



بررسی فعالیت اکسیدانی و بهینه‌سازی تولید آب فعال شده با پلاسمای سرد

آزاده رنجبر ندامانی^{۱*}، علی تقوی^۲، الهام رنجبر ندامانی^۳

- ۱- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری‌های پس از برداشت، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳- دکترای شیمی مواد غذایی، کارشناس تحقیق و توسعه کاله، آمل، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ‌های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

کلمات کلیدی:

آب فعال شده،

پلاسمای سرد،

دیزاین اکسپرت،

پراکسید هیدروژن

DOI: 10.22034/FSCT.22.161.214.

* مسئول مکاتبات:

a.ranjbar@sanru.ac.ir

آب فعال شده با پلاسمای سرد به‌عنوان یک جایگزین غیرسمی و دوستدار محیط‌زیست معرفی و کارایی خود در برابر طیف گسترده‌ای از عوامل بیماری‌زا از جمله باکتری‌ها، ویروس‌ها و قارچ‌ها را نشان داده است. در این پژوهش از آب شهری برای فعال‌سازی توسط دستگاه مولد پلاسمای سرد با استفاده از یک رآکتور پلاسما شامل الکترودهای مسی و فولادی، ولتاژ ۲۰ kV و جریان ۳ mA با کمک هوای اتمسفر استفاده شد. برای تولید آب فعال شده، طرح آزمایشات توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ورژن ۱۲ در قالب طرح باکس-بنکن با فاکتورهای زمان تیمار با پلاسما (۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه)، سرعت تزریق هوا (۰/۵ m/s، ۱ و ۱/۵) و دمای نگهداری آب فعال شده با پلاسمای سرد (۲۰°C، ۴ و ۲۰-) اجرا شد. قبل از استفاده، ویژگی‌های آب از جمله میزان پراکسید هیدروژن، اکسیژن، سختی کل، ازن، نیترات، نیتريت و کلر اندازه‌گیری شد. این ویژگی‌ها طی مدت روزهای ۱، ۲، ۳ و ۶ نیز مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان دادند تمام فاکتورهای مورد مطالعه بر نتایج مورد بررسی اثر معنادار داشتند. اثر متقابل این فاکتورهای نیز در برخی موارد اثر معنادار کاهشی و یا افزایش بر نتایج داشتند. به‌طور کلی مشخص شد دمای نگهداری محیط، زمان تیمار بیشتر با پلاسمای سرد، و سرعت هوای ۱ m/s می‌تواند آب فعال با ویژگی‌های اکسیدانی بهتری را تهیه کند. شرایط بهینه تولید آب فعال شده نیز عبارت بود از زمان تیمار ۲۳/۵ دقیقه با پلاسمای سرد، سرعت هوای ۰/۹۷ m/s و دمای نگهداری ۲۰°C.

۱-مقدمه

مواد غذایی به حداقل می‌رساند (Guo et al., 2021; Xiang et al., 2022).

مطالعات اخیر نشان داده است که PAW می‌تواند به طور مؤثر پاتوژن‌های مختلف مسئول بیماری‌های ناشی از غذا را غیرفعال کند. به عنوان مثال، گو و همکاران (۲۰۱۷) دریافتند که PAW می‌تواند ساکارومایسس سرویزیه CICC 1374 را از سطح انگور بدون تغییر قابل توجهی در رنگ سطح و محتوای آنتوسیانین پس از ۳۰ دقیقه کاهش دهد (Guo et al., 2017). علی و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد مایع فعال شده با پلاسما (PAL)^۲ به علاوه محلول بافر فعال شده با پلاسما (PABS)^۳ باعث کاهش آفت‌کش‌های کلروتالونیل و تیرام در میوه گوجه‌فرنگی شد (Ali et al., 2021). لیو چنگ هوی و همکاران (۲۰۲۰) اثر PAW تولید شده در ۷ کیلوهرتز با ۶، ۸ و ۱۰ کیلو ولت را بررسی کرد. آنها گزارش کردند که PAW می‌تواند باکتری‌های هوازی، کپک‌ها، مخمرها و کلیفرم‌های سطح برش‌زده سیب فوجی را کاهش دهد (C. Liu et al., 2020) و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که غلظت پراکسی نیتروس اسید (ONOOH) در PAW با پراکسید هیدروژن برهم‌کنش دارد و اسید پراکسی نیتریک (O₂NOOH) را تولید می‌کند که بعداً به O₂⁻ و O₂¹ تجزیه می‌شود. این ترکیبات مسئول افزایش اثرات ضدباکتریایی PAW هستند (Ma et al., 2020).

تحقیقات همچنین نشان داده است که ترکیب منحصربه‌فرد PAW می‌تواند کاربرد آن در مراحل مختلف تولید مواد غذایی از شستشوی محصولات تازه گرفته تا ضدعفونی کردن تجهیزات و سطوح فراوری مواد غذایی را تسهیل کند. تطبیق پذیری PAW به این معنی است که می

در سال‌های اخیر، صنایع غذایی به طور فزاینده‌ای به دنبال راه حل‌های نوآورانه برای افزایش ایمنی مواد غذایی، افزایش عمر مفید و به حداقل رساندن استفاده از افزودنی‌های شیمیایی بوده است. یکی از فناوری‌های امیدوارکننده که مورد توجه قرار گرفته است، آب فعال‌شده با پلاسما (PAW)^۱ است. این نوع آب، با استفاده از پلاسمای سرد تولید می‌شود و حاوی گونه‌های واکنش‌پذیری مانند رادیکال‌ها، یون‌ها و ازن است که می‌توانند ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب را تغییر دهند. مشخص شده است که این تغییرات اثرات ضد میکروبی و آنتی اکسیدانی آب را افزایش داده و آن را برای کاربردهای مختلف در فراوری مواد غذایی قابل استفاده می‌سازد (Han et al., 2023; Herianto et al., 2021).

افزایش تقاضای جهانی برای روش‌های فراوری مواد غذایی ایمن‌تر و پایدارتر، نیاز به جایگزینی برای روش‌های سالم‌سازی و نگهداری مرسوم را ایجاد کرده است. روش‌های سنتی اغلب بر ضدعفونی‌کننده‌های شیمیایی تکیه می‌کنند که ممکن است بقایای مضر از خود به جای بگذارند و نگرانی‌های مصرف‌کننده در مورد ایمنی مواد غذایی و حفظ محیط‌زیست را افزایش دهند. در این زمینه، PAW به عنوان یک جایگزین غیرسمی و دوستدار محیط‌زیست ظاهر شده است و کارایی خود در برابر طیف گسترده‌ای از عوامل بیماری‌زا از جمله باکتری‌ها، ویروس‌ها و قارچ‌ها را نشان داده است (Guo et al., 2017; Hadinoto et al., 2021; Julák et al., 2018; Rathore et al., 2021; Xiao et al., 2023). استفاده از PAW تغییراتی در صنایع غذایی ایجاد می‌کند که راستای فراوری‌های دوستدار محیط‌زیست بوده و اتکا به مواد شیمیایی مضر را با حفظ استانداردهای ایمنی

3 -Plasma-Activated Buffer Solution

1 -Plasma- Activated Water

2 -Plasma-Activated Plasma

این طریق می‌باشد. با استفاده از یک رآکتور پلاسما شامل الکترودهای مسی و فولادی، ولتاژ ۲۰ kV، جریان ۳ mA با کمک هوای اتمسفر تولید و با نمونه برخورد می‌کرد.



