

## مقاله پژوهشی

### توسعه یک سامانه پیوسته تولید آب فعال شده با پلاسما جهت ضدعفونی محصولات کشاورزی

محمد جواد اعرابی<sup>۱</sup>، سجاد رستمی<sup>۲\*</sup>، بهرام حسین‌زاده سامانی<sup>۳</sup> و فیروزه نظری<sup>۴</sup>

## چکیده

ضدعفونی کردن محصولات کشاورزی به عنوان یکی از مراحل اصلی فرآوری محصولات کشاورزی در سال‌های اخیر مبحث بسیار مهمی است. یکی از روش‌های نوین ضدعفونی با کارایی بالا و هزینه‌های عملیاتی کم و در عین حال با حداقل اثرات جانبی، استفاده از مایع تیمار شده با پلاسما است. آب فعال شده با پلاسما (PAW) اثر ضدعفونی‌کننده‌ای بر محصولات در حجم ثابت دارد. در این مطالعه سامانه تولید پیوسته آب فعال شده با پلاسما توسعه داده و خواص فیزیکی آب فعال شده با پلاسما بررسی شد. تأثیر انواع مختلف آب شامل آب لوله‌کشی شهری، آب مقطر و آب دیونیزه، دبی‌های مختلف آب (۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌لیتر در دقیقه) و انواع مختلف گازهای مولد پلاسما شامل هوا و آرگون بر روی خواص فیزیکی آب در زمان‌های (۰، ۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه) پس از اعمال پلاسما مطالعه شد. نتایج نشان داد که در اثر تیمار پلاسما، پتانسیل اکسایش کاهش تا ۹۰٪ افزایش، هدایت الکتریکی تا ۶۱ برابر افزایش و pH آب تا ۳۰٪ کاهش یافتند. بین تغییرات پتانسیل اکسایش کاهش و هدایت الکتریکی همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت. در مقابل بین تغییرات pH و پتانسیل اکسایش کاهش و هدایت الکتریکی همبستگی معنی‌دار و منفی بود. یافته‌های این تحقیق نشان داد با توجه به تغییرات در سه شاخص پتانسیل اکسایش کاهش، هدایت الکتریکی و pH استفاده از آب دیونیزه به همراه گاز آرگون و دبی جریان آب ۰/۵ میلی‌لیتر در دقیقه بهترین ترکیب برای تولید پیوسته آب فعال شده با پلاسما با استفاده از سامانه توسعه داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** آب فعال شده با پلاسما، پتانسیل اکسایش کاهش، هدایت الکتریکی، pH.

**ارجاع:** اعرابی م. ج. رستمی س. حسین‌زاده سامانی ب. و نظری ف. ۱۴۰۳. توسعه یک سامانه پیوسته تولید آب فعال شده با پلاسما جهت ضدعفونی محصولات کشاورزی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۰: ۶۷-۷۸. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14480.671>

۱- دانشجوی دکتری فناوری‌های پس از برداشت، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد.

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد.

۴- استادیار، معاونت غذا و دارو دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران.

\* نویسنده مسئول: [rostami.sajad@yahoo.com](mailto:rostami.sajad@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

## مقدمه

جمعیت ساکن در کره زمین تا کمتر از سی سال آینده به حدود ده میلیارد نفر خواهد رسید. (Thirumdas *et al.*, 2018). لذا با توجه به نیاز روزافزون به غذا لازم است روش‌های جدید تولید و فرآوری مواد غذایی توسعه یابند. یکی از مهم‌ترین موارد قابل توجه، تهیه غذای ایمن و سالم با حفظ کیفیت آن است. لذا ضدعفونی محصولات کشاورزی به عنوان یکی از مراحل اصلی فرآوری محصولات کشاورزی در سال‌های اخیر مبحث بسیار مهمی بوده است (Thirumdas *et al.*, 2018). در سال‌های اخیر استفاده از فناوری پلاسمای غیرحرارتی در فرآیندهای فرآوری صنایع غذایی مورد توجه قرار گرفته است (Thirumdas *et al.*, 2018, Rajabsadoughi *et al.*, 2021, Zare *et al.*, 2021, Basiri *et al.*, 2023). یکی از روش‌های نوین ضدعفونی با کارایی بالا و هزینه‌های عملیاتی کم و در عین حال با حداقل اثرات جانبی، استفاده از آب فعال شده با پلاسما است.

گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، از جمله هیدروپروکسید ( $HO_2^{\bullet}$ )، اکسیژن منفرد ( $O_2^{\bullet}$ )، پراکسیل ( $ROO^{\bullet}$ )، ازن ( $O_3$ )، آنیون سوپراکسید ( $O_2^{\bullet-}$ )، آلکوکسیل ( $RO^{\bullet}$ )، رادیکال هیدروکسیل ( $^{\bullet}OH$ )، پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ )، و رادیکال آنیون کربنات ( $CO_2^{\bullet-}$ ) توسط تأثیر پلاسما در آب ایجاد می‌شوند (Arjunan *et al.*, 2015). هنگامی که این گونه‌ها در آب حل می‌شوند، محصول، آب فعال شده با پلاسما نامیده می‌شود. آب فعال شده با پلاسما و اثر آن در کیفیت، کنترل بازمیکروبی و ضدعفونی‌کنندگی محصولات کشاورزی در مطالعات مختلفی بررسی شده است (Ma *et al.*, 2015, Guo *et al.*, 2017, Los *et al.*, 2020, Rajabsadoughi *et al.*, 2021, Yang *et al.*, 2023, Basiri *et al.*, 2023).

اکثر رادیکال‌هایی که در اثر تیمار آب با پلاسما ایجاد می‌شوند گذرا بوده و باعث ایجاد محدودیت در نگهداری آب فعال شده با پلاسما می‌شود. این امر استفاده از آب فعال شده با پلاسما را در کاربردهای صنعتی محدود می‌کند. یکی از راهکارهای غلبه بر این مشکل ایجاد سامانه تولید پیوسته آب فعال شده با پلاسما است. این مطالعه تأثیر منابع مختلف آب، دبی‌های مختلف جریان آب و ترکیب‌های مختلف گازهای هوا و آرگون در پلاسمای سرد بر روی خواص مختلف فیزیکی آب و

ماندگاری اثرات ایجاد شده در زمان‌های مختلف پس از تیمار را در سامانه تولید پیوسته آب فعال شده با پلاسما بررسی می‌کند.

## مواد و روش‌ها

برای تولید پلاسما از سامانه ساخته شده در مطالعه (Esmaeili *et al.*, 2022) استفاده شده و برای تولید پیوسته آب فعال شده با پلاسما از سامانه نشان داده شده در شکل ۱ طراحی و استفاده گردید. آب از منبع شماره یک توسط مجرای تحت کنترل از پایین وارد ظرف تیماردهی شده و سپس به آرامی تحت تأثیر پلاسما قرار گرفته و از مجرای خروجی به صورت پیوسته خارج خواهد شد. تابش پلاسما در سطح آب و با فاصله پنج میلی‌متری از سطح آب انجام می‌شود. استفاده از شیر یک‌طرفه اجازه کنترل جریان ورودی به مخزن تیماردهی و تغییرات دبی جریان را ایجاد خواهد کرد. برای سنجش کیفیت و ایجاد آب فعال شده با پلاسما شاخص‌های مختلفی وجود دارد. مهم‌ترین شاخص‌ها که در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند خواص فیزیکی آب فعال شده با پلاسما شامل: پتانسیل اکسایش کاهش، هدایت الکتریکی و pH هستند (Thirumdas *et al.*, 2018).

