

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای

رشته فیزیک اتمی مولکولی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تاثیر پارامترهای پلاسمای سرد اتمسفری بر شاخص‌های جوانه‌زنی

وفیزیولوژیک بذر و گیاهچه کلزا

نگارنده: رضوان دهقانی

اساتید راهنما:

دکتر مهدی مومنی

دکتر حسن مکاریان

تیر ۱۳۹۸

تقدیم به آنان که

کلامشان، صداقت

مکاششان، محبت

و تبسمشان، حیات را برایم به ارمغان آورد؛

تقدیم به

چشمان پر محبت مادرم که زیباترین نقش مگارتان خاطر ام، سیاهی اوست

دل دریایی پدرم که تقویم زندگی نیز تلافیکر یک نگاه محبت آمیزش نیست

همسر عزیزم که فروغ مکاشش و گرمی کلامش سرمایه جاودانگی زندگی من

است

برادر و خواهرم، همراهان، همیشگی و پشتوانه های زندگیم

باتقدیر و تشکر از:

سپاس بی‌کران خداوندی را که هر چه دارم از رحمت و مهربانی بی‌منتهای اوست. او که در محط محط زندگیم درخشید و درهای بسته را گشود.

اساتید فریخته و فرزانه جناب آقای دکتر مهدی مومنی و جناب آقای دکتر حسن نکاریان که بانگته‌های دل‌انیز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمود و همواره راه‌ها را در اهلکشای من در اتمام و تکمیل این پایان نامه بوده است.

از خانم امینی بسیار سپاسگزارم چرا که بدون یاری و مشاوره‌های بی‌چشم داشت ایشان تأمین این پایان نامه بسیار مشکل می‌نمود.

تعهد نامه

اینجانب رضوان دهقانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی مولکولی دانشکده فیزی و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تاثیر پارامترهای پلاسمای سرد اتمسفری بر شاخص‌های جوانه‌زنی و فیزیولوژیک بذر و گیاهچه کلزا تحت راهنمایی دکتر مهدی مومنی و دکتر حسن مکاریان متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .
امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

پلاسمای گاز یونیزه شده‌ای متشکل از یون‌ها، الکترون‌ها، اتم‌های خنثی، رادیکال‌ها و گونه‌های برانگیخته‌ای است که عنوان عنصر چهارم طبیعت را به خود اختصاص داده است. امروزه تکنولوژی پلاسمای سرد می‌تواند برای پیش‌تیمار بذور گیاهان، جایگزین بسیاری از ترکیبات شیمیایی گران‌قیمت و مضر برای محیط زیست و سلامت انسان شود. بنابراین به منظور ارزیابی تاثیر پلاسمای بر شاخص‌های جوانه زنی و صفات فیزیولوژیک بذر و گیاهچه کلزا آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۷ در دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. فاکتور اول مدت زمان پرتو دهی بذر کلزا با پلاسمای سرد در شش سطح شامل: صفر (شاهد)، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ دقیقه و فاکتور دوم ولتاژ مصرفی در سه سطح ۳، ۵ و ۷ کیلو ولت بود. نتایج نشان داد با افزایش ولتاژ، شدت گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن تولیدی بیشتر شد. همچنین نتایج نشان داد، اثر متقابل زمان پلاسمای دهی × ولتاژ میزان مالون دی‌آلدئید، آسکوربات پراکسیداز، محتوی قند محلول و طول ریشه را بطور معنی‌داری تحت تاثیر قرار داد. همچنین اثر مدت زمان پلاسمای دهی تاثیر معنی‌داری بر درصد پروتئین بذر داشت. میزان مالون دی‌آلدئید تحت تیمار به مدت پنج دقیقه در ولتاژ هفت کیلو ولت نسبت به شاهد کاهش ۳۵ درصدی نشان داد. همچنین میزان آسکوربات پراکسیداز تحت تیمار پلاسمای در زمان پنج دقیقه و ولتاژ هفت کیلو ولت نسبت به شاهد افزایش ده درصدی نشان داد. محتوی قند محلول تحت تیمار پلاسمای در زمان پنج دقیقه و ولتاژ هفت کیلو ولت روی بذر کلزا نسبت به کنترل افزایش ۴۸ درصدی نشان داد. درصد پروتئین دانه نیز تحت تیمار چهار دقیقه پلاسمادهی روی بذر کلزا نسبت به کنترل افزایش ۲۰ درصدی نشان داد. براساس نتایج این پژوهش، زمان پنج دقیقه تابش پلاسمای با ولتاژ هفت کیلو ولت بیشترین تاثیر را بر اکثر بر صفات مورد بررسی داشت.

کلمات کلیدی: بهبود رشد گیاه، تخلیه سد دی‌الکترونیک، تغییرات آنزیمی، کلزا.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

تاثیر پلاسمای سرد بر برخی صفات فیزیولوژیک بذر و گیاهچه کلزا، هفتمین کنفرانس مهندسی و

فیزیک پلاسما، دانشگاه صنعتی شاهرود، تیر ۱۳۹۸.

فهرست

۱	فصل اول
۱	آشنایی اولیه با تخلیه‌ی الکتریکی
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ تاریخچه‌ی فیزیک پلاسما
۳	۳-۱ چهارمین حالت ماده
۴	۴-۱ تعریف پلاسما
۴	۱-۴-۱ شبه خنثایی
۴	۲-۴-۱ حرکت جمعی
۴	۵-۱ تفاوت گاز با پلاسما
۶	۶-۱ معیارهای لازم جهت تعریف پلاسما
۶	۱-۶-۱ خنثایی ماکروسکوپی
۷	۲-۶-۱ حفاظ الکتریکی دبای
۸	۳-۶-۱ فرکانس پلاسمایی
۹	۷-۱ گازهای مورد استفاده برای تولید پلاسما
۱۰	۸-۱ تولید پلاسما
۱۱	۱-۸-۱ تخلیه الکتریکی
۱۲	۲-۸-۱ فرآیند تخلیه الکتریکی
۱۲	۳-۸-۱ طبقه بندی تخلیه الکتریکی
۱۳	۱-۳-۸-۱ تخلیه تاریک
۱۴	۲-۳-۸-۱ تخلیه نورانی
۱۴	۳-۳-۸-۱ تخلیه قوسی
۱۵	۹-۱ طبقه بندی پلاسما
۱۵	۱-۹-۱ طبقه بندی پلاسما بر اساس دما
۱۵	۱-۱-۹-۱ پلاسمای گرم (LTE)
۱۶	۲-۱-۹-۱ پلاسمای سرد (Non-LTE)
۱۷	۲-۹-۱ طبقه بندی پلاسما بر اساس فشار

۱۸	۱۰-۱ کاربردهای تکنولوژی پلاسما.....
۲۰	۱۱-۱ گیاهشناسی کلزا.....
۲۰	۱-۱۱-۱ منشأ پیدایش کلزا.....
۲۰	۲-۱۱-۱ مشخصات گیاهشناسی.....
۲۱	۳-۱۱-۱ رشد و نمو کلزا.....
۲۱	۴-۱۱-۱ تاریخچه کشت کلزا در جهان و ایران.....
۲۲	۵-۱۱-۱ اهمیت کلزا.....
۲۳	۱۲-۱ اهمیت استفاده از پلاسما در کشاورزی.....
۲۷	فصل دوم.....
۲۷	تخلیه سد دی الکتریک.....
۲۸	۱-۲ مقدمه.....
۲۸	۲-۲ تخلیه سد دی الکتریک.....
۲۹	۳-۲ تاریخچه ی تخلیه سد دی الکتریک.....
۳۰	۴-۲ فرآیند تخلیه سد دی الکتریک.....
۳۲	۵-۲ ساختار تخلیه سد دی الکتریک.....
۳۲	۱-۵-۲ پیکربندی تخلیه سد دی الکتریک.....
۳۳	۲-۵-۲ دی الکتریک.....
۳۳	۳-۵-۲ مزایای تخلیه سد دی الکتریک.....
۳۴	۶-۲ کاربردهای پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک.....
۳۴	۱-۶-۲ تولید صنعتی ازن.....
۳۴	۲-۶-۲ پمپ لیزرهای CO ₂
۳۴	۳-۶-۲ اصلاح و پردازش سطوح.....
۳۵	۴-۶-۲ کنترل آلودگی.....
۳۵	۵-۶-۲ کاربردهای پزشکی و زیستی.....
۳۵	۱-۵-۶-۲ انعقاد خون.....
۳۵	۲-۵-۶-۲ باکتری زدایی سطوح.....
۳۶	۳-۵-۶-۲ باکتری زدایی مواد غیر زنده.....