شکل ۱- دستگاه مولد پلاسمای سرد

Figure 1- Cold- Plasma Emitter Machine

طرح آزمایشات توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۴ ورژن ۱۲ در قالب طرح باکس- بنکن با فاکتورهای زمان تیمار با پلاسما (۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه)، سرعت تزریق هوا (۰/۵ m/s، ۱ و ۱/۵) و دمای نگهداری آب فعال شده با پلاسمای سرد (۲۰ °C، ۴ و -۲۰) طبق جدول ۱ اجرا شد. در این پژوهش از آب شهری برای فعال‌سازی استفاده شد. زیرا در بررسی مقالات مشخص شده است استفاده از آب مقطر در فعال‌سازی نقشی نداشته و برای این کار تاکنون از آب شیر استفاده شده است (Han et al., 2023; Hoeben et al., 2019; Hou et al., 2021; Traylor et al., 2011).

جدول ۱- طرح باکس- بنکن برای تولید نمونه‌های PAW

Table 1- Box-Behnken Design for producing the PAW samples

Run	Cold- Plasma time (min)	Air Velocity (m/s)	Storage Temperature (°C)
1	30	0.5	0
2	0	1.5	0
3	15	0.5	-20
4	0	1	-20
5	30	1	-20
6	0	1	20
7	15	1	0
8	30	1	20
9	15	1.5	20
10	15	1	0

توان آن را در پروتکل‌های ایمنی مواد غذایی موجود ادغام کرد و در نتیجه بهداشت کلی را بدون سرمایه گذاری اضافی در فناوری‌های جدید افزایش داد (Al-Sharify et al., 2020; Milhan et al., 2022; Xiao et al., 2023). به عنوان مثال، در فراوری میوه‌ها و سبزیجات تازه بریده شده، PAW در کاهش بار میکروبی و در عین حال حفظ کیفیت و ویژگی‌های حسی محصولات، نویدبخش بوده است (Hou et al., 2021; Wong et al., 2023; Zhao et al., 2020; Zhou et al., 2018).

علی‌رغم ویژگی‌های امیدوارکننده PAW، تحقیقات بیشتری برای درک کامل شرایط بهینه برای تولید آن، مانند مدت‌زمان تیمار پلاسمای سرد در آب، شرایط تخلیه پلاسما، و دمای ذخیره‌سازی PAW مورد نیاز است. در این مطالعه، تأثیر برخی شرایط تولید و نگهداری بر فعالیت PAW مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

تولید PAW:

برای تولید PAW از دستگاه مولد پلاسمای سرد ساخته شده در مرکز رشد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (شکل ۱) استفاده شد. این دستگاه شامل بخش مولد پلاسمای سرد و بخش نگهداری نمونه است که قادر به تولید پلاسمای سرد و تماس مستقیم نمونه با هوای یونیزه شده از

11	15	1	0
12	30	1.5	0
13	15	1	0
14	0	0.5	0
15	15	1.5	-20
16	15	1	0
17	15	0.5	20

تعیین ویژگی‌های شیمیایی آب

قبل از استفاده، ویژگی‌های آب از جمله میزان پراکسید هیدروژن (کیت Karizab 4436)، اکسیژن (کیت Arak Chemical Eng. Co. AK 3060)، سختی کل (Arak Chemical CO)، ازن (Arak Chemical Eng. Co. 3096)، نیترات (Arak Chemical Co. 3020)، نیتريت (Arak Chemical Co. 3015) و کلر (Arak Chemical CO.) اندازه‌گیری شد. این ویژگی‌ها طی مدت روزهای ۱، ۲، ۳ و ۶ نیز مورد آزمون قرار گرفتند.

تجزیه و تحلیل آماری

کلیه آزمون‌ها در سه تکرار انجام و تجزیه و تحلیل آماری با استفاده نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۰ با کمک آنالیز واریانس با آزمون توکی برای تعیین میزان معنی‌داری انجام شد. مقدار p کمتر از ۰/۰۵ از نظر آماری معنی‌دار در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

جدول ۲ تحلیل آماری اثر فاکتورهای مورد مطالعه زمان تیمار با پلاسمای سرد، سرعت هوای ورودی، زمان نگهداری و دمای نگهداری آب فعال شده با پلاسمای سرد را در سطح ۵٪ ($p < ۰/۰۵$) نشان می‌دهد. طبق این جدول، اثر زمان پلاسمای سرد (۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه) بر روی پاسخ‌های نیترات و سختی کل معنادار بوده است. سرعت هوای ورودی (m/s) ۰/۵، ۱ و ۱/۵ بر نیتريت و سختی کل معنادار بوده است. دمای نگهداری ($^{\circ}C$ ۲۰، ۴ و -۲۰) بر سختی کل معنادار بوده و در نهایت روزهای نگهداری (۱، ۲، ۳ و ۶ روز) اثر معناداری بر همه فاکتورها به جز نیتريت و ازن داشته است. این یافته نشان می‌دهد فاکتورهای مورد مطالعه توانسته‌اند اثر معناداری بر کیفیت و میزان فعالیت گونه‌های فعال تولید شده طی تیمار با پلاسمای سرد شوند.

جدول ۲- تحلیل ANOVA اثر معناداری فاکتورهای مورد بررسی بر روی پاسخ‌های مورد مطالعه

Table 2- ANOVA analysis for the effect of factors on studied results

		Cold-Plasma Time (min)				
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Nitrate	Between Groups	204.118	2	102.059	3.626	0.032
	Within Groups	1829.764	65	28.150		
	Total	2033.882	67			
Nitrite	Between Groups	0.038	2	0.019	2.067	0.135
	Within Groups	0.593	65	0.009		
	Total	0.631	67			
Ozone	Between Groups	0.054	2	0.027	2.267	0.112
	Within Groups	0.775	65	0.012		
	Total	0.829	67			
Chloride	Between Groups	0.076	2	0.038	2.081	0.133
	Within Groups	1.187	65	0.018		
	Total	1.263	67			
Hardness	Between Groups	289808.563	2	144904.281	7.258	0.001
	Within Groups	1297664.188	65	19964.064		
	Total	1587472.750	67			
Oxygen	Between Groups	23.721	2	11.860	0.329	0.721
	Within Groups	2345.135	65	36.079		
	Total	2368.856	67			
H2O2	Between Groups	111.890	2	55.945	1.175	0.315

Within Groups		3094.625	65	47.610		
Total		3206.515	67			
Air Velocity (m/s)						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Nitrate	Between Groups	11.118	2	5.559	0.179	0.837
	Within Groups	2022.764	65	31.119		
	Total	2033.882	67			
Nitrite	Between Groups	0.045	2	0.023	2.505	0.089
	Within Groups	0.586	65	0.009		
	Total	0.631	67			
Ozone	Between Groups	0.026	2	0.013	1.064	0.351
	Within Groups	0.803	65	0.012		
	Total	0.829	67			
Chloride	Between Groups	0.060	2	0.030	1.632	0.204
	Within Groups	1.202	65	0.018		
	Total	1.263	67			
Hardness	Between Groups	154371.924	2	77185.962	3.501	0.036
	Within Groups	1433100.826	65	22047.705		
	Total	1587472.750	67			
Oxygen	Between Groups	25.841	2	12.920	0.358	0.700
	Within Groups	2343.015	65	36.046		
	Total	2368.856	67			
H2O2	Between Groups	5.765	2	2.882	0.059	0.943
	Within Groups	3200.750	65	49.242		
	Total	3206.515	67			
Storage Temperature (°C)						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Nitrate	Between Groups	10.132	2	5.066	0.163	0.850
	Within Groups	2023.750	65	31.135		
	Total	2033.882	67			
Nitrite	Between Groups	0.011	2	0.006	0.577	0.565
	Within Groups	0.620	65	0.010		
	Total	0.631	67			
Ozone	Between Groups	0.039	2	0.020	1.615	0.207
	Within Groups	0.790	65	0.012		
	Total	0.829	67			
Chloride	Between Groups	0.035	2	0.018	0.936	0.397
	Within Groups	1.227	65	0.019		
	Total	1.263	67			
Hardness	Between Groups	382001.569	2	191000.785	10.299	0.000
	Within Groups	1205471.181	65	18545.710		
	Total	1587472.750	67			
Oxygen	Between Groups	94.519	2	47.259	1.351	0.266
	Within Groups	2274.337	65	34.990		
	Total	2368.856	67			
H2O2	Between Groups	0.265	2	0.132	0.003	0.997
	Within Groups	3206.250	65	49.327		
	Total	3206.515	67			
Storage Days						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Nitrate	Between Groups	608.588	3	202.863	9.109	0.000
	Within Groups	1425.294	64	22.270		
	Total	2033.882	67			
Nitrite	Between Groups	0.035	3	0.012	1.258	0.296
	Within Groups	0.596	64	0.009		
	Total	0.631	67			
Ozone	Between Groups	0.051	3	0.017	1.404	0.250
	Within Groups	0.778	64	0.012		
	Total	0.829	67			
Chloride	Between Groups	0.656	3	0.219	23.044	0.000
	Within Groups	0.607	64	0.009		
	Total	1.263	67			
Hardness	Between Groups	285850.750	3	95283.583	4.685	0.005
	Within Groups	1301622.000	64	20337.844		
	Total	1587472.750	67			
Oxygen	Between Groups	664.995	3	221.665	8.326	0.000