## پتانسیل اکسایش کاهش (ORP)

پتانسیل اکسایش کاهش نشان‌دهنده تمایل مواد شیمیایی جهت اکسیداسیون است. پتانسیل اکسایش کاهش بر حسب ولت یا میلی‌ولت اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری این شاخص فارغ از کیفیت آب نشان‌دهنده خاصیت ضد میکروبی آن است (Thirumdas *et al.*, 2018). پتانسیل اکسایش کاهش به عنوان عامل مهم مؤثر بر غیرفعال‌سازی میکروبی در نظر گرفته می‌شود که به غشای سلولی میکروب‌ها و مکانیسم دفاعی آن‌ها آسیب می‌رساند، به این معنی که هر چقدر پتانسیل اکسایش کاهش محلول بیشتر باشد خاصیت اکسیدکنندگی بیشتری داشته و فعالیت ضد میکروبی زیادتری دارد.

## هدایت الکتریکی (EC)

هدایت الکتریکی توانایی انتقال جریان الکتریکی توسط محلول را نشان می‌دهد. هدایت الکتریکی معمولاً با

1- Oxidation Reduction Potential

2- Electrical Conductivity

6041 موجود در آزمایشگاه منابع آب دانشگاه شهرکرد استفاده شد.

با استفاده از سامانه طراحی شده شکل ۱ تأثیر منابع مختلف آب شامل آب لوله‌کشی شهری، آب مقطر و آب دیونیزه، دبی‌های متفاوت آب تحت تأثیر پلاسما (در سه دبی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌لیتر در دقیقه) و گازهای مختلف مولد پلاسمای سرد شامل هوا و آرگون و ترکیب ۵۰ درصد حجمی آرگون و هوا بر روی خواص فیزیکی آب در زمان‌های مختلف پس از ایجاد آب فعال شده با پلاسما (۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه) مورد بررسی قرار گرفت.

### نتایج و بحث

خواص مورد مطالعه برای منابع مختلف آب قبل از تیماردهی با پلاسما در جدول ۱ آورده شده است.

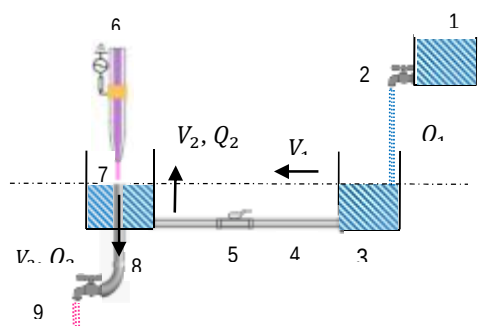
#### پتانسیل اکسایش کاهش (ORP)

با استفاده از سامانه تولید آب فعال شده با پلاسما، پتانسیل اکسایش کاهش برای آب لوله‌کشی شهری از ۲۹۸ تا ۴۳۹ میلی‌ولت، برای آب مقطر از ۲۸۲ تا ۴۹۹ میلی‌ولت و برای آب دیونیزه از ۲۶۸ تا ۵۰۹ میلی‌ولت افزایش یافت. این امر نشان‌دهنده تأثیرپذیری مناسب آب و ایجاد آب فعال شده با پلاسما با استفاده از سامانه توسعه داده شده است.

تجزیه واریانس عوامل تأثیرگذار سامانه بر پتانسیل اکسایش کاهش آب فعال شده با پلاسما نشان داد اثر عوامل آب، دبی و گذشت زمان پس از ایجاد آب فعال شده، تأثیر معنی‌داری بر پتانسیل اکسایش کاهش دارد. در میان برهم‌کنش‌های چندگانه تنها برهم‌کنش دوگانه دبی  $\times$  زمان اثر معنی‌داری بر صفت مذکور نشان داد و اثر سایر ترکیب‌های تیماری معنی‌دار نشد (جدول ۲).

مطابق نتایج مقایسه میانگین، بیشترین پتانسیل اکسایش کاهش مربوط به برهم‌کنش دبی ۰/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه (بلافاصله پس از ایجاد آب فعال شده با پلاسما - زمان صفر- و پنج دقیقه پس از آن) بود که با سایر سطوح ترکیب تیماری به طور چشمگیری اختلاف داشتند. با افزایش دبی، پتانسیل اکسایش کاهش تغییرات کاهشی نشان داد. برای همه دبی‌های بررسی شده بعد از اتمام اعمال پلاسما بر آب با گذشت زمان پتانسیل اکسایش کاهش، کاهش پیدا کرد (شکل ۲).

میکروزیمنس بر سانتی‌متر نشان داده می‌شود. هدایت الکتریکی معیاری از توانایی آب برای تسهیل جریان الکتریکی از طریق آن است. گونه‌های فعال و یون‌های تولید شده در طی تیمار پلاسما به آسانی در آب حل می‌شوند که به وضوح میزان هدایت الکتریکی آن را تغییر می‌دهد. تشکیل گونه‌های بسیار واکنش‌پذیر اکسیژن و نیتروژن (ROS, RNS) در طول فعال‌سازی پلاسمایی آب منجر به افزایش هدایت الکتریکی آب شده و افزایش آن بر افزایش بازدهی کنترل بار میکروبی اثر مستقیم دارد (Thirumdas et al., 2018).



شکل ۱- سامانه تولید پیوسته آب فعال شده با پلاسما، (۱): مخزن ورودی، (۲): شیر کنترل جریان ورودی (۳): مخزن ورودی جریان (۴): لوله رابط جریان (۵): شیر کنترل جریان (۶): مجموعه پلاسمای DBD و افشانه پلاسما (۷): مخزن تیماردهی (۸): لوله خروجی که آب تیمار شده با پلاسما از آن خارج می‌گردد (۹): شیر کنترل خروجی Q: دبی جریان آب و V: سرعت جریان آب

#### اسیدیته pH

pH غلظت یون هیدروژن در یک محلول را نشان می‌دهد. واکنش‌هایی که بین گونه‌های شیمیایی تشکیل شده در پلاسما و آب انجام می‌شوند منجر به اسیدی شدن آب می‌شوند. هر چقدر میزان فعالیت‌های رادیکال‌های آزاد در آب بیشتر باشد محیط آن اسیدی‌تر خواهد بود. به بیان دیگر کاهش pH باعث افزایش قدرت ضدعفونی‌کنندگی آب فعال شده با پلاسما می‌شود (Thirumdas et al., 2018). این شاخص‌ها در پنج مرحله یعنی قبل از تیمار شدن با پلاسما، بلافاصله بعد از ایجاد آب فعال شده با پلاسما و در فواصل ۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه پس از تولید آب فعال شده با پلاسما اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی از دستگاه مدل YK-2001PHA و برای سنجش پتانسیل اکسایش کاهش از دستگاه EZDO

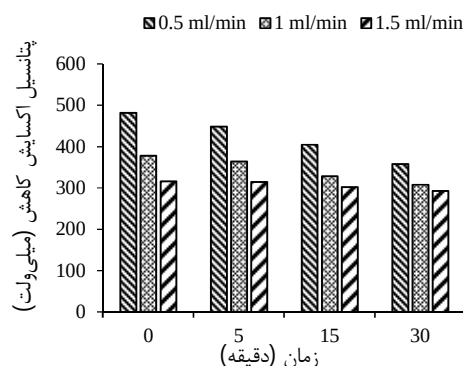
جدول ۱- خواص اولیه آب‌های استفاده شده در سامانه ایجاد آب فعال شده با پلاسما (قبل از تیماردهی با پلاسما)

| نوع آب      | pH   | هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) | پتانسیل اکسایش کاهش (میلی‌ولت) |
|-------------|------|------------------------------------------|--------------------------------|
| آب لوله‌کشی | ۵/۴۷ | ۵۶۳                                      | ۲۹۸                            |
| آب مقطر     | ۷    | ۱۲/۲                                     | ۲۸۲                            |
| آب دیونیزه  | ۶/۹  | ۲/۵                                      | ۲۶۸                            |

دبی  $\times$  زمان، بیشترین پتانسیل اکسایش کاهش در شرایط گاز آرگون، دبی ۰/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه و زمان صفر (بلافاصله پس از اعمال پلاسما بر آب) مشاهده شد که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت.