۳۶	۴-۵-۶-۲ باکتری زدایی بافت زنده
۳۶	۵-۵-۶-۲ درمان زخم و بیماریهای پوستی
۳۷	۶-۵-۶-۲ درمان سلولهای سرطانی
۳۷	۷-۵-۶-۲ پلاسما در دندانپزشکی
۳۸	۷-۲ تأثیر تابش پلاسما بر خصوصیات جوانه زنی و رشد گیاه
۴۰	۸-۲ طیف سنجی پلاسما
۴۱	۱-۸-۲ نشر و جذب
۴۳	فصل سوم
۴۳	مواد و روشها
۴۴	۱-۳ زمان و محل اجرای آزمایش
۴۴	۲-۳ مشخصات طرح آزمایشی
۴۵	۳-۳ ارزیابی صفات مربوط به جوانه زنی
۴۶	۴-۳ صفات فیزیولوژیکی
۴۶	۱-۴-۳ شاخص پایداری غشاء پلاسمایی برگ
۴۶	۲-۴-۳ درصد پروتئین دانه
۴۸	۳-۴-۳ سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز
۴۸	۴-۴-۳ سنجش آسکورات پراکسیداز
۴۸	۵-۴-۳ اندازه گیری غلظت مالون دی آلدئید (MDA)
۴۹	۶-۴-۳ استخراج قندهای محلول
۵۰	۷-۴-۳ استخراج عصاره آنزیم آلفا آمیلاز
۵۰	۸-۴-۳ محتوی نسبی آب برگ
۵۱	۵-۳ اندازه گیری دما چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES)
۵۳	۶-۳ تجزیه و تحلیل داده ها
۵۵	فصل چهارم
۵۵	نتایج و بحث
۵۶	۱-۴ دمای پلاسما
۵۸	۲-۴ جوانه زنی

۶۰	..... ۳-۴ طول ریشه چه
۶۲	..... ۴-۴ طول ساقه چه
۶۳	..... ۵-۴ وزن خشک ریشه چه
۶۴	..... ۶-۴ وزن خشک ساقه چه
۶۴	..... ۷-۴ شاخص پایداری غشا
۶۵	..... ۸-۴ پروتئین
۶۷	..... ۹-۴ آنزیم کاتالاز (CAT)
۶۸	..... ۱۰-۴ آسکوربات پراکسیداز
۷۰	..... ۱۱-۴ مالون دی آلدئید
۷۳	..... ۱۲-۴ درصد قند محلول
۷۵	..... ۱۳-۴ آلفا آمیلاز
۷۶	..... ۱۴-۴ محتوی نسبی آب برگ
۷۸	..... نتیجه گیری
۷۹	..... پیشنهادات
۸۰	..... منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: چهارمین حالت ماده (پلاسما)..... ۳
- شکل ۱-۲: تفاوت گاز با پلاسما..... ۵
- شکل ۱-۳: مقایسه مسیر ذره در گاز و پلاسما..... ۶
- شکل ۱-۴: حفاظ دبابی..... ۷
- شکل ۱-۵: روش‌های مختلف تولید پلاسما..... ۱۱
- شکل ۱-۶: (a) پلاسما، (b) تخلیه الکتریکی..... ۱۱
- شکل ۱-۷: فرآیند بهمن الکترونی..... ۱۲
- شکل ۱-۸: تخلیه الکتریکی بر اساس ولتاژ - جریان..... ۱۳
- شکل ۲-۱: لوله تخلیه ازن زیمنس در سال ۱۸۵۷..... ۲۹
- شکل ۲-۲: فرآیند تخلیه سد دی الکتریک..... ۳۱
- شکل ۲-۳: ساختار تخلیه الکتریکی در حضور سد دیالکتریک با شکل‌های مختلف الکترودی..... ۳۳
- شکل ۲-۴: خلاصه ای از اثر پلاسما بر بذر..... ۴۰
- شکل ۲-۵: خط تابش..... ۴۲
- شکل ۳-۱: دستگاه تخلیه سد دی الکتریک..... ۴۴
- شکل ۳-۲: خطوط طیفی تخلیه تابان آرگون..... ۵۲
- شکل ۴-۱: طیف نشری DBD در 3Kv..... ۵۷
- شکل ۴-۲: طیف نشری DBD در 5Kv..... ۵۷
- شکل ۴-۳: طیف نشری DBD در 7Kv..... ۵۸
- شکل ۴-۴: بذر جوانه زده کلزا..... ۵۹
- شکل ۴-۵: مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و ولتاژ پلاسما بر طول ریشه چه..... ۶۲
- شکل ۴-۶: مقایسه میانگین اثر زمان پلاسمادهی بر درصد پروتئین..... ۶۷
- شکل ۴-۷: مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و ولتاژ پلاسما بر میزان APX..... ۷۰
- شکل ۴-۸: مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و ولتاژ پلاسما بر MDA..... ۷۲
- شکل ۴-۹: اثر متقابل زمان و ولتاژ پلاسما بر درصد قند محلول..... ۷۴
- شکل ۴-۱۰: مقایسه میانگین اثر زمان پلاسمادهی بر محتوی نسبی آب برگ..... ۷۷

فهرست جداول

جدول ۱-۱: مقایسه‌ی ویژگی‌های اصلی پلاسماهای سرد و گرم	۱۷
جدول ۳-۱: داده‌های طیف سنجی مربوط به پیک‌های آرگون	۵۳
جدول ۴-۱: داده‌های مربوط به پیک‌های OII	۵۷
جدول ۴-۲: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر درصد جوانه زنی	۵۹
جدول ۴-۳: نتایج تجزیه واریانس اثر پلاسما بر طول ریشه چه	۶۱
جدول ۴-۴: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر طول ساقه چه	۶۳
جدول ۴-۵: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر وزن خشک ریشه چه	۶۳
جدول ۴-۶: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر وزن خشک ساقه چه	۶۴
جدول ۴-۷: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر پایداری غشاء	۶۵
جدول ۴-۸: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر درصد پروتئین	۶۶
جدول ۴-۹: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر کاتالاز	۶۸
جدول ۴-۱۰: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر آسکوربات پراکسیداز	۷۰
جدول ۴-۱۱: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر مالون دی‌آلدید	۷۲
جدول ۴-۱۲: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر قند محلول	۷۴
جدول ۴-۱۳: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر آلفا آمیلاز	۷۵
جدول ۴-۱۴: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر محتوی نسبی آب برگ	۷۷

فصل اول

آشنایی اولیه با تخلیه الکتریکی

۱-۱ مقدمه

دانشمندان علم فیزیک اذغان داشته‌اند که ۹۹٪ طبیعت از پلاسما تشکیل شده است. دوران اولیه، جهان از پلاسما ساخته شده بود. اکنون نیز ستارگان، سحابی‌ها و حتی فضای بین ستارگان، از پلاسما تشکیل شده است. در منظومه‌ی شمسی نیز پلاسما به شکل بادهای خورشیدی جریان داشته و زمین نیز کاملاً توسط پلاسمایی که میدان مغناطیسی زمین محبوس شده، احاطه شده است [۳]. از پلاسمای زمینی میتوان به موارد زیر اشاره کرد: رعد و برق، لامپ‌های فلورسنت و غیره. در این فصل، تعریف کلی از پلاسما، نحوه‌ی تولید پلاسما به روش تخلیه الکتریکی و همچنین طبقه‌بندی پلاسما براساس دما و فشار بیان شده است.

۱-۲ تاریخچه‌ی فیزیک پلاسما

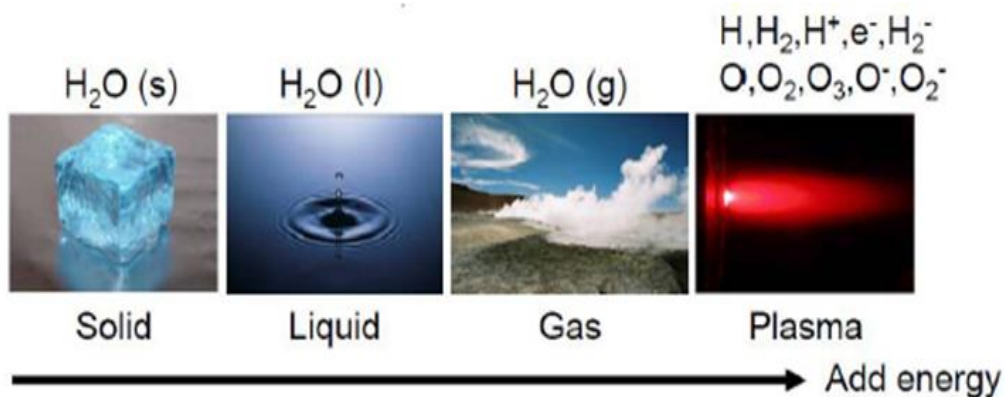
هنگامی که خون از گلبولهای گوناگون خود تصفیه می‌گردد، مایع شفاف به نام پلاسما در آن باقی می‌ماند (پلاسما از واژه یونانی به معنای "هرچیز در قالب ریخته شده" گرفته شده است)، که توسط دانشمند پزشکی، اهل چک، جوهانس پارکینج^۱ ۱۷۸۷-۱۸۶۹ ارائه شد. در سال ۱۹۵۷، شیمیدان آمریکایی، ایروینگ لانگمیر^۲، اولین بار از این عبارت در توصیف یک گاز یونیزه شده استفاده کرد. لانگمیر با برداشت از پلاسمای خون که گلبولهای قرمز و سفید را حمل میکند، حرکت الکترونها و یونها را در مسیر سیال الکتریکی بررسی کرد. در این فرایند لانگمیر تئوری پوشش‌های پلاسمایی را ارائه داد. ایشان همچنین به این مسئله که ناحیه‌ی مشخصی از لوله تخلیه پلاسما که تغییرات متناوبی از چگالی الکترونها را نشان می‌دهد، پی برد که امروزه به نام امواج لانگمیر شناسایی می‌شوند. این تاریخچه پیدایش فیزیک پلاسما بود.