	Within Groups	1703.860	64	26.623		
	Total	2368.856	67			
	Between Groups	2078.868	3	692.956	39.329	0.000
H2O2	Within Groups	1127.647	64	17.619		
	Total	3206.515	67			

میزان ترکیبات اکسیدانی فعال در PAW نشده است. هرچند فاکتور سرعت هوای ورودی و فاکتور زمان تیمار با پلاسما به طور مجزا توانسته اند اثر معنادار قوی بر تولید این ترکیبات از خود نشان دهند، اما در مجموع اثر متقابل آن‌ها در برخی شرایط معنادار بوده است. برای مثال افزایش زمان تیمار با پلاسما و افزایش سرعت هوای ورودی توانسته است تفاوت معناداری در کاهش سختی داشته باشد که این نتیجه تحقیقات در زمینه تصفیه پساب و آب توسط پلاسما سرد را تأیید می‌کند. سرعت هوا در زمان ۱۵ و ۳۰ دقیقه تیمار با پلاسما سرد، بر سختی و ازن اثر معنادار کاهنده‌ای داشته است.

زمانی که PAW تولید می‌شود، فرآیندهای مختلفی در لایه مرزی آب و پلاسما رخ می‌دهد؛ مانند انتقال گونه‌های فعال تولید شده در پلاسما، به آب و بروز برهمکنش‌های شیمیایی بین گونه‌های فعال و مولکول‌های آب (Wende et al., 2019). تخلیه‌های تولید شده درون آب، بسیار فعال و گذرا بوده و فرآیندهای نابودی گونه‌های فعال رخ می‌دهند که اغلب در میدان‌های الکتریکی قوی بروز می‌کنند و باعث تشکیل گونه‌های با عمر کوتاهی مانند یون‌های هیدروکسیل و الکترون‌های هیدراته محلول می‌شود (Khlyustova et al., 2019). واکنش‌های سریع بعدی بین یون‌های هیدروکسیل و الکترون‌های هیدراته محلول منجر به تولید گونه‌های فعالی مانند ازن و پراکسید هیدروژن می‌شوند. لیو و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند گونه‌های فعال اکسیژن با افزایش سرعت هوای ورودی کاهش یافتند. آن‌ها این اتفاق را ناشی از این می‌دانستند که هوا سهم زیادی از فاز گازی گونه‌های فعال را از محفظه با خود برده و باعث کاهش امکان حل شدن آن گونه‌های فعال در آب می‌شود (K. Liu et al., 2020).

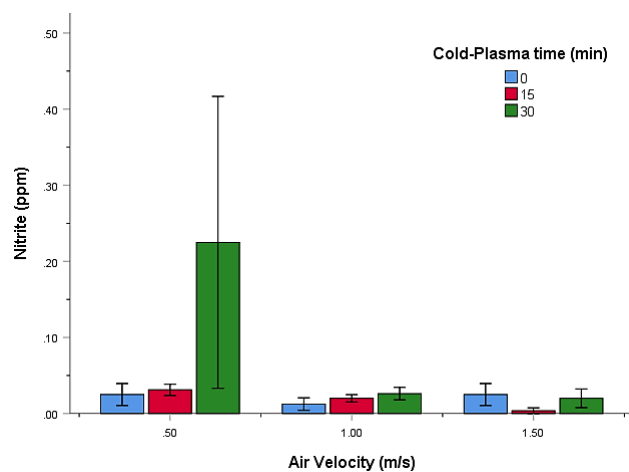
اغلب سیستم‌های مولد پلاسما سرد در فشار اتمسفر و با هوای معمولی برای تولید آب فعال شده استفاده شده‌اند، زیرا طراحی این سیستم‌ها آسان و نگهداری آن‌ها ارزان است. اما باید خاطر نشان کرد ویژگی‌های فرایند تولید آب فعال شده با پلاسما از جمله توان، ولتاژ، نوع گاز در بین تیمارهای مختلف متفاوت است. مطالعات زیادی بر بررسی اثر فاکتورهای تولید PAW تمرکز داشته‌اند (Guo et al., 2021; Han et al., 2023; Zhou et al., 2020). همکاران (۲۰۱۸) اثر ولتاژ و زمان تیمار در تولید PAW توسط آب مقطر را بررسی کرده و گزارش دادند با افزایش ولتاژ در تولید PAW، ویژگی کاهش جمعیت میکروبی آن نیز افزایش می‌یابد (Qi et al., 2018). ژائو و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش دادند که بالاتر بردن ولتاژ و زمان در معرض قرار گرفتن آب، باعث افزایش ویژگی غیرفعال‌سازی میکروبی PAW خواهد شد (Zhao et al., 2020). در این تحقیق مشخص شد که فاکتورهای مورد مطالعه بر ویژگی‌های اکسیدانی آب فعال شده با پلاسما اثر داشته است. همچنین اثر متقابل زمان تیمار با پلاسما و فاکتورهای روز نگهداری، دمای نگهداری و سرعت هوای ورودی در شکل‌های ۱ الی ۳ نشان داده می‌شود.

اثر سرعت زمان تیمار با پلاسما سرد و هوای ورودی بر مقدار ترکیبات فعال

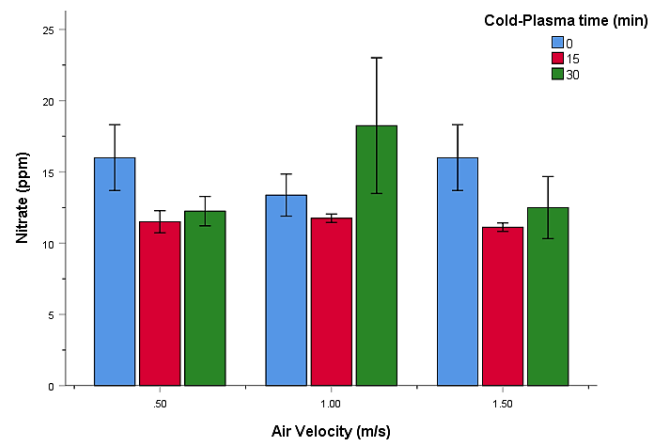
یکی از فاکتورهای مؤثر بر اثربخشی PAW، نرخ جریان گاز است (Wong et al., 2023; Xiao et al., 2023). طبق مطالعات انجام شده، نرخ جریان گاز، همواره رابطه مثبتی با فعالیت اکسیدانی PAW از خود نشان نداده است. در این مطالعه، شکل ۱ نشان می‌دهد اثر متقابل سرعت هوای ورودی و زمان تیمار با پلاسما باعث تغییرات معنادار در

یا با تولید گازهایی که منجر به برهم‌کنش با این یونها می‌شوند، این یونها را از دسترس خارج می‌کنند (Kamgang-Youbi et al., 2009; Zhao et al., 2020).