در پژوهشی، *Takamatsu et al.*, (2012) تأثیر پلاسما بر آب با چند گاز مولد مختلف (اکسیژن، نیتروژن، دی اکسید کربن، آرگون و هوا) را بررسی کرده و میزان رادیکال‌های آزاد مختلف ایجاد شده توسط هر کدام را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که اثرگذاری گازهای مختلف بسیار وابسته به اسیدی شدن محیط بوده و در pH ثابت اثرگذاری اکسیژن، نیتروژن و دی‌اکسیدکربن بالاترین و آرگون و هوا تقریباً شبیه به هم گزارش شده‌اند. می‌توان گفت پلاسمای تولید شده توسط آرگوندر مقایسه با هوا در تولید رادیکال‌های هیدروژن منفرد مثبت و هیدروکسیل قوی‌تر بوده هر چند هوا رادیکال‌های اکسیژن منفرد و اکسید نیتريت بیشتری تولید می‌کند. در پژوهشی دیگر، *Vlad et al.*, (2018) برای کنترل *S. aureus* از آب فعال شده با پلاسمای (هلیوم، آرگون و هوا) استفاده کردند. مشخص شد آب فعال شده با پلاسمای آرگون (نسبت به هوا و هلیوم) باعث کنترل بیشتر و تخریب بیشتر ساختمان باکتری می‌گردد. با گذشت زمان نیز همچنان اثر آرگون بیشتر از هوا بوده است. این شاید به این دلیل است که پلاسمای آرگون نسبت به گازهای دیگر مورد مطالعه هیدروژن پراکسید بیشتری تولید می‌کند.

طبق یافته‌های *Lin et al.*, (2019) مقادیر پتانسیل اکسایش کاهش آب با فعال‌سازی پلاسما افزایش یافت که با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد. در نتیجه، مشخص شده است که میزان افزایش پتانسیل اکسایش کاهش مستقیماً با میزان یونیزاسیون آب مرتبط است. آب فعال شده با پلاسما ظرفیت اکسیداسیون بالایی دارد. مطالعه *Xiang et al.*, (2018) نشان داد که تیمار پلاسما پتانسیل اکسایش کاهش آب دیونیزه را پس از ۳۰، ۶۰ و ۹۰ ثانیه



شکل ۲- تغییرات پتانسیل اکسایش کاهش تحت اثر گذشت زمان پس از ایجاد آب فعال شده با پلاسما در سه دبی جریان آب ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه. میانگین‌هایی که با حروف یکسان مشخص شده‌اند در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.

افزایش پتانسیل اکسایش کاهش آب نشانه تاثیرپذیری آن از پلاسماست. تاکنون مطالعه‌ای برای بررسی تأثیر پلاسما بر جریان پیوسته آب صورت نگرفته است. اما با در نظر گرفتن اینکه افزایش دبی و در نتیجه سرعت جریان آب با افزایش مدت زمان اعمال پلاسما بر آب، رادیکال‌های آزاد ایجاد شده و نفوذ کرده در آب افزایش پیدا کردند.

باعث کاهش مدت زمان ماند آب در برابر پلاسما می‌شود. می‌توان گفت افزایش دبی جریان آب باعث کاهش تأثیرپذیری آب از پلاسما شده و میزان پتانسیل اکسایش کاهش آب را کاهش می‌دهد.

در بررسی اثر نوع گاز مولد پلاسما، تجزیه واریانس نشان داد عوامل نوع گاز، دبی آب و زمان بعد از اعمال پلاسما تأثیر بسیار معنی‌داری بر پتانسیل اکسایش کاهش دارند. تمامی برهم‌کنش‌های دوگانه و سه‌گانه تیمارهای ذکر شده به طور معنی‌داری پتانسیل اکسایش کاهش را تغییر دادند (جدول ۳).

نتایج آزمایش برای بررسی اثر گازهای آرگون، هوا و ترکیب ۵۰ درصد حجمی آرگون و هوا در جدول ۳ آورده شده است. مطابق نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش گاز  $\times$

است نتایجی مشابه مطالعه فوق محقق شده است. مطالعات دیگر همچنین افزایش در مقادیر پتانسیل اکسایش کاهش را با مدت زمان طولانی‌تر تیمار پلاسما نشان داده‌اند (Guo et al., 2017; Ma et al., 2016a). پتانسیل اکسایش کاهش را می‌توان به عنوان معیاری برای سنجش توانایی آب فعال شده با پلاسما در غیرفعال کردن باکتری‌ها و در نظر گرفت (Surowsky et al., 2014; Zhang et al., 2013a).

از ۲۸۶ میلی‌ولت به ترتیب به ۵۵۳، ۵۷۸ و ۵۸۱ میلی‌ولت افزایش داده است.

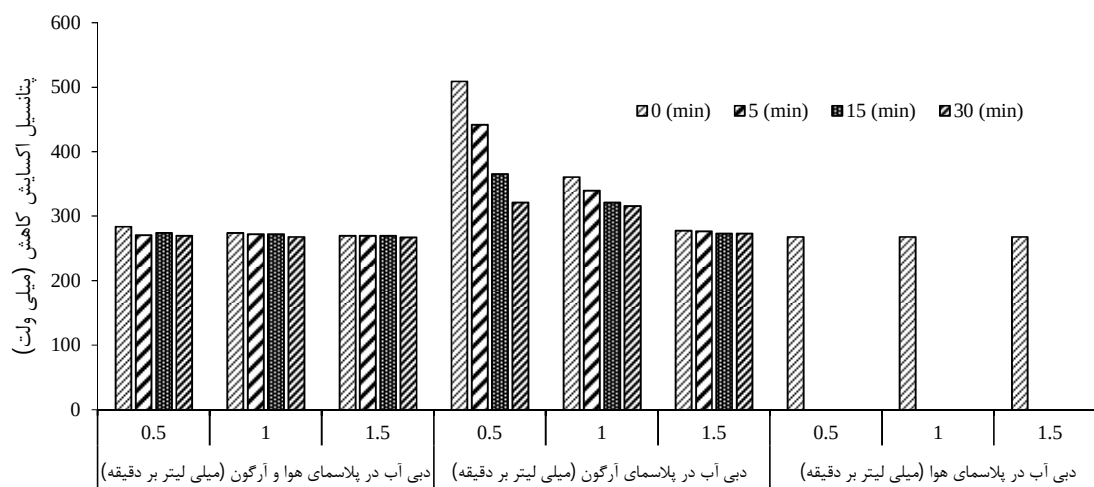
مطالعه (Wong et al., 2023) نشان داد افزایش زمان تیمار آب با پلاسما، افزایش پتانسیل اکسایش کاهش را در پی دارد که این امر به دلیل افزایش غلظت-های یون‌ها و رادیکال‌های آزاد  $H_2O_2$ , OH,  $O_3$ ,  $NO_3$ , ONOO در آب بوده است. در این مطالعه از آنجایی که اثر کاهش دبی همانند افزایش زمان تیماردهی با پلاسما