¹ Johannes Parkinje

² Irving Langmuir

۱-۳ چهارمین حالت ماده

از یک دیدگاه علمی، مواد موجود در جهان به چهار دسته جامد، مایع، گاز و پلاسما طبقه‌بندی می‌گردد. تمایز اساسی بین جامدات، مایعات و گازها به قدرت نیروهای پیوستگی بین اجزا تشکیل‌دهنده آنها مربوط می‌شود. این نیروهای پیوستگی در جامدات نسبتاً قوی، در مایعات ضعیف و در گازها تقریباً وجود ندارد. عامل اساسی که باعث می‌شود، یک ماده به یکی از این سه حالت تعلق داشته باشد، انرژی جنبشی کاتوره‌ای (انرژی گرمایی) اتم‌ها و مولکول‌های آن ماده است که آن به دمای جسم بستگی دارد. با حرارت دادن به جسم مایع یا جامد، اتم‌ها و مولکول‌ها انرژی گرمایی بیشتری کسب نموده، تا جایی که بتوانند بر انرژی پتانسیل پیوستگی غلبه نموده که این وضعیت در نهایت به گذار فاز منجر خواهد شد. این گذار فاز در یک فشار معین و دمای ثابت صورت می‌گیرد. چنانچه یک گاز مولکولی انرژی لازم برای غلبه بر انرژی پیوستگی الکترون‌ها در بیرونی‌ترین مدار خود را بیابد، در این وضعیت یک گاز یونیزه یا پلاسما به وجود می‌آید. گذار گاز به پلاسما از دیدگاه ترمودینامیکی گذار فاز محسوب نمی‌شود، زیرا سایر تبدیل فازها، یعنی از جامد به مایع و مایع به گاز در دمای ثابت انجام می‌گیرد. اما تبدیل فاز از گاز به پلاسما تدریجاً با افزایش دما صورت می‌گیرد [۱].



شکل ۱-۱: چهارمین حالت ماده (پلاسما)

۱-۴-۴ تعریف پلاسما

گاز یونیزه‌ای است که الکترون‌ها و یون‌های آن از هم جدا شده‌اند، ولی هر گاز یونیزه را نمی‌توان پلاسما نامید. تعریف کلی پلاسما به این صورت است: پلاسما گاز شبه خنثایی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار تجمعی از خود ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که واژه‌ی پلاسما به گاز یونیزه شده‌ای اطلاق می‌شود که از دیدگاه میکروسکوپی و الکتریکی خنثی و شامل تعداد زیادی الکترون‌های آزاد، اتم‌ها و مولکول‌های برانگیخته هست. برای بررسی دقیق تعریف پلاسما، مفهوم شبه خنثایی و رفتار تجمعی به‌طور مختصر توضیح داده شده است.

۱-۴-۱ شبه خنثایی

پلاسما (شبه خنثی) است یعنی آن اندازه خنثی است که تعداد یون‌ها با الکترون‌ها تقریباً برابر،
$$n_i \approx n_e \approx n$$
 باشد n_i تعداد یون‌ها و n_e تعداد الکترون‌ها.

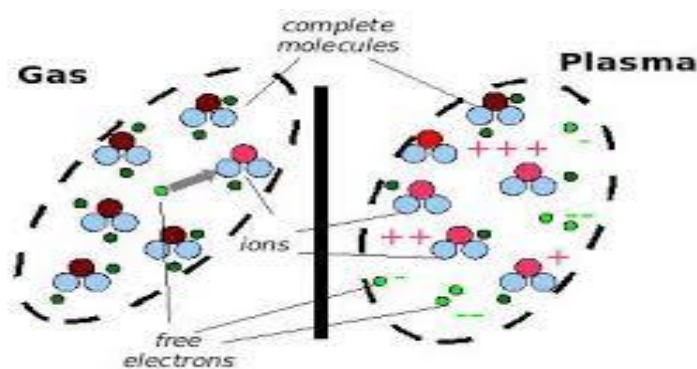
۱-۴-۲ حرکت تجمعی

ویژگی دیگر پلاسما، حرکت تجمعی ذرات باردار هست. در پلاسما که مشتمل بر ذرات باردار است، بارها با حرکت خود می‌توانند توده‌های متمرکزی از بارهای مثبت یا منفی را به‌طور موضعی به وجود آورند و بدین ترتیب سبب پیدایش میدان‌های الکتریکی شوند. با حرکت بارها، جریان و در نتیجه میدان مغناطیسی هم تولید می‌شود. این میدان‌ها بر حرکت سایر ذرات باردار که دورتر واقع شده‌اند، اثر می‌گذارند. لذا منظور از (رفتار جمعی) حرکاتی است که نه تنها به شرایط موضعی، بلکه به حالت پلاسما در مناطق دور نیز بستگی دارد.

۱-۵ تفاوت گاز با پلاسما

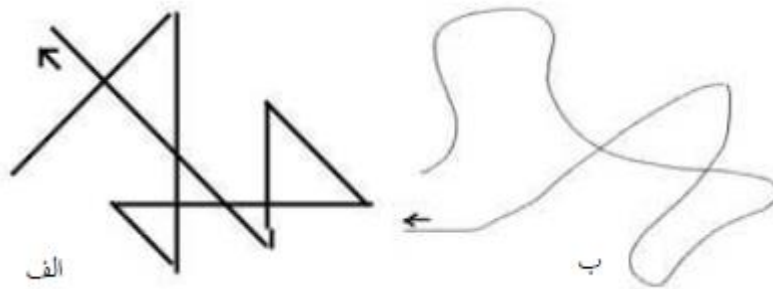
تفاوت اصلی بین گازها و پلاسما این است که پلاسما رسانای الکتریسیته است که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. همان‌طور که میدانید از بین حالت‌های مختلف ماده (گاز، مایع، جامد)، گازها

بیشترین انرژی را دارند، این در حالی است که انرژی ذخیره شده در پلاسما حتی از گازها نیز بیشتر است. تفاوت موجود بین گاز و پلاسما، هنگامی به صورت واضح آشکار می شود که این دو در میدان الکتریکی و یا میدان مغناطیسی قرار داده شوند. همان طور که میدانید؛ گاز تقریباً به طور کامل از ذرات خنثی تشکیل شده است و به همین علت میدان های متوسط الکتریکی هیچ اثری روی آن ها نخواهند داشت. اما چون پلاسما از ذرات یونیزه تشکیل شده است، بنابراین هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی بر ذرات باردار تأثیر گذاشته و نیروهایی به آن اعمال می کنند.



شکل ۱-۲: تفاوت گاز با پلاسما

همان طور که گفته شد، پلاسما از تعداد بسیار زیادی ذره ی باردار تشکیل شده است و بیشتر این ذرات در هر لحظه در حال حرکت هستند. ذره ی باردار در حال حرکت در اطراف خود میدان های الکتریکی و مغناطیسی متفاوتی ایجاد می کند. بنابراین آرایش های پیچیده ای از میدان های الکتریکی و مغناطیسی در پلاسما وجود دارد. یکی از نتایج این آرایش، این است که ذره در پلاسما همچون ذره در گاز، در مسیرهای مستقیم حرکت نمی کند تا بر اثر برخورد ناگهانی مسیرش را تغییر دهد. بلکه در پلاسما، نیروهایی وجود دارد که در تمام لحظات بر ذرات باردار اثر می کنند و راستای حرکت ذرات یونیزه در پلاسما به صورت پیوسته تغییر می کند. تنها تعداد محدودی از ذرات بر اثر برخورد مستقیم راستای حرکت خود را تغییر می دهند در شکل (۱-۳) می توان مسیر ذره را در پلاسما و گاز مشاهده کرد.



شکل ۱-۳: مقایسه مسیر ذره در گاز و پلاسما، الف) مسیر ذره در گاز را نشان می‌دهد. مسیر تنها بر اثر برخورد ذرات با هم تغییر می‌کند. ب) مسیر ذره در پلاسما را نشان می‌دهد. نیروهای تغییردهنده دائماً راستای حرکت ذرات را تغییر می‌دهند و تغییرات بزرگی در مسیر حرکت ذرات اتفاق می‌افتد.

تفاوت اصلی بین گاز و پلاسما در خصوصیات الکترومغناطیسی آن‌هاست. پلاسما یک رسانای الکتریکی است و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر رفتار آن حاکم‌اند. در حالی که گاز معمولی عایق است و به‌طور مؤثر به میدان الکتریکی و مغناطیسی پاسخ نمی‌دهد.