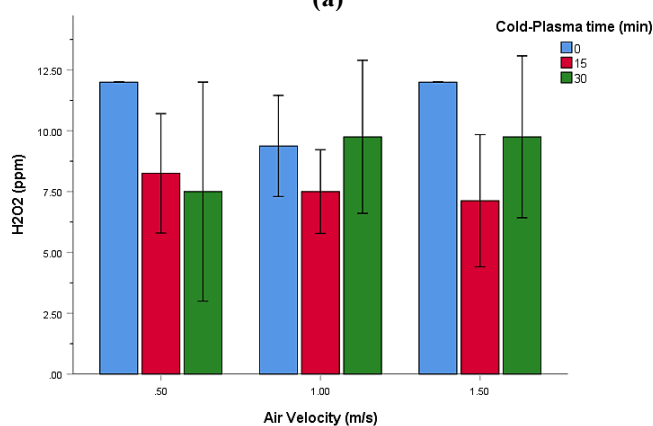
می‌توان کاهش سختی آب در اثر افزایش زمان تیمار با پلاسمای سرد را ناشی از تولید رادیکال‌های آزاد در آب دانست که می‌توانند یون‌های کلسیم و منیزیم را تجزیه کنند



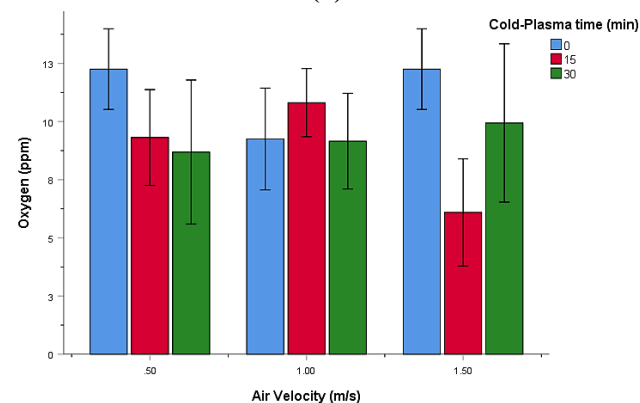
(a)



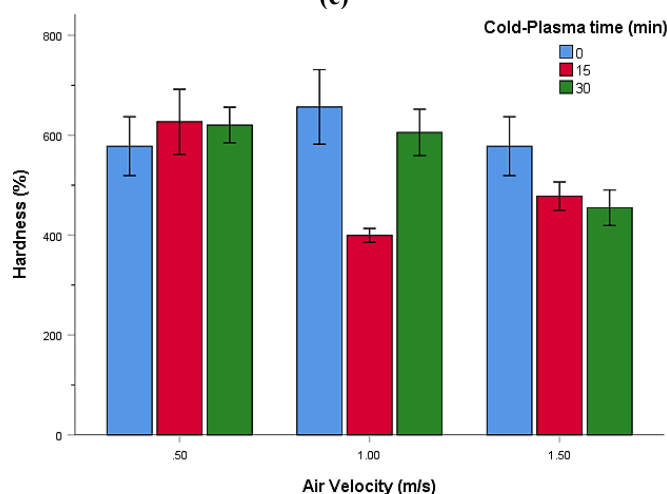
(b)



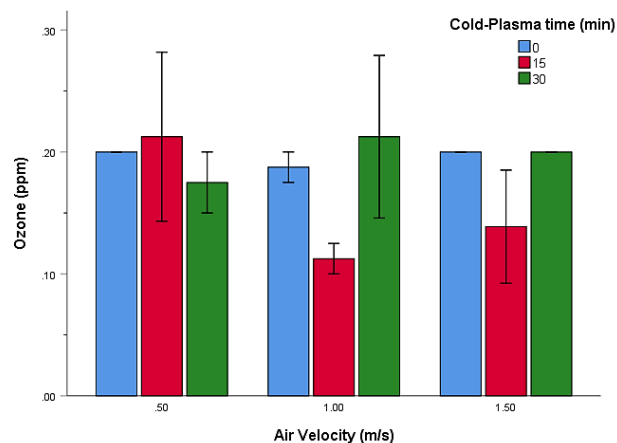
(c)



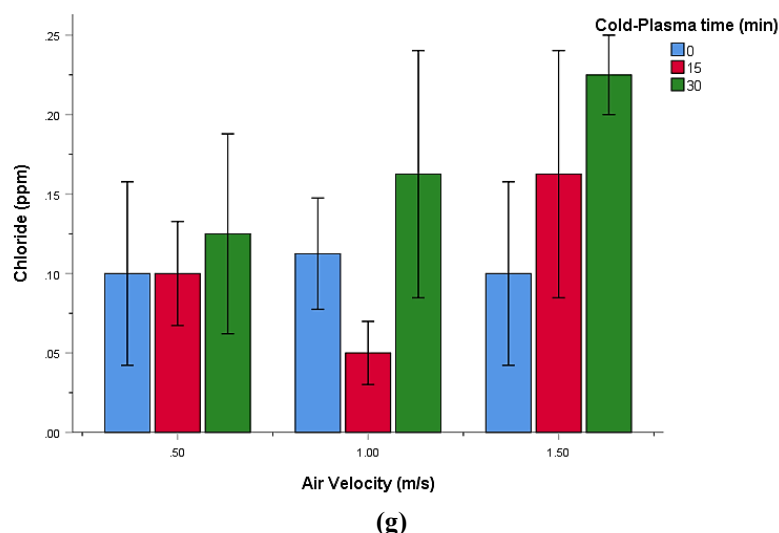
(d)



(e)



(f)



(g)