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس پتانسیل اکسایش کاهش تحت متغیرهای نوع آب، دبی و زمان پس از اعمال پلاسما

| منابع تغییرات   | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F value | Pr(>F) |
|-----------------|------------|--------------|----------------|---------|--------|
| آب              | ۲          | ۴۳۵۵۰        | ۲۱۷۷۵          | ۱۶/۴۲   | ***    |
| دبی             | ۲          | ۲۵۵۵۴۲       | ۱۲۷۷۷۱         | ۹۶/۳۹   | ***    |
| زمان            | ۳          | ۸۴۲۶۰        | ۲۸۰۸۷          | ۲۱/۱۹   | ***    |
| آب * دبی        | ۴          | ۱۱۰۲۴        | ۲۷۵۶           | ۲/۰۷    | ns     |
| آب * زمان       | ۶          | ۲۷۶۸         | ۴۶۱            | ۰/۳۴    | ns     |
| دبی * زمان      | ۶          | ۲۵۵۴۶        | ۴۲۵۸           | ۳/۲۱    | **     |
| آب * دبی * زمان | ۱۲         | ۱۷۵۷۸        | ۱۴۶۵           | ۱/۱۰    | ns     |
| خطا             | ۷۲         | ۹۵۴۳۲        | ۱۳۲۵           |         |        |

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس پتانسیل اکسایش کاهش تحت متغیرهای نوع گاز مولد پلاسما، دبی و زمان پس از اعمال پلاسما

| منابع تغییرات    | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F value | Pr(>F) |
|------------------|------------|--------------|----------------|---------|--------|
| گاز              | ۲          | ۲۸۲۸۶        | ۱۴۱۴۳          | ۴۵۹/۰   | ***    |
| دبی              | ۲          | ۱۲۴۲۴        | ۶۲۱۲           | ۲۰۱/۶   | ***    |
| زمان             | ۳          | ۲۳۸۲۴        | ۷۹۴۱           | ۲۵۷/۷   | ***    |
| گاز * دبی        | ۴          | ۱۲۴۴۸        | ۳۱۱۲           | ۱۰۱/۰   | ***    |
| گاز * زمان       | ۳          | ۷۵۵۸         | ۲۵۱۹           | ۸۱/۷    | ***    |
| دبی * زمان       | ۶          | ۸۹۹۷         | ۱۴۹۹           | ۴۸/۶    | ***    |
| گاز * دبی * زمان | ۶          | ۶۲۵۱         | ۱۰۴۲           | ۳۳/۸    | ***    |
| خطا              | ۵۴         | ۱۶۶۴         | ۳۱             |         |        |



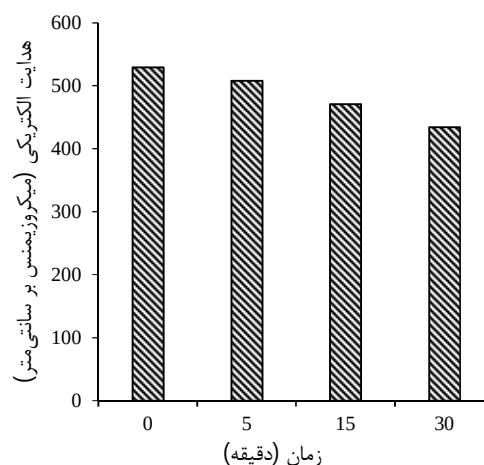
شکل ۳- تغییرات پتانسیل اکسایش کاهش تحت اثر پلاسمای ایجاد شده با هوا، آرگون و ترکیب هوا و آرگون به نسبت ۵۰ درصد حجمی در دبی‌های جریان آب ۰/۵ و ۱/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه در گذشت زمانهای ۱۵، ۵۰ و ۳۰ دقیقه پس از ایجاد آب فعال شده با پلاسما. تفاوت میانگین‌هایی که با حروف یکسان مشخص شده اند در سطح ۵٪ معنی‌دار نیست.

### هدایت الکتریکی (EC)

نتایج نشان داد که با استفاده از سامانه تولید آب فعال شده با پلاسما، هدایت الکتریکی برای آب لوله کشی شهری از ۵۶۳ تا ۲۳۶۰ میکروزیمنس بر سانتی متر، برای آب مقطر از ۱۲/۲ تا ۵۴۴ میکروزیمنس بر سانتی متر و برای آب دیونیزه از ۲/۵ تا ۱۵۴ میکروزیمنس بر سانتی متر افزایش می یابد.

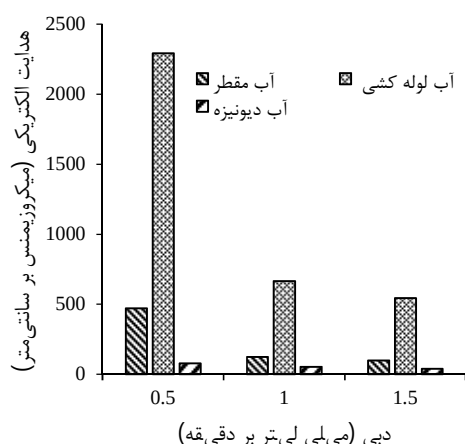
داده های کنترل قبل از اعمال پلاسما و داده های به دست آمده نشان دهنده تأثیرپذیری مناسب آب و ایجاد آب فعال شده با پلاسما با استفاده از سامانه توسعه داده شده است. بررسی تجزیه واریانس تأثیر عوامل مختلف سامانه بر هدایت الکتریکی نشان داد که آب، دبی و زمان تأثیر بسیار معنی داری بر هدایت الکتریکی داشتند. از بین برهم کنش تیمارها، تنها اثر آب  $\times$  دبی معنی دار شد و تلفیق سایر عوامل آزمایش با یکدیگر تأثیر معنی داری بر هدایت الکتریکی نداشتند (جدول ۴).

هدایت الکتریکی بلافاصله پس از اعمال پلاسما بر آب (زمان صفر) در بالاترین میزان خود بود و به تدریج با گذشت زمان پس از اعمال پلاسما، هدایت الکتریکی کاهش یافت. این کاهش تا ۵ دقیقه نخست، معنی دار نبود اما بعد از آن به ویژه پس از گذشت ۱۵ دقیقه، افت معنی داری مشاهده شد و در نهایت در زمان ۳۰ دقیقه کمترین هدایت الکتریکی مشاهده شد (شکل ۴).



شکل ۴- تغییرات هدایت الکتریکی تحت اثر گذشت زمان پس از ایجاد آب فعال شده با پلاسما. میانگین هایی که با حروف یکسان مشخص شده اند در سطح ۵٪ معنی دار نیستند.

در برهم کنش دوگانه دبی و آب، بیشترین هدایت الکتریکی در تیمار برهم کنش دبی ۰/۵ میلی لیتر بر دقیقه  $\times$  آب لوله کشی شهری رقم خورد. تیمار مذکور با سایر سطوح برهم کنش تیمارها اختلاف معنی داری داشت. با افزایش دبی آب، هدایت الکتریکی به جز در تیمار آب لوله کشی (در تمامی دبی های مورد بررسی) و آب مقطر (دبی ۰/۵ میلی لیتر بر دقیقه) به طور معنی داری کاهش یافت (شکل ۵).



شکل ۵- تغییرات هدایت الکتریکی تحت اثر دبی جریان آب ۰/۵ و ۱/۵ میلی لیتر بر دقیقه، برای سه نوع آب. میانگین هایی که با حروف یکسان مشخص شده اند در سطح ۵٪ معنی دار نیستند.