۱-۶ معیارهای لازم جهت تعریف پلاسما

برای تعریف پلاسما به چند پارامتر اساسی می‌توان اشاره کرد که جزء ویژگی‌های اصلی تعریف پلاسما به‌شمار می‌آیند:

۱- خنثایی ماکروسکوپی^۱

۲- حفاظ الکتریکی دبای^۲

۳- فرکانس پلاسمایی^۳

۱-۶-۱ خنثایی ماکروسکوپی

محیط پلاسما در غیاب اختلالات خارجی از دیدگاه ماکروسکوپی و از نظر الکتریکی خنثی می‌باشد؛ زیرا درون پلاسما میدان‌های بار میکروسکوپی یکدیگر را خنثی می‌کنند و باعث می‌شود، هیچ فضای بارداری در ناحیه‌ی ماکروسکوپی وجود نداشته باشد. لذا بار الکتریکی صفر است.

¹ Macroscopic neutrality

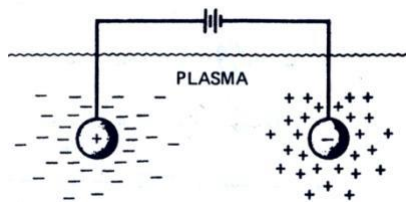
² Debye shielding

³ Plasma frequency

۱-۶-۲ حفاظ الکتریکی دبای

یکی از مشخصات اساسی رفتار پلاسما، توانایی آن برای ایجاد حفاظ در مقابل پتانسیل‌های الکتریکی است که به آن اعمال می‌شوند. فرض می‌کنیم، بخواهیم با وارد کردن دو گلوله باردار که به یک باتری وصل شده‌اند، یک میدان الکتریکی در داخل پلاسما به وجود آوریم (شکل (۱-۴)). این گلوله‌ها، ذرات با بارهای مخالف خود را جذب می‌کنند و تقریباً بلافاصله، ابری از یون‌ها اطراف گلوله منفی و ابری از الکترون‌ها اطراف گلوله مثبت را فرا می‌گیرند. اگر پلاسما سرد باشد و هیچگونه حرکت حرارتی وجود نداشته باشد، مقدار بار ابر برابر با بار گلوله می‌گردد، در این صورت عمل حفاظ کامل می‌شود و هیچ میدان الکتریکی در حجم پلاسما در خارج از ناحیه

ابرها وجود نخواهد داشت، این حفاظ را اصطلاحاً حفاظ دبای می‌گویند.



شکل ۱-۴: حفاظ دبای [۲]

پتانسیل در هر نقطه به فاصله x نسبت به گلوله از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\phi = \phi_0 e^{\frac{-|x|}{\lambda_D}} \quad (1-1)$$

در رابطه بالا λ_D ضخامت لایه غلاف است، که به آن طول دبای می‌گوییم و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 K T_e}{n e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

طول دبای، با جذر دما (T) نسبت مستقیم و با جذر چگالی تعداد الکترون‌ها (n) نسبت عکس دارد.

به سهولت می‌توان کره‌ای با شعاع λ_D به‌عنوان کره دبای تعریف نمود. تعداد الکترون‌ها درون یک کره دبای عبارت است از:

$$N_D = \frac{4}{3} n \pi \lambda_D^3 \quad (3-1)$$

اثر حفاظدهی دبای مشخصه تمام پلاسماهاست، باوجوداینکه این پدیده در تمام محیط‌هایی که شامل ذرات باردار است، اتفاق نمی‌افتد. یک ضرورت آشکار برای اینکه پلاسما وجود داشته باشد، این است که ابعاد فیزیکی (L) سیستم در مقایسه با λ_D بزرگ باشد، زیرا باید فضای کافی جهت وقوع اثر حفاظ دهی و تجمع ذرات باردار وجود داشته باشد تا رفتار پلاسمایی مشاهده شود. پس اولین معیار برای تعریف پلاسما عبارت است از:

$$L \gg \lambda_D \quad (4-1)$$

با توجه به اینکه اثر حفاظدهی نتیجه‌ی رفتار تجمعی ذرات در درون کره‌ی دبای است. در نتیجه دومین معیار در تعریف پلاسما عبارت است از:

$$N_D \gg 1 \quad (5-1)$$

۱-۶-۳ فرکانس پلاسمایی

اگر شبه خنثایی پلاسما توسط بعضی از نیروهای خارجی از بین برود، الکترون‌ها برای برگرداندن حالت خنثایی شتاب می‌گیرند و حول یون‌ها که سنگین‌تر هستند، یک حرکت رفت و برگشتی پیدا می‌کنند. هنگامی که یک پلاسما به صورت لحظه‌ای از حالت تعادل خارج شود، میدان‌های ناشی از فضای بار درونی به وجود آمده در پلاسما، باعث افزایش حرکت تجمعی ذرات خواهند شد که نتیجه‌ی آن تمایل به حفظ خنثایی بار الکتریکی است. این حرکت‌های تجمعی به وسیله‌ی یک فرکانس نوسانی بیان می‌شود که به عنوان فرکانس پلاسما شناخته شده است. فرکانس پلاسما را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (6-1)$$

بعضی از پلاسماها مانند یونسفر زمین کاملاً یونیزه نیستند. در این نمونه‌ها تعداد ذرات خنثی بسیار زیاد هستند. در این حالت ذرات باردار با ذرات خنثی برخوردایی دارند و باعث می‌شود که الکترون‌ها در حالت تعادل با ذرات خنثی قرار گیرند و این محیط دیگر نمی‌تواند به صورت پلاسما رفتار کند، بلکه

به صورت یک گاز خنثی عمل خواهد کرد. برای اینکه الکترون‌ها تحت تأثیر ذرات خنثی قرار نگیرند، باید زمان متوسط بین دو برخورد الکترون-ذره خنثی بزرگ‌تر از عکس فرکانس پلاسمایی باشد. سومین معیار تعریف پلازما به صورت زیر است:

$$\omega\tau \gg 1 \quad (7-1)$$

به طوری که τ نشان‌دهنده زمان متوسط میان برخورد یک الکترون با ذرات باردار خنثی بوده و ω بیانگر فرکانس نوسانات پلازما است [۳]. بنابراین سه شرطی که یک پلازما باید از آن‌ها تبعیت کند، عبارت‌اند از:

$$L \gg \lambda_D \quad (1)$$

$$N_D \gg 1 \quad (2)$$

$$\omega\tau \gg 1 \quad (3)$$

۷-۱ گازهای مورد استفاده برای تولید پلازما

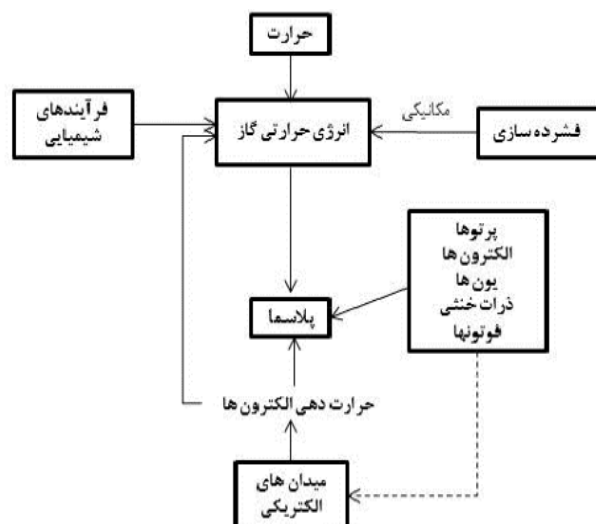
از ویژگی‌های جالب بسیاری از دستگاه‌های تولید پلازما آزادی برای انتخاب گاز و یا ترکیبی از گازهای مختلف است [۴]. پلازما می‌تواند در هر ترکیب گازی تولید شود، به‌عنوان مثال، هوا، هلیوم، نیتروژن، آرگون، نئون و غیره [۵]. اغلب گازهای نجیب (عنصری که در گروه ۱۸ جدول تناوبی هستند) برای تولید پلازما به کار گرفته می‌شوند که البته افزایش هزینه را به دنبال دارد. برای کاهش هزینه‌ها می‌توان از هوای محیط استفاده کرد [۶]. به هر جهت، در یک محیط معمولاً تراکم الکترون و یون‌های مثبت تقریباً برابر با ذرات خنثی است، اما برخی از گازها دارای اتم‌های الکترون‌گاتیو مانند O_2 ، Cl_2 ، Uf_6 ، $TiCl_4$ هستند، که این گازها به شدت الکترون را جذب می‌کنند. بنابراین، به دلیل چسبیدن الکترون به این مولکول‌ها، به دلیل الکترون‌گاتیو بودن آن‌ها و امکان یونیزاسیون بهتر، توصیه شده از گازهای نام‌برده شده برای تولید پلازما استفاده گردد [۷].