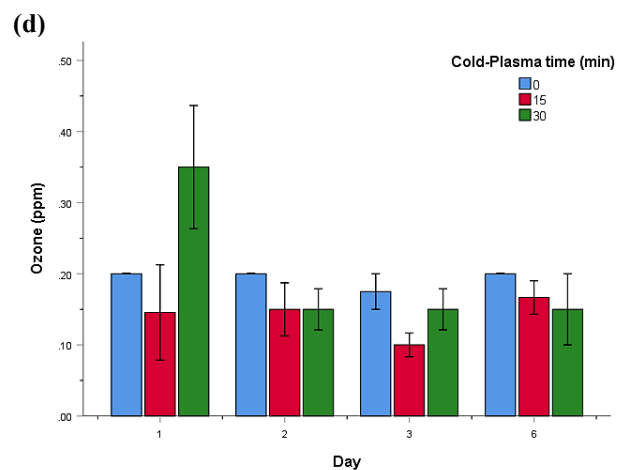
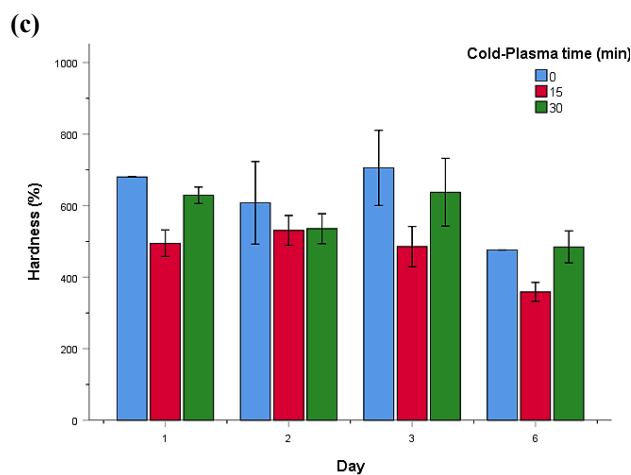
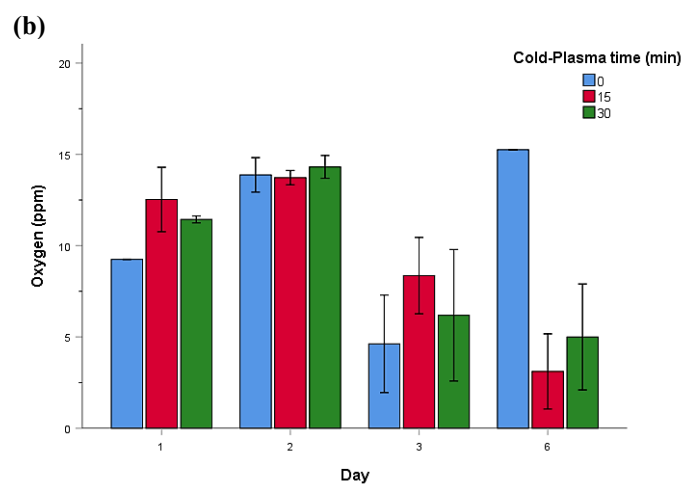
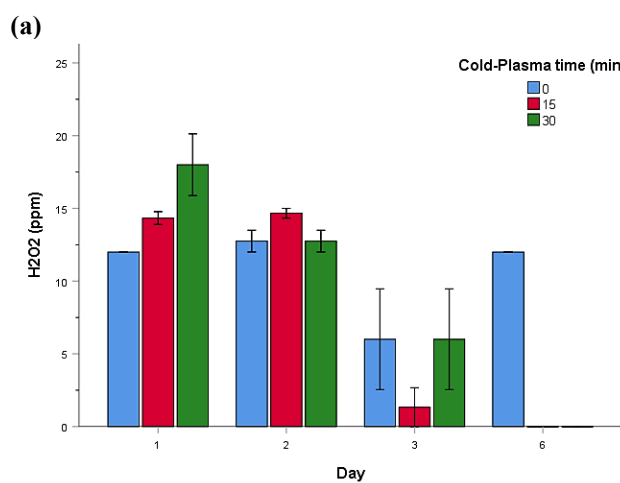
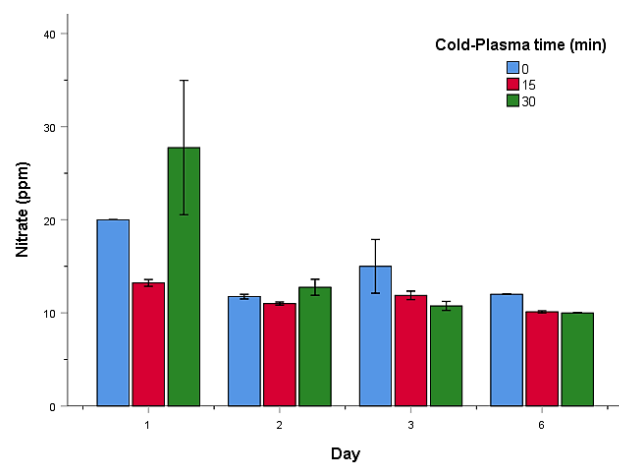
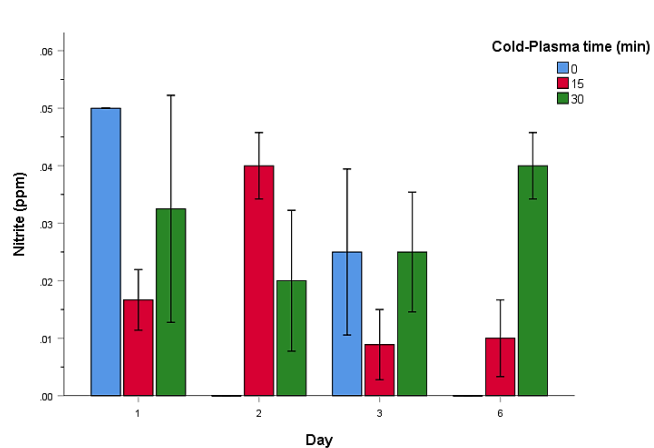
شکل ۱- اثر متقابل زمان تیمار پلاسمای سرد و سرعت هوای ورودی بر میزان محتوای نیتريت (a)، نیترات (b)، پراکسید هیدروژن (c)، اکسیژن (d)، سختی (e)، ازن (f) و کلر (g)

Figure 1- The interaction effect of cold-plasma time and inlet air velocity on Nitrite (a), Nitrate (b), H_2O_2 (c), Oxygen (d), Hardness (e), Ozone (f), and Chloride (g) contents

اثر زمان نگهداری بر مقدار ترکیبات فعال

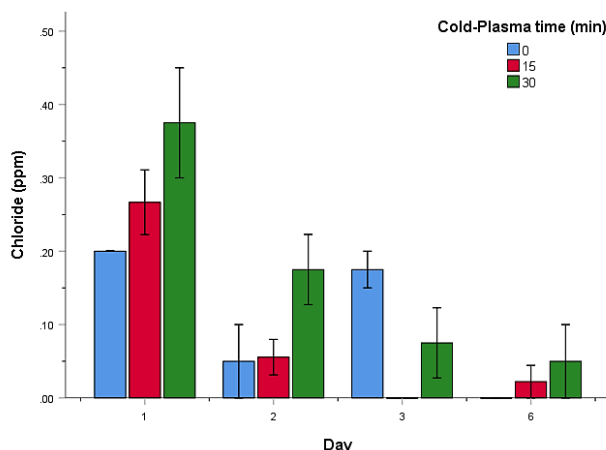
ثابت مانده است. سرعت کاهش پراکسید هیدروژن در نمونه‌هایی که ۳۰ دقیقه تیمار پلاسمای سرد را گرفته‌اند، طی شش روز نگهداری بسیار بالا بود. در مورد کلر، در روز اول افزایش زمان تیمار با پلاسمای توانسته است میزان آن را افزایش دهد، اما در روزهای بعدی نگهداری، میزان کلر به شکل مستقل از زمان تیمار با پلاسمای سرد، به شدت کاهش یافته است. نیکت و همکاران (۲۰۱۸) گزارش دادند با افزایش زمان تیمار پلاسمای سرد، غلظت پراکسید هیدروژن نیز افزایش می‌یابد و این پایداری طی زمان نگهداری نیز تاحدودی حفظ می‌شود (Niquet et al., 2018).

طبق شکل ۲، با تغییر زمان تیمار پلاسمای سرد، میزان ترکیبات اکسیدانی نمونه‌ها به شکل معناداری تغییر کرده است. این تغییرات طی روزهای نگهداری به خوبی مشهود است و تغییرات هر نمونه در هر روز کاملاً معنادار است. در بین این ترکیبات، پراکسید هیدروژن، نیترات، نیتريت و ازن شاخص فعالیت ضد میکروبی PAW محسوب می‌شوند (Zhang et al., 2013). با پایش تغییرات این ترکیبات نسبت به تیمار زمان پلاسمای سرد مشخص شد که در روز اول، با افزایش زمان CP، تولید پراکسید هیدروژن، نیترات و ازن افزایش یافته است اما در روز دوم نگهداری میزان آن‌ها کاهش یافته و در مورد نیترات و ازن تا آخرین روز نگهداری



(e)

(f)



(g)