بررسی اثرات نوع گاز مولد پلاسما بر صفت هدایت الکتریکی نشان داد کلیه آثار اصلی و برهم کنش تیمارها در سطح یک صدم درصد معنی دار است (جدول ۵). در برهم کنش سه گانه گاز، دبی و زمان، بیشترین هدایت الکتریکی در برهم کنش دبی ۰/۵ میلی لیتر بر دقیقه  $\times$  زمان صفر و گاز آرگون رقم خورد. تیمار مذکور با سایر سطوح برهم کنش تیمارها اختلاف معنی داری داشت. کمترین هدایت الکتریکی در شرایط ترکیب ۵۰ درصد آرگون و هوا مشاهده شد. مطابق نتایج، با افزایش زمان تا سطح ۳۰ دقیقه، افت معنی داری در هدایت الکتریکی (در همه سطوح دبی) به وجود آمد (شکل ۶).

مطالعات Xu et al., (2016) نشان داد که گونه های فعال و یون های تولید شده در آب فعال شده با پلاسما باعث افزایش هدایت الکتریکی می شوند که با یافته های این تحقیق مطابقت دارد.

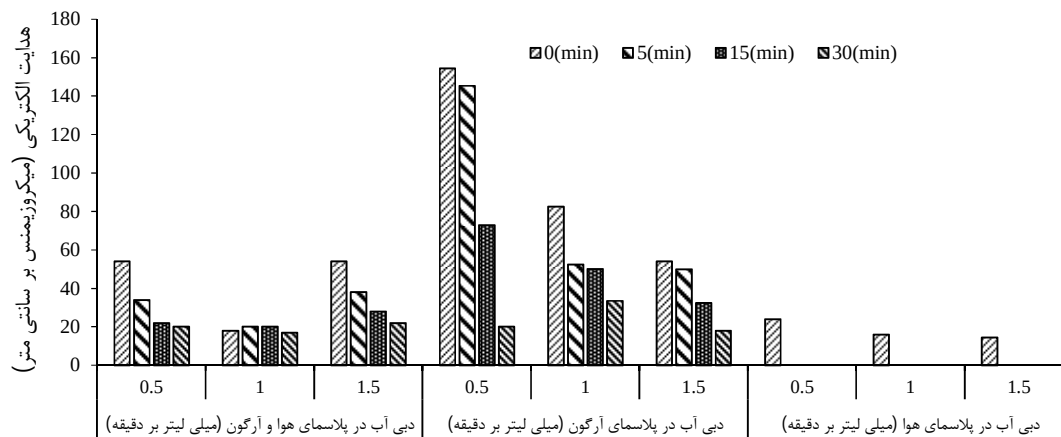
ماهیت و غلظت یون‌های موجود در محلول‌های آبی بین pH و هدایت الکتریکی رابطه معکوس وجود تیمار شده با پلاسما را می‌توان از طریق اندازه‌گیری هدایت الکتریکی تعیین کرد. (Lukes *et al.*, 2012).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس هدایت الکتریکی تحت متغیرهای نوع آب، دبی و زمان پس از اعمال پلاسما

| منابع تغییرات   | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F value | Pr(>F) |
|-----------------|------------|--------------|----------------|---------|--------|
| آب              | ۲          | ۲۵۵۸۰۰۱۰     | ۱۲۷۹۰۰۰۵       | ۱۸۳۶/۴  | ***    |
| دبی             | ۲          | ۱۱۹۲۲۱۱۳     | ۵۹۶۱۰۵۶        | ۸۵۵/۹   | ***    |
| زمان            | ۳          | ۱۴۲۰۴۸       | ۴۷۳۴۹          | ۶/۷     | ***    |
| آب * دبی        | ۴          | ۱۲۰۸۳۴۲۴     | ۳۰۲۰۸۵۶        | ۴۳۳/۷   | ***    |
| آب * زمان       | ۶          | ۲۰۷۸۲        | ۳۴۶۴           | ۰/۴۹    | ns     |
| دبی * زمان      | ۶          | ۴۳۲۲۴        | ۷۲۰۴           | ۱/۰۳    | ns     |
| آب * دبی * زمان | ۱۲         | ۲۴۴۴۳        | ۲۰۳۷           | ۰/۲۹    | ns     |
| خطا             | ۷۲         | ۵۰۱۴۱۳       | ۶۹۶۴           |         |        |

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس هدایت الکتریکی تحت متغیرهای گاز مولد پلاسما، دبی و زمان پس از اعمال پلاسما

| منابع تغییرات    | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F value | Pr(>F) |
|------------------|------------|--------------|----------------|---------|--------|
| گاز              | ۲          | ۲۸۲۸۶        | ۱۴۱۴۳          | ۴۵۹/۰   | ***    |
| دبی              | ۲          | ۱۲۴۲۴        | ۶۲۱۲           | ۲۰۱/۶   | ***    |
| زمان             | ۳          | ۲۳۸۲۴        | ۷۹۴۱           | ۲۵۷/۷   | ***    |
| گاز * دبی        | ۴          | ۱۲۴۴۸        | ۳۱۱۲           | ۱۰۱/۰   | ***    |
| گاز * زمان       | ۳          | ۷۵۵۸         | ۲۵۱۹           | ۸۱/۷    | ***    |
| دبی * زمان       | ۶          | ۸۹۹۷         | ۱۴۹۹           | ۴۸/۶    | ***    |
| گاز * دبی * زمان | ۶          | ۶۲۵۱         | ۱۰۴۲           | ۳۳/۸    | ***    |
| خطا              | ۵۴         | ۱۶۶۴         | ۳۱             |         |        |



شکل ۶- تغییرات هدایت الکتریکی تحت اثر پلاسمای ایجاد شده با هوا، آرگون و ترکیب هوا و آرگون به نسبت ۵۰ درصد حجمی در دبی‌های جریان آب ۰، ۵/۰ و ۱/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه در گذشت زمان‌های ۰، ۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه پس از ایجاد آب فعال شده با پلاسما. تفاوت میانگین‌هایی که با حروف یکسان مشخص شده‌اند در سطح ۵٪ معنی‌دار نیست.

ایجاد الکترون‌های فعال در طول زمان اعمال پلاسماست. در اثر اعمال پلاسما بر آب و فعالیت یون‌ها و رادیکال‌های آزاد با افزایش غلظت پراکسید هیدروژن، هدایت الکتریکی نیز افزایش می‌یابد.

مطالعات (Zhang *et al.*, 2015). (Ma *et al.*, 2016) و (Wu *et al.*, 2018) نشان داد که میزان هدایت الکتریکی آب فعال شده با پلاسما به طور قابل توجهی با زمان فعال‌سازی افزایش می‌یابد، که این امر نشان دهنده

این امر نشان دهنده تأثیرپذیری مناسب آب و ایجاد آب فعال شده با پلاسما با استفاده از سامانه توسعه داده شده است. مطابق تجزیه واریانس pH به جز اثر اصلی عوامل آب، دبی و زمان، فقط برهم کنش آب  $\times$  دبی معنی دار بود و سایر اثرات متقابل تیمارها نتوانست تغییر معنی داری بر pH آب نشان دهد (جدول ۶). در بررسی اثر اصلی زمان بر pH مشخص شد، تفاوت معنی داری بین زمان های صفر با ۵ دقیقه نبود، کمترین pH نیز مربوط به زمان ۳۰ دقیقه بود که از نظر آماری با زمان ۱۵ دقیقه در یک گروه آماری جای گرفتند. با گذشت زمان پس از ایجاد آب فعال شده با پلاسما، pH آن افزایش می یابد (شکل ۷) در برهم کنش دوگانه دبی و آب، بالاترین pH در آب دیونیزه و دبی ۱/۵ میلی لیتر بر دقیقه بود. این تیمار با دبی ۱ میلی لیتر بر دقیقه (آب دیونیزه و آب مقطر) تفاوت معنی داری نشان نداد، ولی اختلاف معنی داری با سایر سطوح تیمارها داشت. دبی ۰/۵ میلی لیتر بر دقیقه (در هر سه آب مورد بررسی) نیز کمترین pH را داشت (شکل ۸). بررسی تجزیه واریانس اثرات تغییر نوع گاز مولد پلاسما بر pH نشان داد که به جز پارامترهای گاز و دبی و برهم کنش گاز  $\times$  دبی، تغییرات معنی داری در pH بوجود نیامد (جدول ۷). در بررسی اثر برهم کنش دوگانه دبی و گاز بر pH نتایج نشان داد که، با افزایش دبی میزان pH افزایش یافته است، به نحوی که کمترین pH در دبی ۰/۵ میلی لیتر بر دقیقه و بیشترین pH در دبی ۱/۵ میلی لیتر بر دقیقه به دست آمد (شکل ۹).