۸-۱ تولید پلاسما

اصولاً پلاسما با اعمال انرژی به یک گاز خنثی تولید می‌شود، به این ترتیب که الکترون‌های آزاد و فوتون‌ها موجود در محیط گاز، انرژی لازم را دریافت می‌کنند و به اتم‌ها و مولکول‌های خنثی گاز برخورد می‌کنند و باعث تولید حامل‌های بارداري مانند الکترون‌ها و یون‌ها می‌شوند (یونیزاسیون به‌وسیله برخورد^۱ و یونیزاسیون به‌وسیله فوتون^۲). البته راه‌های مختلفی (مانند حرارت، فشار، واکنش-های شیمیایی، میدان الکتریکی) برای اعمال انرژی موردنیاز به یک گاز خنثی جهت تولید پلاسما وجود دارند. (شکل ۱-۵) یکی از راه‌های ممکن، اعمال انرژی حرارتی است که در این روش به‌وسیله‌ی شعله می‌توان دمای گاز را تا نقطه‌ی تشکیل پلاسما افزایش داد. راه دیگر، اعمال انرژی به یک مخزن گاز با استفاده از تشعشعات پرنرژی است که این فوتون‌ها به حجم مشخصی از گاز وارد می‌شوند [۲۷]. اما رایج‌ترین روش برای تولید و پایدار نگه‌داشتن یک پلاسمای غیرحرارتی اتمسفری برای کاربردهای تکنیکی و تکنولوژیکی، اعمال میدان الکتریکی به یک گاز خنثی است. اساساً هر حجمی از یک گاز خنثی، همیشه دارای مقدار کمی الکترون و یون است که برای مثال برخورد تشعشعات کیهانی و یا تابش‌های رادیواکتیو با گازها، تشکیل شده‌اند. لذا با اعمال میدان الکتریکی این حامل‌های باردار آزاد سرعت می‌گیرند و هنگام برخورد این حامل‌های باردار با اتم‌ها و مولکول‌های درون گاز یا سطح الکترودها، ذرات باردار جدید تولید می‌شوند. این عمل معمولاً منجر به تولید بهمنی از ذرات باردار می‌شود که در نهایت با از دست رفتن برخی حامل‌های باردار و رسیدن به تعادل، پلاسمای پایدار پدید می‌آید [۲].

^۱ Electron-Impact ionization

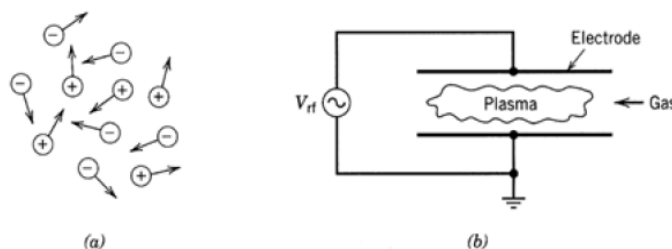
^۲ Photoionization



شکل ۱-۵: روش‌های مختلف تولید پلازما [۲].

۱-۸-۱ تخلیه الکتریکی

یکی از ساده‌ترین و متداول‌ترین روش‌های یونیزه کردن گاز برای تولید محیط پلازما، استفاده از تخلیه الکتریکی در گاز است. اصطلاح تخلیه الکتریکی^۱ گاز از فرآیند تخلیه یک خازن در مداري که شامل دو الکترود بافاصله مشخص، نشأت گرفته است. اگر ولتاژ به حد کافی بالا باشد، شکست الکتریکی رخ داده و گاز یونیزه می‌شود. در این حالت خازن بسته شده و مدار تخلیه می‌شود. در واقع تخلیه الکتریکی در گازها به معنی عبور جریان الکتریکی از گاز یونیزه شده می‌باشد. شکست الکتریکی^۲ یکی از فرآیندهای تخلیه الکتریکی است، که در حین آن گاز یا دی‌الکتریک، خاصیت عایقی خود را از دست می‌دهد و رسانا می‌شود [۸].



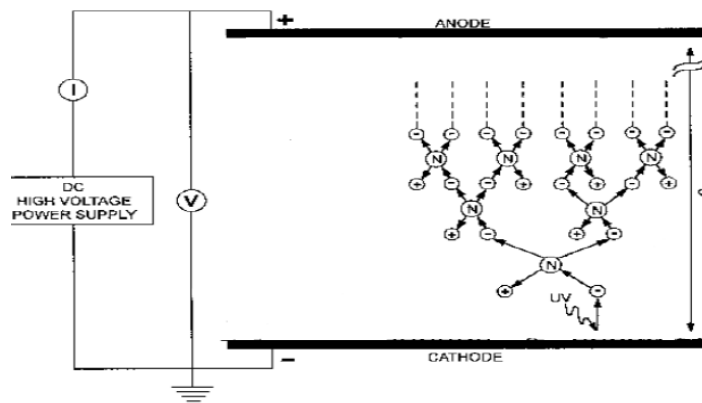
شکل ۱-۶: (a) پلازما، (b) تخلیه الکتریکی [۸].

¹ Electrical discharge

² Electrical breakdown

۱-۸-۲ فرآیند تخلیه الکتریکی

در ابتدای فرآیند با اعمال میدان الکتریکی بین آند و کاتد، الکترون‌های آزاد به سمت الکترودهای با بار مخالف کشیده می‌شوند. در پلاسما، الکترون‌ها به سمت آند و یون‌های مثبت به طرف کاتد شتاب گرفته و متناوباً با ذرات خنثی گاز زمینه برخورد می‌کنند و جریان کمی ایجاد می‌کنند. با ادامه‌ی افزایش ولتاژ، جریان نیز افزایش می‌یابد تا جایی که میدان تمام بارهای جدید را به سمت الکترودها کشانده و جریان به حالت اشباع برسد. با ادامه افزایش ولتاژ، جریان نیز زیاد می‌شود و در ولتاژ خاصی، شکست الکتریکی رخ می‌دهد که تابش نور نیز قابل‌رؤیت است. پس‌از این مرحله الکترون‌ها با حرکت در میدان، انرژی کسب کرده و با رسیدن به انرژی یونیزاسیون اتمی، باعث ایجاد الکترون‌های جدید می‌شوند. این الکترون‌های کم‌سرعت نیز فرآیند قبل را طی می‌کنند که نتیجه‌ی آن بهمن الکترونی خواهد بود [۹].



شکل ۱-۷: فرآیند بهمن الکترونی [۱۰].

۱-۸-۳ طبقه‌بندی تخلیه الکتریکی

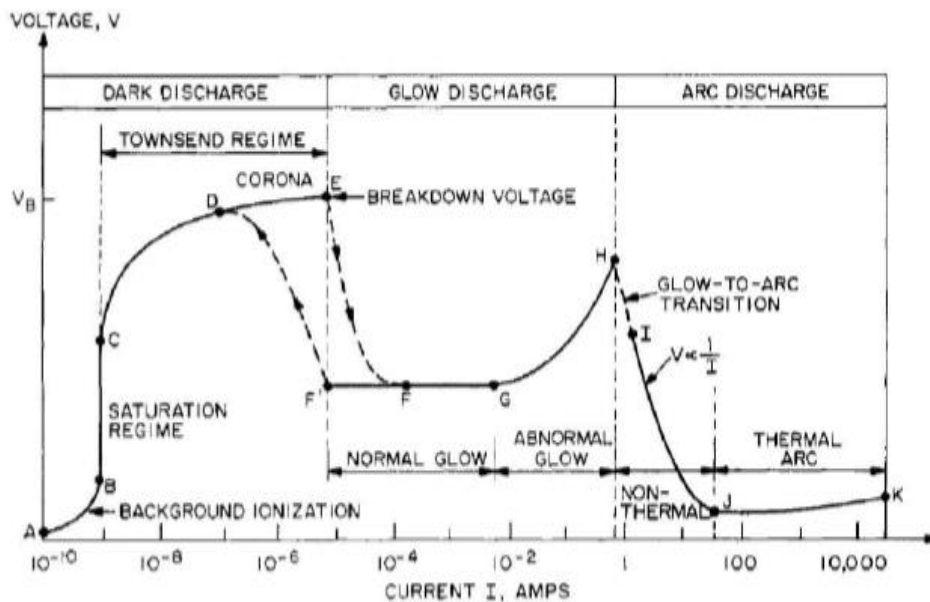
تخلیه الکتریکی در فشار و جریان‌های مختلف صورت می‌گیرد. در حالت پایدار برحسب جریان-ولتاژ تخلیه گازی به سه دسته تقسیم می‌شود:

تخلیه تاریک^۱: در این ناحیه جریانی حدود میکرو آمپر از گاز عبور می‌کند و نوری از پلاسما حاصل نمی‌شود، به جز در ناحیه‌ای که تخلیه‌هایی به صورت جرقه‌های کرونا در اثر میدان‌های قوی محلی ایجاد می‌شود.

تخلیه نورانی^۲ که در آن جریان 10^{-5} تا 1 A از گاز می‌گذرد و شکست الکتریکی در گاز رخ می‌دهد.

تخلیه قوسی^۳: که بیش از 1 A از گاز عبور می‌کند.

هر یک از تخلیه‌ها به تفصیل بررسی خواهد شد.



شکل ۱-۸: تخلیه الکتریکی بر اساس ولتاژ - جریان [۱۱].

۱-۳-۸-۱ تخلیه تاریک

الف) ناحیه B-A، حالت یونیزاسیون زمینه^۴: در این حالت یون‌ها و الکترون‌هایی که به سبب تابش - های کیهانی یا هر دلیل دیگری در محیط وجود دارند، به سمت الکترودها کشیده می‌شوند.

¹ Dark discharge

² Glow discharge

³ Arc discharge

⁴ Background ionization

ب) ناحیه C-B ، حالت اشباع^۱ : تمامی یون‌ها و الکترون‌های موجود در فضای تخلیه به سمت الکترودها جذب شده‌اند و میدان الکتریکی موجود نیز انرژی کافی برای تولید الکترون یا یون جدید از طریق فرآیند یونش را ندارد.