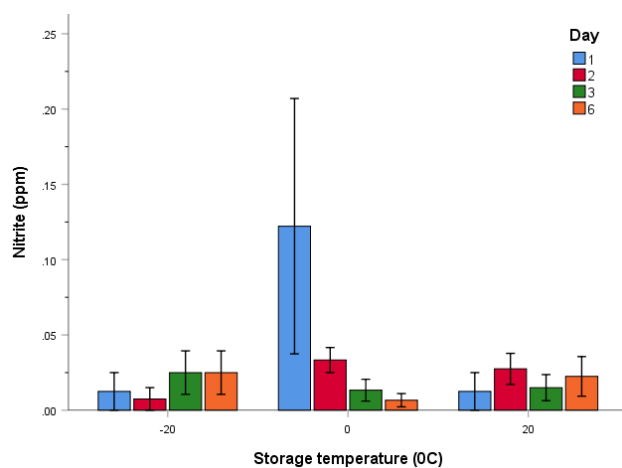
(، پراکسید b)، نیترات a) بر میزان محتوای نیتريت (PAW شکل ۲- اثر متقابل زمان تیمار پلاسمای سرد و روزهای نگهداری (g) و کلر f)، ازن e)، سختی d)، اکسیژن c) هیدروژن)

Figure 2- The interaction effect cold-plasma time and storage duration of PAW on Nitrite (a), Nitrate (b), H_2O_2 (c), Oxygen (d), Hardness (e), Ozone (f), and Chloride (g) contents

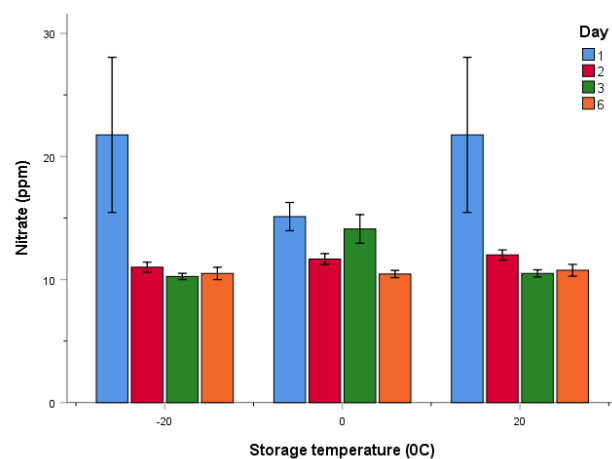
اثر زمان و دمای نگهداری بر مقدار ترکیبات فعال

یکی دیگر از فاکتورهای مهم در کیفیت اکسیدانی PAW، دمای نگهداری آن است. یکی از ایده‌های مهمی که امروزه می‌تواند در صنایع غذایی اهمیت بسیار بالایی داشته باشد، امکان تولید و نگهداری این آب برای مدت زمان طولانی‌تر است. به ویژه اینکه آیا می‌توان این آب را به صورت منجمد نگهداری و حمل کرد یا خیر. به همین دلیل در این مطالعه وضعیت اکسیدانی PAW در سه دمای محیط، یخچال و انجمادی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳ اثر متقابل زمان و دمای نگهداری نمونه‌های PAW را نشان می‌دهد. طبق این شکل، مقدار نیتريت طی نگهداری در یخچال کاهش معنادار از خود نشان داد. اما نیترات در همه دماهای نگهداری با افزایش زمان نگهداری به طرز معناداری کاهش یافت. همچنین میزان پراکسید هیدروژن در روز اول و دوم در تمامی دماهای نگهداری بالاترین مقدار بود اما تا روز ششم در تمامی دماها روند نزولی از خود نشان داد. این نتایج مطابق با یافته‌های ژنگ و همکاران (۲۰۱۷) می‌باشد (Zheng,)

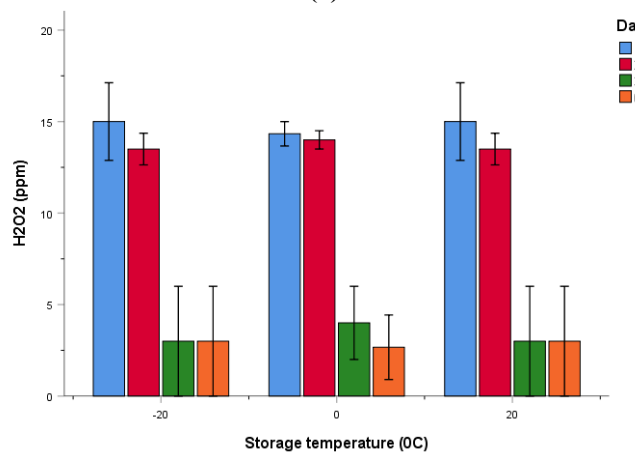
(2017). میزان اکسیژن رابطه معناداری با اثر متقابل زمان و دمای نگهداری از خود نشان نداد اما سختی کل در دمای انجماد افزایش یافت و در دمای یخچال و محیط، تا روز آخر کاهش معنادار داشت. مقدار ازن که یکی از شاخص‌های بسیار مهم فعال بودن PAW است، در نمونه‌های نگهداری شده در دمای یخچال تا روز ششم افزایش معنادار از خود نشان داد اما در دو دمای دیگر تغییرات آن کاهشی بود. کلر نیز در تمامی دماهای نگهداری دارای روند کاهشی بود. ازنی که در آب حل شده است، پایداری زیادی ندارد اما میزان حضور آن به رادیکال هیدروکسیل بستگی دارد (Lauratti et al., 1998). رادیکال‌های هیدروکسیل گونه‌های واکنش‌پذیر با عمر کوتاه هستند که پتانسیل اکسیداسیون و احیای بالایی دارد و در حضور مواد آلی موجود در آب، با آن‌ها واکنش داده و رادیکال‌های جدیدی ایجاد می‌کند که باعث بروز واکنش‌های بیشتری می‌شود (Ayala et al., 2014; Herianto et al., 2021; Laurita et al., 2015).



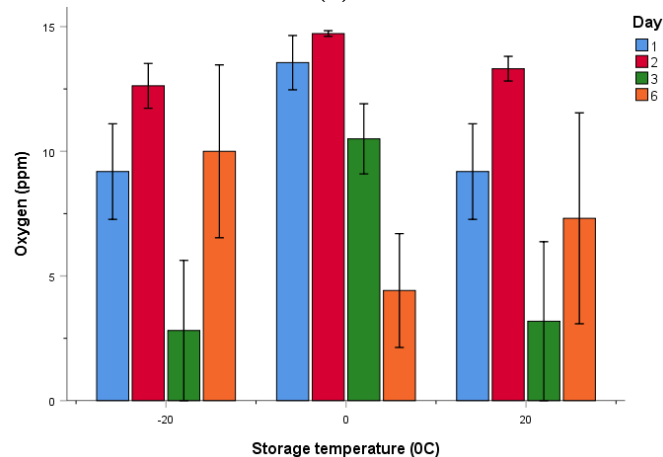
(a)



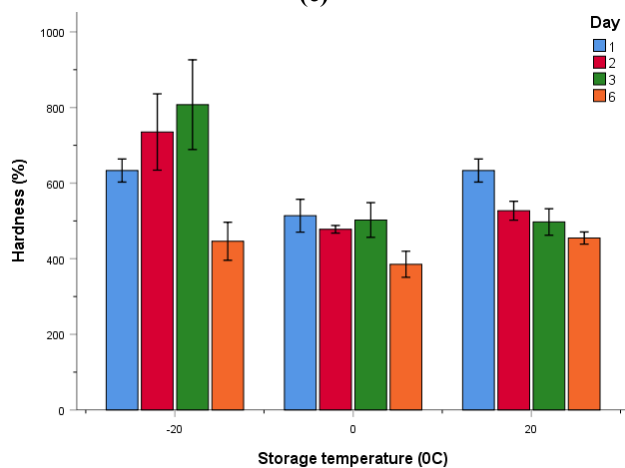
(b)