Laurita et al., (2015) تأثیر استفاده از پلاسمای هوا را بر روی هدایت الکتریکی آب مطالعه کردند. پس از ۱۰ دقیقه فعال سازی، هدایت الکتریکی آب از ۱/۵ به ۱۴۳۵ میکروزیمنس بر سانتی متر افزایش یافت. بررسی Compton et al., (2008) و Lukes et al., (2022) نشان داد که هدایت الکتریکی آب فعال شده با پلاسمای هوا بیشتر از پلاسمای هلیوم یا آرگون است. Ma et al., (2015) دریافتند که آب مقطر پس از فعال شدن با جت پلاسمایی گاز ترکیبی آرگون و اکسیژن به مدت ۲۰ دقیقه، هدایت الکتریکی ۴۵۰ میکروزیمنس بر سانتی متر دارد. مطالعه دیگری افزایش خطی هدایت الکتریکی آب مقطر را از ۱۷ میکروزیمنس بر سانتی متر به ۲۱۸ میکروزیمنس بر سانتی متر پس از ۱۵ دقیقه فعال شدن با پلاسما نشان داد (Xu et al., 2016). افزایش یا کاهش هدایت الکتریکی به غلظت یونها و رادیکال های آزاد موجود در آب وابسته است که عواملی که باعث ازدیاد یونها و رادیکال های آزاد در آب شوند، هدایت الکتریکی را افزایش خواهند داد. در این مطالعه کاهش دبی باعث افزایش مدت ماند آب در مقابل پلاسما شده که از این طریق هدایت الکتریکی افزایش یافته است.

#### اسیدیته pH

با استفاده از سامانه تولید آب فعال شده با پلاسما، pH برای آب لوله کشی شهری از ۵/۴۷ تا ۴/۵، برای آب مقطر از ۷ تا ۵/۲ و برای آب دیونیزه از ۶/۹ تا ۴/۸ کاهش یافت.

جدول ۶- نتایج تجزیه pH تحت متغیرهای نوع آب، دبی و زمان پس از اعمال پلاسما

| منابع تغییرات   | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F value | Pr(>F) |
|-----------------|------------|--------------|----------------|---------|--------|
| آب              | ۲          | ۱۸/۹۳        | ۹/۴۶           | ۲۹/۵۳   | ***    |
| دبی             | ۲          | ۱۰/۹۸        | ۵/۴۹           | ۱۷/۱۳   | ***    |
| زمان            | ۳          | ۴/۶۰         | ۱/۵۳           | ۴/۷۸    | **     |
| آب * دبی        | ۴          | ۳/۵۸         | ۰/۸۹           | ۲/۷۹    | *      |
| آب * زمان       | ۶          | ۰/۵۶         | ۰/۰۹           | ۰/۲۹    | ns     |
| دبی * زمان      | ۶          | ۱/۶۵         | ۰/۲۷           | ۰/۸۶    | ns     |
| آب * دبی * زمان | ۱۲         | ۰/۲۶         | ۰/۰۲           | ۰/۰۷    | ns     |
| خطا             | ۷۲         | ۲۳/۰۷        | ۰/۳۲           |         |        |



مطالعه (Abuzairi *et al.*, 2018) نیز نشان داد pH آب پس از سه دقیقه اعمال پلاسما از ۷/۰۳ به ۳/۵۲ کاهش یافت. با توجه به پیوسته بودن جریان آب در این سامانه می‌توان بیان کرد کاهش دبی آب معادل افزایش زمان اعمال پلاسما بر آب بوده و نتایج مطالعه فوق با نتایج این تحقیق انطباق دارد.

با افزایش زمان تیماردهی با پلاسما میزان رادیکال-های آزاد در آب بیشتر شده که این عامل به اسیدی شدن بیشتر محیط کمک کرده و کاهش PH را در پی دارد.

مقایسه نتایج به دست آمده با سایر مطالعات (Basiri *et al.*, 2023) نیز مؤید این موضوع است.

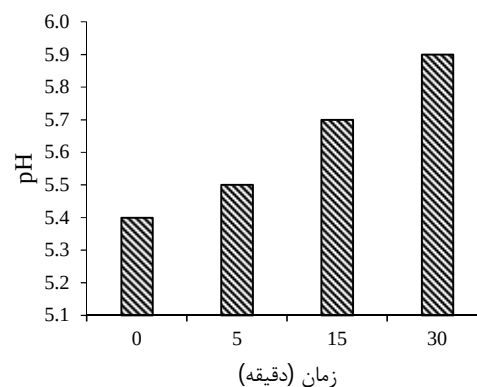
یافته‌های این تحقیق هم چنین نشان داد که pH تحت تأثیر نوع آب، نوع گاز، دبی و زمان سپری شده پس از فعال‌سازی با پلاسما قرار می‌گیرد. به طور کلی، pH پس از اعمال پلاسما در دبی‌های مختلف جریان آب کاهش نشان داد و با گذشت زمان پس از اعمال پلاسما روند افزایشی داشت (شکل ۹).

بررسی تجزیه واریانس اثرات تغییر نوع گاز مولد پلاسما بر pH نشان داد که به جز اثر اصلی پارامترهای گاز و تغییرات pH در آب دیونیزه و آب مقطر نسبت به آب لوله‌کشی شهری بیشتر بود.

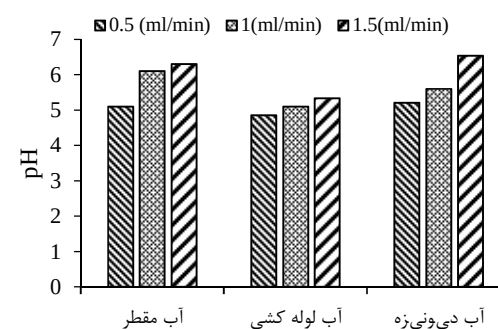
همچنین نتایج نشان داد که گاز آرگون نسبت به هوا تأثیر معنی‌داری بر افزایش pH دارد. در حالی که پلاسمای ایجاد شده با هوا و ترکیب (۵۰ درصد هوا و ۵۰ درصد آرگون) تأثیر معنی‌داری بر pH نداشتند (شکل ۹).

نتایج این تحقیق نشان داد که بین پتانسیل اکسایش کاهش و هدایت الکتریکی هم‌بستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. در مقابل، pH با پتانسیل اکسایش کاهش و هدایت الکتریکی هم‌بستگی معنی‌دار و منفی داشت (شکل ۱۰). لازم به ذکر است که این هم‌بستگی در مواردی که از گاز آرگون برای تیمار پلاسما استفاده می‌شد بیشتر و معنی‌دارتر است.