ج) ناحیه C-D ، تاوزند : میدان الکتریکی، انرژی کافی برای یونیزه کردن اتم‌های خنثی را فراهم می‌کند و باعث تولید الکترون‌های جدید می‌شود که این منجر به رشد سریع و نمایی جریان می‌گردد. در این قسمت انتهایی این ناحیه (D-E) دشارژهای کرونا اتفاق می‌افتد که در آن به علت تراکم میدان الکتریکی محلی در سطوح تیز یونش اتفاق می‌افتد [۲۵].

۱-۸-۳-۲ تخلیه نورانی

الف) ناحیه G-E ، دشارژهای نورانی نرمال^۲ : پس از رسیدن به ولتاژ خاصی، ناگهان شکست الکتریکی در گاز روی خواهد داد. رشد بهمنی چگالی الکترون‌ها و در نتیجه تحریک گاز زمینه به حدی است که پلاسمای موجود مرئی خواهد بود. در این شرایط با وجود تغییرات بسیار اندک در ولتاژ، جریان تا چندین مرتبه افزایش می‌یابد. با افزایش جریان، بخشی از کاتد توسط پلاسمای نورانی پوشانده می‌شود.

ب) ناحیه H-G ، تخلیه نورانی غیر نرمال^۳ : در این ناحیه جریان و ولتاژ هر دو به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند [۲۶].

۱-۸-۳-۳ تخلیه قوسی

الف) ناحیه I-H ، انتقال از ناحیه نورانی به قوسی^۴ : در اینجا چگالی جریان در کاتد به حدی بالاست که می‌تواند سبب گرم و سفید شدن کاتد گردد.

ب) ناحیه J-I ، قوس غیر حرارتی^۱ : در این حالت دمای یون‌ها و الکترون‌ها یکسان نیست و در صورت کاهش ولتاژ، جریان الکتریکی افزایش می‌یابد.

¹ Saturation

² Normal glow

³ Glow abnormal

⁴ Glow to arc transition

ج) ناحیه K-J ، قوس حرارتی^۲: در این ناحیه با افزایش ولتاژ، جریان نیز روند افزایشی دارد و دمای یون‌ها و الکترون‌ها یکسان است [۱۱].

۹-۱ طبقه‌بندی پلاسما

پلاسما از نظر چگالی بارها و انرژی ذرات بسیار متنوع است. از مهم‌ترین عواملی که چگونگی حالت پلاسما را تعیین می‌کند، دما و فشار است.

۱-۹-۱ طبقه‌بندی پلاسما بر اساس دما

هر محیط پلاسمایی دارای پارامترهای مهمی است که بر اساس آن پارامترها نوع پلاسما تعیین می‌شود. مهم‌ترین این پارامترها دما و چگالی هستند. به طوری که مشخصات دیگر پلاسما وابسته به این دو مشخصه هستند. در فیزیک پلاسما معمولاً دما برحسب واحدهای انرژی بیان می‌شود.

$$KT = 1eV = 1.6 \times 10^{-19} J \quad (۸-۱)$$

$$1eV = 11600^\circ K \quad (۹-۱)$$

برای توصیف انرژی ذرات در پلاسما، پارامتر دما به کار برده می‌شود. پلاسما بر اساس دما به دو دسته گرم و سرد طبقه‌بندی می‌شود:

(۱) پلاسمای گرم یا پلاسمای تعادل ترمودینامیکی ناحیه‌ای^۳ (LTE)

(۲) پلاسمای سرد یا پلاسمای بدون تعادل ترمودینامیکی ناحیه‌ای^۴ (Non-LTE)

۱-۱-۹-۱ پلاسمای گرم (LTE)

پلاسمای گرم به وسیله قوس‌های الکتریکی، واکنش‌های هسته‌ای و تحریک لیزری و شعله و مایکروویو تولید می‌شود. به پلاسمایی گفته می‌شود که تقریباً به طور کامل یونیزه شده است و به تعادل کامل ترمودینامیکی نزدیک شده است. پلاسماهای گرم را پلاسمای تعادلی یا حرارتی نیز می‌نامند. پلاسمای

¹ Arc discharge

² Nonthermal arc

³ Local thermodynamic equilibrium plasma

⁴ Non-local thermodynamic equilibrium plasma

گرم LTE فقط در ناحیه تحت تابش دارای شرایط تعادل کامل ترمودینامیکی است. پلاسماهای گرم در دماهای بالا، انرژی و درجه‌ی یونیزاسیون بالایی را دارا هستند. در این پلاسما دمای یون‌ها و الکترون‌ها یکسان است. از این پلاسماها در صنایع هسته‌ای، متالورژی و در فناوری‌های لیزری استفاده می‌کنند.

۱-۹-۱-۲ پلاسما سرد (Non-LTE)

پلاسما سرد، پلاسما غیرحرارتی است که در فشار اتمسفر با عبور گاز از میان یک میدان الکتریکی تولید می‌شود. این پلاسما تحت شرایطی تولید می‌شود که در آن دمای بخش عمده گاز بسیار پایین‌تر از دمای الکترون‌های آزاد است. پلاسما سرد در واقع سرد نیست، حتی دمای الکترون‌ها در این پلاسما به ۱۰۰۰ درجه سلسیوس هم می‌رسد، درحالی‌که دمای گاز نزدیک به دمای محیط می‌باشد [۱۲]. در واقع فقط بخش کوچکی از ذرات نزدیک به ۱ درصد یونیزه می‌شوند و به همین دلیل فرکانس برخورد‌های الاستیک بین الکترون‌ها و اتم‌ها پایین است و الکترون‌ها فرصت زیادی برای انتقال انرژی خود به گاز را ندارند و نمی‌توانند گونه‌های سنگین را به‌طور مؤثر گرم کنند.

بنابراین، گاز زمینه در دمای محیط و یا نزدیک آن باقی می‌ماند، در نتیجه دمای الکترون خیلی بزرگ‌تر از دمای گاز می‌گردد، به همین دلیل منجر به یک عدم تعادل حرارتی موضعی می‌شود [۱۴ و ۱۵]. پلاسما غیر تعادلی، پلاسما با یونش و دمای کم نیز می‌نامند و این باعث می‌شود این نوع برای مواد حساس به حرارت مناسب باشد [۱۶].

از پلاسما سرد برای تغییر خصوصیات سطحی پلیمرها، در زمینه‌های مهندسی و علوم پایه، سنتز ساختارهای پلیمری جدید، فرآیندهای پلیمریزاسیون، ایجاد پیوند در سطح مواد و ... استفاده می‌شود.

جدول (۱-۱) پلاسماهای سرد و گرم به‌صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است.

جدول ۱-۱: مقایسه‌ی ویژگی‌های اصلی پلاسمای سرد و گرم

پلاسماهای بدون تعادل ترمودینامیکی ناحیه‌ای Non-LTE	پلاسماهای تعادل ترمودینامیکی ناحیه‌ای LTE	
پلاسماهای غیرحرارتی (سرد)	پلاسماهای حرارتی (گرم)	نام مرسوم
$T_i < T_e$ تراکم الکترون کم $> 10^{19} \text{ m}^{-3}$ برخوردهای غیرالاستیک بین الکترون و ذرات سنگین باعث ایجاد یک پلاسمای شیمیایی می‌شود. ذرات سنگین به وسیله تعداد برخوردهای الاستیک کم، به مقدار کمی گرم می‌شوند.	$T_i = T_e$ تراکم الکترون زیاد: $10^{21} - 10^{26} \text{ m}^{-3}$ برخوردهای غیرالاستیک بین الکترون-ها و ذرات سنگین باعث ایجاد گونه‌های واکنش‌گر می‌شود درحالی‌که برخوردهای الاستیک ذرات سنگین را گرم می‌کند (بنابراین انرژی الکترون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد).	ویژگی‌ها
تخلیه‌های نورانی $T_i \approx 300 - 1000 \text{ K}$ $T_e \approx 10000 \text{ K}$	تخلیه‌های قوسی $T_i = T_e \approx 10000 \text{ K}$	مثال

۱-۹-۲ طبقه‌بندی پلاسمای بر اساس فشار

پلاسمای به‌طور کلی از تخلیه الکتریکی در فشار کم یا زیاد ایجاد می‌شود. بر این اساس پلاسمای به دو دسته، پلاسمای در فشار بالا و فشار پایین تقسیم‌بندی می‌شود. معمولاً پلاسمای فشار بالا در فشار یک اتمسفر و بالاتر اتفاق می‌افتد که از آن جمله می‌توان به تخلیه قوسی، تخلیه کرونا^۱ و تخلیه سد دی-الکتریک^۲ اشاره کرد. اما پلاسمای فشار پایین، معمولاً در فشار ۱۰ torr یا کمتر اتفاق می‌افتد که بارزترین مثال آن تخلیه نورانی است.