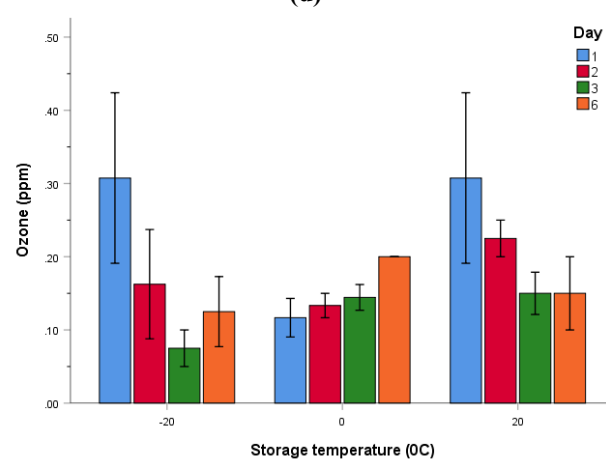
(c)



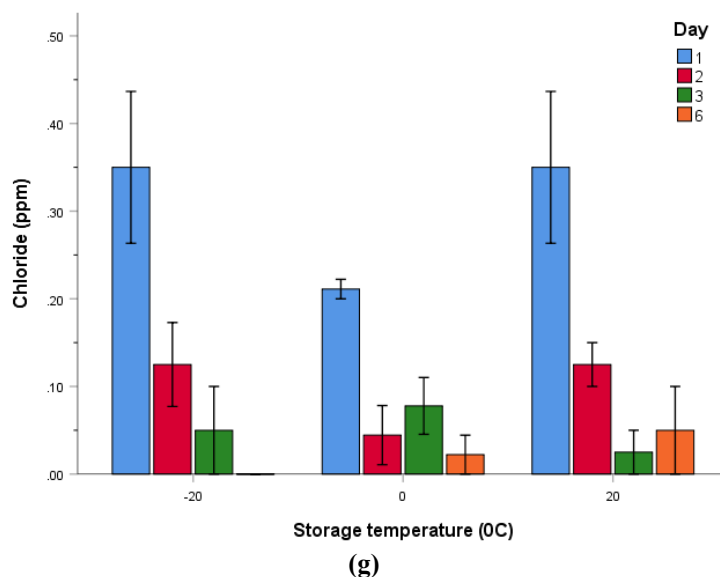
(d)



(e)



(f)



(g)

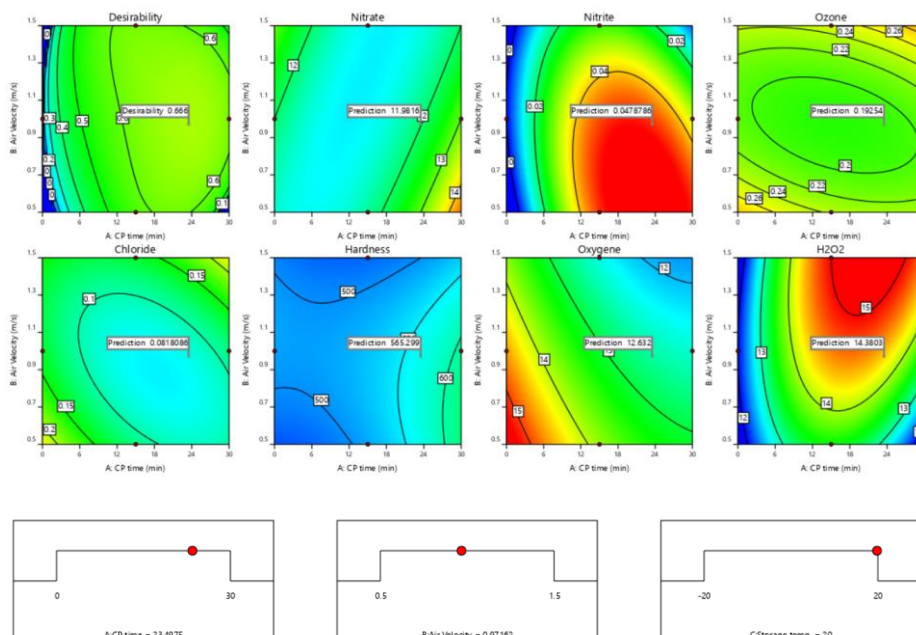
شکل ۳- اثر متقابل زمان و دمای نگهداری PAW بر میزان محتوای نیتريت (a)، نیترات (b)، پراکسید هیدروژن (c)، اکسیژن (d)، سختی (e)، ازن (f) و کلر (g)

Figure 3- The interaction effect of storage time and temperature of PAW on Nitrite (a), Nitrate (b), H_2O_2 (c), Oxygen (d), Hardness (e), Ozone (f), and Chloride (g) contents

نشان داده می‌شوند. بر این اساس بهترین شرایط فراوری برای دستیابی به هدف مذکور با سطح حساسیت ۳، عبارت بود از زمان تیمار ۲۳/۵ دقیقه با پلاسمای سرد، سرعت هوای ۰/۹۷ m/s و دمای نگهداری ۲۰°C. به این ترتیب می‌توان امکان تولید آب فعال شده با پلاسمای سرد با بیشترین کارایی را ایجاد نمود.

بهینه‌سازی فرایند تولید PAW

باتوجه به اثر فاکتورهای متقابل بر فعالیت اکسیدانی PAW، بهینه‌سازی شرایط فراوری باتوجه به کاربرد PAW از اهمیت بالایی برخوردار است؛ لذا این کار با کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ورژن ۱۲ با هدف حداکثر کردن فعالیت اکسیدانی PAW و به حداقل رساندن سختی انجام و نتایج در شکل ۴



شکل ۴- بهینه‌سازی تولید آب فعال‌شده با پلاسمای سرد

Figure 4- The optimization of PAW production

۴- نتیجه‌گیری:

می‌رود، می‌توان برای تهیه و نگهداری PAW برنامه‌ریزی لازم را انجام داد. این نتایج می‌تواند پایه‌گذار کاربردهای آینده آب فعال شده با پلاسمای سرد برای حفظ نکات بهداشتی در صنایع غذایی و کشاورزی شود.

۵- سپاسگزاری:

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با شماره ۰۲-۱۴۰۳-۰۲ می‌باشد. لذا بابت حمایت‌های مادی و معنوی در اجرای این طرح پژوهشی از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری سپاسگزاری می‌شود.

۶- منابع

- [1] Al-Sharify, Z. T., Al-Sharify, T. A., & al-Azawi, A. M. (2020). Investigative study on the interaction and applications of plasma activated water (PAW). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering ,
- [2] Ali, M., Cheng, J.-H., & Sun, D.-W. (۲۰۲۱). Effect of plasma activated water and buffer solution on fungicide degradation from tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit. *Food Chemistry*, 350, 129195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129195>
- [3] Ayala, A., Muñoz, M. F., & Argüelles, S. (۲۰۱۴). Lipid peroxidation: production, metabolism, and signaling mechanisms of malondialdehyde and 4-hydroxy-2-nonenal. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2014(1), 360438 .
- [4] Guo, D., Liu, H., Zhou, L., Xie, J., & He, C. (2021). Plasma-activated water production and its application in agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(12), 4891-4899 .
- [5] 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. *Journal of Food Protection*, 80(2), 225-230. <https://doi.org/https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-116>
- [6] Hadinoto, K., Astorga, J. B., Masood, H., Zhou, R., Alam, D., Cullen, P. J., Prescott, S., & Trujillo, F. J. (2۰۲۱). Efficacy optimization of plasma-activated water for food sanitization through two reactor design configurations. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74, 102867. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102867>
- [7] Han, Q.-Y., Wen, X., Gao, J.-Y., Zhong, C.-S., & Ni, Y.-Y. (2023). Application of plasma-activated water in the food industry: A review of recent research developments. *Food Chemistry*, 405, 134797. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134797>
- [8] Herianto, S., Hou, C. Y., Lin, C. M., & Chen, H. L. (2021). Nonthermal plasma-activated water: A comprehensive review of this new tool for enhanced food safety and quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 583-626 .
- [9] Hoebe, W., Van Ooij, P., Schram, D., Huiskamp, T., Pemen, A., & Lukeš, P. (2019). On the possibilities of straightforward characterization of plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 39, 597-626 .
- [10] Hou, C.-Y., Lai, Y.-C., Hsiao, C.-P., Chen, S.-Y., Liu, C.-T., Wu, J.-S., & Lin, C.-M. (2021). Antibacterial activity and the physicochemical characteristics of plasma activated water on tomato surfaces. *LWT*, 149, 111879. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111879>
- [11] Julák, J., Hujacová, A., Scholtz, V., Khun, J., & Holada, K. (2018). Contribution to the chemistry of plasma-activated water. *Plasma Physics Reports*, 44, 125-136 .