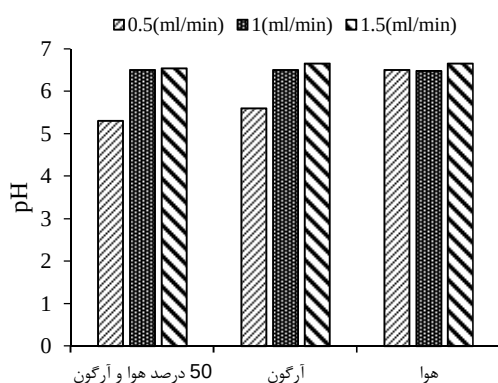
خواص ضدباکتریایی آب فعال شده با پلاسما با pH اسیدی، پتانسیل اکسایش کاهش بالا، آب اکسیژنه، نیترات و آنیون‌های نیتريت ایجاد شده توسط پلاسما در آب ارتباط مستقیم دارد (Xiang *et al.*, 2019).



شکل ۷- تغییرات pH تحت اثر گذشت زمان پس از ایجاد آب فعال شده با پلاسما. میانگین‌هایی که با حروف یکسان مشخص شده اند در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند



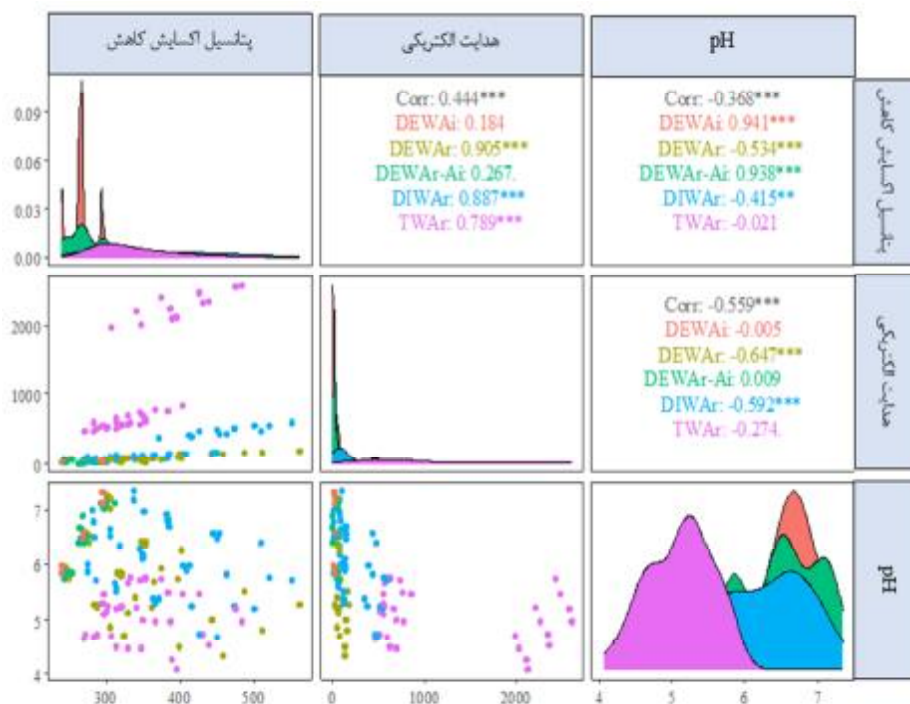
شکل ۸- تغییرات pH تحت اثر نوع آب استفاده شده در سه دبی جریان آب ۰/۵ و ۱/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه. (میانگین‌هایی که با حروف یکسان مشخص شده اند در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند.)



شکل ۹- تغییرات pH تحت اثر پلاسمای ایجاد شده با هوا، آرگون و ترکیب هوا و آرگون (نسبت ۵۰ درصد حجمی) در دبی‌های جریان آب ۰/۵ و ۱/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه تفاوت میانگین‌هایی که با حروف یکسان مشخص شده‌اند در سطح ۵٪ معنی‌دار نیست.

جدول ۷- نتایج تجزیه pH تحت متغیرهای گاز مولد پلاسما، دبی و زمان پس از اعمال پلاسما

| Pr(>F) | F value | میانگین مربعات | مجموع مربعات | درجه آزادی | منابع تغییرات    |
|--------|---------|----------------|--------------|------------|------------------|
| ***    | ۱۲/۷    | ۴/۹۲           | ۹/۸۵         | ۲          | گاز              |
| **     | ۵/۵     | ۲/۱۶           | ۴/۳۳         | ۲          | دبی              |
| ns     | ۱/۱     | ۰/۴۴           | ۱/۳۴         | ۳          | زمان             |
| *      | ۳/۵     | ۱/۳۶           | ۵/۴۵         | ۴          | گاز * دبی        |
| ns     | ۰/۹     | ۰/۳۷           | ۱/۱۳         | ۳          | گاز * زمان       |
| ns     | ۰/۱     | ۰/۰۶           | ۰/۳۷         | ۶          | دبی * زمان       |
| ns     | ۰/۲     | ۰/۰۸           | ۰/۵۰         | ۶          | گاز * دبی * زمان |
|        |         | ۰/۳۸           | ۲۰/۹۲        | ۵۴         | خطا              |



شکل ۱۰- ضرایب همبستگی پیرسون بین پتانسیل اکسایش کاهش، هدایت الکتریکی و pH برای منابع مختلف آب (آب دیونیزه، آب مقطر و آب لوله کشی) با استفاده از گازهای مختلف برای اعمال پلاسما (هوا، آرگون و ترکیب ۵۰-۵۰ هوا و آرگون) در دبی‌های مختلف آب در زمان‌های مختلف پس از اعمال تیمارها. نشانه‌های \* و \*\*\* به ترتیب در  $p > 0.01$  و  $p > 0.001$  معنی‌دار بود.

### نتیجه‌گیری

دیونیزه از ۲/۵ تا ۱۵۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر را منجر شد. برای آب لوله‌کشی شهری کاهش pH از ۵/۴۷ تا ۴/۵، برای آب مقطر از ۷ تا ۵/۲ و برای آب دیونیزه از ۶/۹ تا ۴/۸ حاصل شد که نشان دهنده تأثیرپذیری مناسب آب با استفاده از سامانه توسعه داده شده است. نتایج نشان داد تأثیر نوع آب، نوع گاز و دبی آب بر تغییرات پتانسیل اکسایش کاهش معنی‌دار است، همچنین مشاهده شد که هدایت الکتریکی با تیمار پلاسما در انواع مختلف آب و دبی‌های مختلف آب افزایش می‌یابد، اما با گذشت زمان پس از اعمال پلاسما روند کاهشی نشان می‌دهد.

