuhvatulin, M.M. Vasilev, et al. *Non-thermal argon plasma is bactericidal for the intracellular bacterial pathogen *Chlamydia trachomatis**, *J. Med. Microbiol.* **61**, 793–799 (2012), doi: 10.1099/jmm.0.038117-0
52. S. Deng, R. Ruan, C.K. Mok, G. Huang, X. Lin, P. Chen, *Inactivation of *Escherichia coli* on almonds using nonthermal plasma*, *J. Food Sci.* **72**, 62–66 (2007), doi: 10.1111/j.1750-3841.2007.00275.x
53. D. Ziuzina, S. Patil, P.J. Cullen, K.M. Keener, P. Bourke, *Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli* in liquid media inside a sealed package*, *J. Appl. Microbiol.* **114**, 778–787 (2013), doi: 10.1111/jam.12087
54. M. Dors, E. Metel, J. Mizeraczyk, E. Marott, in: *Proc. IEEE Int. Conf. Dielectr. Liquids, Pulsed corona discharge in water for coli bacteria inactivation* (2008), pp. 1–3.
55. X. Hao, A.M. Mattson, C.M. Edelblute, M.A. Malik, L.C. Heller, J.F. Kolb, *Nitric oxide generation with an air operated non-thermal plasma jet and associated microbial inactivation mechanisms*, *Plasma Proces. Polym.* **11**, 1044–1056 (2014), doi: 10.1002/ppap.2013.

**COPYRIGHTS**

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

عطیه باریکانی، مارال خدادادی، سازمان خرمی پور (۱۳۹۹)، بررسی کارایی پلاسمای اسپارک با تخلیه مستقیم در محیط آبی در گندزدایی و کنترل رشد مجدد آلودگی زیستی پساب فاضلاب شهری، ۹۴، ۱۰۱-۹۲

DOI: [10.24200/nst.2020.1174](https://doi.org/10.24200/nst.2020.1174)

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1174.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1174.html)