- [12] Kamgang-Youbi, G., Herry, J. M., Meylheuc, T., Brisset, J. L., Bellon-Fontaine, M. N., Doubla, A., & Naitali, M. (2019). Microbial inactivation using plasma-activated water obtained by gliding electric discharges. *Letters in applied microbiology*, 48(1), 13-18.
- [13] Khlyustova, A., Labay, C., Machala, Z., Ginebra, M.-P., & Canal, C. (2019). Important parameters in plasma jets for the production of RONS in liquids for plasma medicine: A brief review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 13, 238-252.
- [14] 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. *Clinical Plasma Medicine*, 3(2), 53-61.
- [15] Leuratti, C., Singh, R., Lagneau, C., Farmer, P. B., Plastaras, J. P., Marnett, L. J., & Shuker, D. (1998). Determination of malondialdehyde-induced DNA damage in human tissues using an immunoslot blot assay. *Carcinogenesis*, 19(11), 1919-1924.
- [16] Liu, C., Chen, C., Jiang, A., Sun, X., Guan, Q., & Hu, W. (2020). Effects of plasma-activated water on microbial growth and storage quality of fresh-cut apple. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 59, 102256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.10.2256>
- [17] Liu, K., Yang, Z., & Liu, S. (2020). Study of the characteristics of DC multineedle-to-water plasma-activated water and Its germination inhibition efficiency: The effect of discharge mode and gas flow. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48(4), 969-979.
- [18] Ma, M., Zhang, Y., Lv, Y., & Sun, F. (2020). The key reactive species in the bactericidal process of plasma activated water. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(18), 185207.
- [19] Milhan, N. V. M., Chiappim, W., Sampaio, A. d. G., Vegian, M. R. d. C., Pessoa, R. S., & Koga-Ito, C. Y. (2022). Applications of plasma-activated water in dentistry: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(8), 4131.
- [20] Niquet, R., Boehm, D., Schnabel, U., Cullen, P., Bourke, P., & Ehlbeck, J. (2018). Characterising the impact of post-treatment storage on chemistry and antimicrobial properties of plasma treated water derived from microwave and DBD sources. *Plasma Processes and Polymers*, 15(3), 1700127.
- [21] Qi, Z., Tian, E., Song, Y., Sosnin, E. A., Skakun, V. S., Li, T., Xia, Y., Zhao, Y., Lin, X., & Liu, D. (2018). Inactivation of *Shewanella putrefaciens* by plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 38, 1035-1050.
- [22] Rathore, V., Patel, D., Butani, S., & Nema, S. K. (2021). Investigation of physicochemical properties of plasma activated water and its bactericidal efficacy. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 41(1), 1-11.
- [23] Traylor, M. J., Pavlovich, M. J., Karim, S., Hait, P., Sakiyama, Y., Clark, D. S., & Graves, D. B. (2011). Long-term antibacterial efficacy of air plasma-activated water. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(47), 472001.
- [24] Wende, K., von Woedtke, T., Weltmann, K.-D., & Bokeschus, S. (2019). Chemistry and biochemistry of cold physical plasma derived reactive species in liquids. *Biological Chemistry*, 400(1), 19-38.
- [25] Wong, K. S., Chew, N. S., Low, M., & Tan, M. K. (2023). Plasma-activated water: Physicochemical properties, generation techniques, and applications. *Processes*, 11(7), 2213.
- [26] Xiang, Q., Fan, L., Li, Y., Dong, S., Li, K., & Bai, Y. (2022). A review on recent advances in plasma-activated water for food safety: Current applications and future trends. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(8), 2250-2268.
- [27] Xiao, A., Liu, D., & Li, Y. (2023). Plasma-activated tap water production and its application in atomization disinfection. *Applied Sciences*, 13(5), 3015.
- [28] Zhang, Q., Liang, Y., Feng, H., Ma, R., Tian, Y., Zhang, J., & Fang, J. (2013). A study of oxidative stress induced by non-thermal plasma-activated water for bacterial damage. *Applied physics letters*, 102(2), 023101.
- [29] Zhao, Y. M., Patange, A., Sun, D. W., & Tiwari, B. (2020). Plasma-activated water: Physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 3951-3979.
- [30] Zheng, J. (2017). Inactivation of *Staphylococcus aureus* in water by pulsed spark discharge. *Scientific reports*, 7(1), 10311.
- [31] Zhou, R., Zhou, R., Prasad, K., Fang, Z., Speight, R., Bazaka, K., & Ostrikov, K. K. (2018). Cold atmospheric plasma activated water as a prospective disinfectant: The crucial role of peroxynitrite. *Green Chemistry*, 20(23), 5276-5284.
- [32] Zhou, R., Zhou, R., Wang, P., Xian, Y., Mai-Prochnow, A., Lu, X., Cullen, P., Ostrikov, K. K., & Bazaka, K. (2020). Plasma-activated water: Generation, origin of reactive species and biological applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(30), 303001.



Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage: www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Studying the Oxidant Activity and Optimization of Cold Plasma- Activated Water

Azadeh Ranjbar Nedamani^{*1}, Ali Taghavi², Elham Ranjbar Nedamani³

- 1- Assistant Professor, Biosystem Engineering Department, Sari Agricultural Science and Natural Resources University, Sari, Iran.
- 2- M.Sc. Student of Post-Harvest Technology, Biosystem Engineering Department, Sari Agricultural Science and Natural Resources University, Sari, Iran
- 3- Ph.D. in Food Chemistry, Research and Development, Kalleh, Amol, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2024/11/14

Accepted: 2025/3/11

Keywords:

Activated water,
Cold plasma,
Design expert,
Hydrogen peroxide

DOI: 10.22034/FSCT.22.161.214.

*Corresponding Author E-
a.ranjbar@sanru.ac.ir

ABSTRACT

Activated water with cold-plasma has emerged as a non-toxic and environmentally friendly alternative, demonstrating its efficiency against a wide range of pathogens, including bacteria, viruses, and fungi. In this study, tap water was activated using cold plasma generator, employing a plasma reactor consisting of copper and steel electrodes, with a voltage of 20 kV and a current of 3 mA at atmospheric air. To produce and optimization of activated water, experimental designs were conducted using Design Expert software version 12, following a Box-Behnken design. The factors were treatment time (0, 15, and 30 min), air injection velocity (0.5, 1, and 1.5 m/s), and storage temperature (20, 4, and -20 °C). The characteristics of water, including hydrogen peroxide concentration, oxygen levels, total hardness, ozone, nitrate, nitrite, and chlorine, were measured at the days of 0, 1, 2, 3, and 6 to investigate the activation during storage period. The results indicated that all studied factors had a significant effect on the outcomes examined. The interaction effects of these factors also exhibited significant decreasing impact on the results in certain cases. Finally, it was determined that the storage temperature of the environment, prolonged treatment time with cold-plasma, and an air velocity of 1 m/s could yield activated water with superior oxidative properties. The optimized condition for producing activated water was identified as a treatment time of 23.5 min, 0.97 m/s air velocity, and storage temperature of 20°C.