نتایج این تحقیق نشان داد که سامانه تولید پیوسته آب فعال شده با پلاسما قابلیت عملکرد و تأثیر در شاخص‌های فیزیکی آب را دارد، به نحوی که پتانسیل اکسایش کاهش برای آب لوله‌کشی شهری از ۲۹۸ تا ۴۳۹ میلی‌ولت، برای آب مقطر از ۲۸۲ تا ۴۹۹ میلی‌ولت و برای آب دیونیزه از ۲۶۸ تا ۵۰۹ میلی‌ولت افزایش یافت. قرارگیری آب در این سامانه برای آب لوله‌کشی افزایش هدایت الکتریکی از ۵۶۳ تا ۲۳۶۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، برای آب مقطر از ۱۲/۲ تا ۵۴۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و برای آب

- Lin, C. M., Chu, Y. C., Hsiao, C. P., Wu, J. S., Hsieh, C. W., & Hou, C. Y. (2019). The optimization of plasma-activated water treatments to inactivate *Salmonella enteritidis* (ATCC 13076) on shell eggs. *Foods*, 8: 520.
- Los A., Ziuzina D., Boehm D., Cullen P. J., & Bourke P. (2020). Inactivation efficacies and mechanisms of gas plasma and plasmaactivated water against *Aspergillus flavus* spores and biofilms: a comparative study. *Appl Environ Microbiol*, 86:e02619-19. <https://doi.org/10.1128/AEM.02619-19>
- Lukes, P., Clupek, M., Babicky, V., & Sunka, P., (2008). Ultraviolet radiation from the pulsed corona discharge in water. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 17: 024012.
- Lukes, P., Locke, B. R., & Brisset, J. L. (2012). Aqueous-phase chemistry of electrical discharge plasma in water and in gas-liquid environments. *Plasma Chem. Catal. Gases Liq.*, 1: 243-308.
- Ma, R., Wang, G., Tian, Y., Wang, K., Zhang, J., & Fang, J. (2015). Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce. *J. Hazard. Mater.*, 300: 643-651.
- Ma, R., Yu, S., Tian, Y., Wang, K., Sun, C., Li, X., Zhang, J., Chen, K., & Fang, J. (2016a). Effect of non-thermal plasma-activated water on fruit decay and quality in postharvest Chinese bayberries. *Food Bioprocess Technol.*, 9: 1825-1834.
- Ma, R., Yu, S., Tian, Y., Wang, K., Sun, C., Li, X., Zhang, J., Chen, K., & Fang, J. (2016b). Effect of non-thermal plasma-activated water on fruit decay and quality in postharvest Chinese bayberries. *Food Bioprocess Technol.*, 9: 1825-1834.
- Rajabsadoughi, M., Mirdeghan, H., Nazori, F., & Shariat, M. (2021). Effect of plasma-activated water on some physiological characteristics of pistachio. *The 12th Congress of Horticultural Sciences of Iran*.
- Surowsky, B., Froehling, A., Gottschalk, N., Schlüter, O., & Knorr, D. (2014). Impact of cold plasma on *Citrobacter freundii* in apple juice: Inactivation kinetics and mechanisms. *Int. J. Food Microbiol.*, 174: 63-71.
- Takamatsu T., Kawate A., Uehara K., Oshita T., Miyahara H., & Dobrynin D. (2012). Bacterial inactivation in liquids using multi-gas plasmas. *Plasma Med*, 2: 237-247
- Thirumdas, R., Kothakota, A., Annapure, U., Siliveru, K., Blundell, R., Gatt, R., & Valdramidis, V. P. (2018). Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends Food Sci. Technol.*, 77: 21-31.

یافته‌های این تحقیق همچنین نشان داد که pH تحت تأثیر انواع آب، انواع گاز، دبی‌های مختلف آب و گذشت زمان پس از اعمال تیمار پلاسما قرار می‌گیرد. درضمن خواص آب فعال شده با پلاسما با گذشت زمان پس از اعمال پلاسما تغییر کرده و شبیه به آب غیر پلاسما می‌شود. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با اعمال پلاسما بر آب و ایجاد آب فعال شده با پلاسما میتوان از آن برای ضدعفونی محصولات کشاورزی استفاده کرد.

## منابع

- Abuzairi, T., Ramadhanty, S., Puspohadiningrum, D. F., Ratnasari, A., Poespawati, N. R., & Purnamaningsih, R. W. (2018). Investigation on physicochemical properties of plasma-activated water for the application of medical device sterilization, in: AIP Conference Proceedings. *AIP Publishing LLC*, p. 040017.
- Arjunan, K. P., Sharma, V. K., & Ptasinska, S. (2015). Effects of atmospheric pressure plasmas on isolated and cellular DNA—a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(2): 2971-3016.
- Basiri N., Zarei M, Kargar M., & Kafilzadeh, F. (2023). Advances in plasma-activated water technology on foodborne pathogens: current applications and future trends. *Journal of Applied Microbiology in Food Industry*, 9(1): 27-48.
- Compton, P., Dehkordi, N. R., Knapp, M., Fernandez, L. A., Alshawabkeh, A. N., & Larese-Casanova, P., N. D. (2022). Heterogeneous Fenton-like Catalysis of Electrogenerated H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for Dissolved RDX Removal. *Front. Chem. Eng.* 47.
- Esmaeili, Z., Hosseinzadeh Samani, B., Nazari, F., Rostami, S., & Nemati, A. (2022). The greentechnology of cold plasma jet on the inactivation of *Aspergillus flavus* and the total aflatoxin level in pistachio and its qualityproperties. *Journal of Food Process Engineering*, e14189
- Guo, J., Huang, K., Wang, X., Lyu, C., Yang, N., Li, Y., & Wang, J. (2017). Inactivation of yeast on grapes by plasma-activated water and its effects on quality attributes. *J. Food Prot.* 80: 225-230.
- Laurita, R., Barbieri, D., Gherardi, M., Colombo, V., & Lukes, P. (2015). Chemical analysis of reactive species and antimicrobial activity of water treated by nanosecond pulsed DBD air plasma. *Clin. Plasma Med.* 3: 53-61.

- Vlad I. E., Martin C., Toth A. R., Papp J., & Anghel S. D. (2018). Bacterial inhibition effect of plasma activated water. *Romanian Reports in Physics*, 71: 602.
- Wong, K. S., Chew, N. S. L., Low, M., Tan, M. K. (2023). Plasma-Activated Water: Physicochemical Properties, Generation Techniques, and Applications. *Processes*, 11, 2213. <https://doi.org/10.3390/pr11072213>
- Wu, M. C., Liu, C. T., Chiang, C. Y., Lin, Y. J., Lin, Y. H., Chang, Y. W., & Wu, J. S. (2018). Inactivation effect of Colletotrichum gloeosporioides by long-lived chemical species using atmospheric-pressure corona plasma-activated water. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 47: 1100-1104.
- Xiang, Q., Kang, C., Niu, L., Zhao, D., Li, K., & Bai, Y. (2018). Antibacterial activity and a membrane damage mechanism of plasma-activated water against *Pseudomonas deceptionensis* CM2. *Lwt*, 96: 395-401.
- Xiang, Q., Kang, C., Zhao, D., Niu, L., Liu, X., & Bai, Y. (2019). Influence of organic matters on the inactivation efficacy of plasma-activated water against *E. coli* O157: H7 and *S. aureus*. *Food Control*, 99: 28-33.
- Xu, Y., Tian, Y., Ma, R., Liu, Q., & Zhang, J., (2016). Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*. *Food Chem.*, 197: 436-444.
- Yang, X., Zhang, C., Li, Q., & Cheng, J. H. (2023). Physicochemical, Properties of Plasma-Activated Water, and Its Control Effects on the Quality, of Strawberries. *Molecules*, 28: 2677.
- Zare, S., Nikkhah, R., Karami, L., & Hesami, A. (2021). Effect of Nanosilica and plasma-activated water on the Storage Quality of Sweet Lemon. *The 12<sup>th</sup> Congress of Horticultural Sciences of Iran*.
- Zhang, Q., Liang, Y., Feng, H., Ma, R., Tian, Y., Zhang, J., Fang, J., (2013a). A study of oxidative stress induced by non-thermal plasma-activated water for bacterial damage. *Appl. Phys. Lett.*, 102: 203701.
- Zhang, Q., Ma, R., Tian, Y., Su, B., Wang, K., Yu, S., Zhang, J., Fang, J., (2016). Sterilization efficiency of a novel electrochemical disinfectant against *Staphylococcus aureus*. *Environ. Sci. Technol.*, 50: 3184-3192.