اختلاف عمده‌ی پلاسمای فشار بالا و پایین بیشتر مربوط به چگونگی ایجاد ذرات باردار، انرژی و چگالی ذرات باردار می‌باشد. از آنجایی‌که هزینه‌ی ساخت و نگهداری سیستم‌های خلأ بسیار بالا می‌باشد، در سال‌های اخیر انواع مختلف پلاسمای سرد فشار اتمسفری توسعه‌یافته است [۱۷]. از جمله مزایای پلاسمای فشار اتمسفری نسبت به فشار پایین می‌توان حذف سیستم‌های گران‌قیمت، قابلیت پردازش مستقیم، راندمان بالا ذکر کرد [۱۰].

¹ Corona discharge

² Dischargedielectric barrier

۱-۱۰ کاربردهای تکنولوژی پلاسما

تکنولوژی پلاسما می‌تواند طیف گسترده‌ای از تیمارها را روی مواد اعمال کند. به‌خصوص اینکه با تغییر ویژگی‌های فیزیکی پلاسما که توسط سامانه‌های مختلف یونیزاسیون ایجاد می‌شود، می‌توان سه نوع فرآیند را روی مواد اعمال نمود:

- تخریب توکسینها و مواد مضر
- تیمار سطحی مواد موجود
- ایجاد مواد جدید [۲۸]

کاربردهای پلاسمای سرد رو به افزایش می‌باشد که شامل کاربرد آن در پزشکی، صنعت غذا، نساجی، صنایع بسته‌بندی، استرلیزاسیون و کاربردهای میکروبی و محیط‌زیست می‌باشد [۲۹].

فرآیندهای سنتی مورد استفاده در صنعت نساجی توأم با مصرف زیاد آب و آلودگی منابع آبی ناشی از کاربرد مواد شیمیایی، مصرف انرژی بالا و زمان‌بر بودن هستند [۳۵]. بنابراین، در صنعت نساجی علاقه زیادی به جایگزینی فرآیندهای سنتی با فرآیندهای جدید است. پلاسمای سرد یک فناوری خشک و سازگار با محیط‌زیست است، که به‌طور گسترده برای تغییر خواص شیمیایی و توپوگرافی از پلیمرهای سطح پارچه‌ای استفاده می‌شود [۳۶]. اعمال پلاسما باعث تغییر فیزیکی و شیمیایی در مواد نساجی خواهد شد که این تغییرات منجر به خصوصیات زیر می‌شود:

- اصلاح سطحی منسوجات بدون تغییر خصوصیات عمقی
- بهبود خواص رنگ‌پذیری، چسبندگی و چاپ‌پذیری
- افزایش آب‌گریزی برای تولید پارچه‌های ضد آب و روغن
- افزایش آب‌دوستی برای بهبود رنگ‌پذیری و چاپ
- ضد عفونی کردن پارچه‌های طبی
- افزایش قدرت پارچه‌های پشمی به پارگی و بهبود کشش سطحی منسوجات [۳۷، ۳۸].

از دیگر کاربردهای پلاσμα به استفاده از آن برای حفظ محیطزیست می‌توان اشاره کرد [۲۳]. امروزه حفظ محیطزیست درگیر مشکلات بفرنجی است و علاوه بر زائدات معمول شهری، مواد زائد سمی و خطرناک سهم عمده‌ای در آلوده‌سازی آن داشته است. پیرولیز پلاσμα روشی نوین برای انهدام سالم زباله‌ها و دورریزهای خطرناک و بیمارستانی است. این روش برای همه نوع پسماند مخصوصا برای پسماندهای ویژه نظیر زباله‌های بیمارستانی به‌کاربرده می‌شود. این فناوری قادر است انواع زباله‌ها را بدون توجه به نوع آن‌ها به مواد قابل استفاده و سازگار با محیطزیست تبدیل کند. این روش کاملا پاک و مقرون‌به‌صرفه بوده و منبعی مطمئن برای تولید گاز هیدروژن با خلوص بالا می‌باشد.

پلاσμα برای کنترل آلودگی در بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان به‌ویژه هوای بیمارستان جهت کاهش عفونت بیمارستانی به کار می‌رود [۳۹]. تجهیزات پلاسمایی برای بو زدایی و حذف دود سیاه و سوخت و ذرات گردوغبار و کل ترکیبات آلی فرار استفاده‌های شایانی در سطوح صنعتی، پتروشیمی، فلزی، نساجی و غیره دارد.

پلاσμα در صنعت بسته‌بندی نیز کاربردهای فراوانی دارد [۲۱]. دهه‌های گذشته روند جایگزینی مواد سنتی مانند شیشه، فلزات و کاغذ با مواد پلیمری به‌طور مستمر در فرآیندهای مختلف صنایع، از جمله صنایع غذایی در حال رشد بوده است. پلیمرها دارای مزایای فراوانی از جمله، انعطاف‌پذیری بیشتر، شفافیت، مواد شیمیایی بی‌اثر، وزن مخصوص کم و معمولا هزینه پایین هستند [۴۰]. اکثر پلیمرهای مرسوم، در برخی کاربردهای مهم به علت ویژگی‌های ضعیف سطحی مانند پایین بودن انرژی آزاد سطح و رطوبت پذیری اندک محدود شده‌اند و بسیاری از فرآیندهای صنعتی مانند تمیز کردن، اتصال و چاپ نیاز به موادی با چسبندگی مناسب دارند، بنابراین باید ویژگی‌های سطحی این مواد بهبود یابند [۴۱]. پلاسمای سرد تغییرات فیزیکی و شیمیایی را در سطح مشترک پلاσμα و پلیمر ایجاد می‌کند که در نهایت موجب اصلاح خواص سطحی آن می‌شود. نزدیک بودن دمای این نوع پلاσμα به دمای اتاق، اثرات منفی حرارتی بر سطوح به‌ویژه سطوحی که به گرما حساس هستند را می‌کاهد.

۱-۱۱ گیاه‌شناسی کلزا

۱-۱۱-۱ منشأ پیدایش کلزا

کلزا بانام علمی (*Brassica napus* L.) که در زبان انگلیسی *Rapeseed* و در زبان فرانسه *Colza* نامیده می‌شود. گیاهی از خانواده *Brassicaceae* می‌باشد. کلزا یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی جهان به شمار می‌آید و از نظر تولید روغن نباتی پس از نخل روغنی و سویا سومین گیاه دانه روغنی جهان محسوب می‌شود [۴۵]. زراعت کلزا از حدود ۳۰۰۰ سال پیش، در هندوستان رواج داشته است و از حدود ۳۵ سال پیش از میلاد، از چین به ژاپن منتقل شد. خاستگاه این گیاه به آسیا و اروپا نسبت داده شد و می‌توان گفت دارای دو موطن، یکی در پاکستان و افغانستان و دیگری در نواحی مدیترانه می‌باشد [۴۶].

۱-۱۱-۲ مشخصات گیاه‌شناسی

از نظر مشخصات گیاه‌شناسی، گیاهی است علفی و دوره رشد یک‌ساله دارد. کلزا گیاهی سرمادوست و روزبلند است. این گیاه خودگشن بوده و درصد خودگشنی آن بیش از ۷۰٪ می‌باشد. میوه کلزا به صورت خورجین ۱۰-۵ سانتی‌متر و بدون کرک است [۴۷]. گیاه کلزا دارای دو تیپ بهاره و پاییزه می‌باشد چرخه زندگی کلزای پاییزه دارای دو مرحله رشدی مشخص می‌باشد: مرحله رویشی، که اندام‌های رویشی در پائیز ظاهر می‌شوند و با گذشت دوره‌ی خواب زمستانه، گیاه رشد سریع را در بهار آغاز می‌کند که با تمایز اندام‌های زایشی همراه است. گونه *Brassica napus* کلزای معمولی است که عموماً در اروپا و کانادا کشت می‌شود و در کانادا به کلزای آرژانتینی معروف است زیرا برای اولین بار از آنجا به کانادا وارد شده است. *B.napus* مهم‌ترین گونه جنس *Brassica* محسوب می‌شود. ارقام بهاره و زمستانه این گونه به‌عنوان منبع روغنی گیاهی کشت می‌گردد ولی ارقام زمستانه در شرایط مساعد معمولاً پر محصول تر می‌باشد. بذور آن اغلب به رنگ سیاه بوده و در حالت طبیعی فرم‌هایی با بذور زرد رنگ نیز وجود دارد. به نظر می‌رسد رنگ زرد بذر با مقدار کمتر تانن در بذور و نازک‌تر بودن

پوسته بذر ارتباط داشته و سبب می‌شود که میزان روغن و پروتئین بذر بیشتر و مقدار الیاف و فیبر کنجاله کمتر باشد [۴۸].

۱-۱۱-۳ رشد و نمو کلزا

مراحل رشدی کلزا به چهار مرحله تقسیم می‌شود: ۱- مرحله رشد رویشی ۲- مرحله رشد زایشی ۳- مرحله رشد غلاف ۴- مرحله تشکیل بذر. فاکتورهای زراعی مانند تاریخ کاشت واریته، تراکم، حاصلخیزی خاک، آب و دیگر عوامل می‌توانند بر مدت و نحوه رشد و نمو طی این مراحل تأثیر داشته باشد و در نتیجه عملکرد و اجزاء آن تغییر دهد [۴۸].

۱-۱۱-۴ تاریخچه کشت کلزا در جهان و ایران

کاشت دانه‌های روغنی از دیرباز بخش مهمی از کشاورزی کشورهای شرقی را تشکیل می‌داده است و برخی از آن‌ها جزو اقلام عمده صادراتی این کشورها محسوب می‌شده‌اند. کاربرد دانه‌های روغنی در مصارف غذایی انسان و استفاده از کنجاله آن‌ها برای دام و نیز مصرف آن‌ها در داروسازی، صابون‌سازی و برای سوخت سبب جلب علاقه کشاورزان شده و به دلیل آن‌که فرآورده‌های حاصل از دانه‌های روغنی از ورود فرآورده‌های مشابه به داخل جلوگیری می‌کرده و جانشین مستقیم سوخت و روغن‌های وارداتی بوده است، دولت‌ها نیز از کاشت آن‌ها حمایت کرده‌اند [۴۹]. کشف پروتئین گیاهی در این محصولات و استفاده از آن به‌جای گوشت و پروتئین ماهی و نیز معرفی دانه‌های روغنی جدیدی چون سویا، شلغم روغنی به بازارهای جهانی و افزایش تقاضا برای فرآورده‌های مختلف آن‌ها از جمله شیر، پنیر، سویا و نوشیدنی مقوی تهیه‌شده از بادام‌زمینی سبب اهمیت روزافزون این محصولات شده است. ایران نیز از جمله کشورهایی است که کاشت برخی دانه‌های روغنی چون کنجد، کرچک، گلرنگ و آفتابگردان در آن قدمتی طولانی دارد [۴۹]. دانه‌های روغنی شامل کلزا، سویا، آفتابگردان و پنبه‌دانه جزء گیاهان اصلی تأمین‌کننده روغن خام داخلی می‌باشند و سایر دانه‌های روغنی سهم ناچیزی را دارند.

۱-۱۱-۵ اهمیت کلزا

دانه‌های روغنی بعد از غلات دومین منبع تأمین‌کننده کالری برای جوامع بشری محسوب می‌شوند. روغن و چربی موردنیاز انسان از منابع مختلف گیاهی و حیوانی تأمین می‌شود. روغن‌های گیاهی به دلیل دارا بودن مقادیر زیادی پروتئین و به‌ویژه اسیدهای چرب غیراشباع، نقش مهمی در کنترل کلسترول خون و تندرستی جوامع دارند [۵۰]. حدود ۱۴/۷٪ از کل تولید روغن نباتی جهانی توسط کلزا تأمین می‌شود که تولید جهانی آن طی سال ۲۰۱۶ میلادی برابر با ۶۷/۱۶ میلیون تن گزارش گردیده است. با توجه به این‌که میزان روغن حاصل از دانه‌های روغنی تولید داخل، حداکثر به ۸۶ هزار تن می‌رسد، که چیزی حدود ۸٪ از نیاز روغن خام کشور را تأمین می‌کند، اهمیت گیاه روغنی کلزا بیش‌ازپیش آشکار می‌شود [۵۰].

به‌طورکلی دلایل برتری کشت کلزا در ایران و توجه کشاورزان به آن را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود (یافته‌های بخش تحقیقات دانه‌های روغنی کشور):

- ۱) کلزا گیاهی پاییزه است در نتیجه نیاز کمتر به آبیاری داشته و امکانات استفاده از نزولات آسمانی وجود دارد. همچنین در رقابت با محصولات پرسود تابستانه قرار نمی‌گیرد.
- ۲) کلزا دارای تیپ‌های زمستانه و بهاره بوده و با برخورداری از تنوع ارقام، امکان کشت آن در اقلیم‌های مختلف کشور وجود دارد.
- ۳) برداشت آن در بهار و در زمان رکود صنایع روغن‌کشی باعث تکمیل ظرفیت کارخانه‌ها و ارتقا بهره‌وری و درآمد آن‌ها می‌شود.
- ۴) به علت تولید مقادیر زیادی بقایای گیاهی علاوه بر تأثیر مثبت در افزایش میزان ماده آلی خاک می‌تواند علوفه موردنیاز دامی کشور را تأمین کند.
- ۵) کلزا درصد روغن بالا (۴۵-۴۰) درصد برخوردار بوده و همچنین میزان پروتئین آن قابل‌ملاحظه است.

۶) کلزا با برداشت زودتر در مقایسه با گندم، زمینه لازم را برای کشت دوم محصولات تابستانه فراهم می‌سازد.

۷) در توسعه صنعت زنبورداری نقش مهمی ایفا می‌کند.

۸) کلزا در تناوب با غلات آبی علاوه بر افزایش عملکرد غلات، امکان مبارزه مطلوب با علف‌های هرز باریک برگ غلات را با استفاده از علف‌کش‌های اختصاصی فراهم می‌کند.

۹) با وجود ۶۰۰ هزار هکتار مزارع برنج در کشور، پتانسیل بسیار عظیمی برای کشت ارقام زودرس کلزا به‌عنوان کشت دوم بعد از برداشت برنج وجود دارد. توسعه کشت این محصول در مناطق برنج‌کاری علاوه بر اثرات مطلوب زراعی و بهبود برنامه تناوب زراعی می‌تواند با بالا بردن درآمد زارعین، اثرات مثبت اجتماعی و اقتصادی در مناطق کشت برنج کشور داشته باشد.

۱۰) وابستگی شدید کشور به روغن وارداتی و حمایت دولت از تولید گیاهان روغنی.

۱-۱۲ اهمیت استفاده از پلاσμα در کشاورزی

بر اساس پیش‌بینی موسسه تأمین منابع جهانی، جمعیت جهان از سال ۲۰۱۲ از ۷ بیلیون نفر تا ۹/۶ بیلیون در سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت. با این سرعت رشد جمعیت، نیاز به مواد غذایی نیز افزایش خواهد یافت. برای برطرف کردن این نیاز صنایع غذایی و کشاورزی در دنیا بیش از سایر مؤسسات تحت فشار خواهند بود در نتیجه هزینه‌های منابع طبیعی و محیطی نیز به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابند. در زمینه کشاورزی این افزایش نیاز تهدید استفاده بیش‌ازپیش آفت‌کش‌ها، مواد ضدعفونی‌کننده و کودهای شیمیایی را به دنبال دارد چراکه اگرچه منجر به افزایش تولید محصولات کشاورزی می‌گردد ولی برای طبیعت و موجودات زنده بسیار مضر می‌باشند. از طرفی مقاوم شدن آفت‌ها در برابر آفت‌کش‌ها منجر به این می‌شود که کشاورزان میزان مصرف خود را به‌طور مداوم افزایش دهند. با توجه به موارد ذکرشده دانشمندان به فکر روش‌های جدیدی جهت کنترل آفت‌ها در

مرحله پیش از برداشت و همچنین انبارش محصولات پس از برداشت متمرکز شده‌اند با این هدف که در این روش‌های جدید مواد شیمیایی جدیدی به محصولات اضافه نکرده و سرعت عمل بالایی داشته باشند و هزینه‌های زیادی را نیز به دنبال نداشته باشند. در این میان قارچ‌ها نیز به‌عنوان عامل مهمی در فساد غذایی ذکر شده‌اند که روش‌های نوین باید قادر به از بین بردن قارچ‌ها بدون آسیب رساندن به قدرت باروری دانه‌ها و تخریب خود محصولات باشند. از طرفی با توجه به اینکه منابع موردنیاز رو به رشدی موردنیاز است فناوری تولید مداوم که نیاز کمتری به آب و انرژی داشته باشد و دوست‌دار طبیعت باشد در صدر توجه است. استفاده از فناوری‌های روز دنیا در کشاورزی به دلیل افزایش جمعیت، کمبود منابع آب و مشکلات انبارش و جابجایی محصولات، بسیار مورد توجه می‌باشد.

پلازما نقش اساسی در طیف گسترده‌ای از فرآیندهای فیزیولوژیکی و رشد و نمو گیاهان از جمله تغییر ساختار پوسته بذر، افزایش نفوذپذیری پوسته بذر و تحریک جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه چه ایفا می‌کند [۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴، ۵۵]. این اثرات در چندین گیاه مانند سلمه تره [۵۱]، برنج [۵۶]، گندم [۵۷]، گوجه‌فرنگی [۵۸] و بادمجان اثبات شده است [۵۹]. علاوه بر این کاربرد پلاسمای سرد می‌تواند فعالیت‌های متابولیسمی گیاهان مانند آنزیم‌های دهیدروژناز، سوپراکسید دیسموتاز [۵۸، ۶۰] و پراکسیداز [۶۱]، رنگدانه‌های فتوسنتزی، بازده فتوسنتز و فعالیت نیترات ردوکتاز [۶۲] را بهبود ببخشد. پیش تیمار پلاسمای سرد در لوبیا منجر به افزایش آب‌دوستی سطح خارجی بذر شده که به‌طور قابل توجهی باعث افزایش در جذب آب توسط پوسته بذر و افزایش سرعت جوانه‌زنی می‌گردد [۶۳]. علاوه بر این پلازما از پیشرفت پاتوژن‌های مهاجمی که باعث بیماری در گیاهان در حال رشد می‌شوند جلوگیری می‌کند [۵۲، ۶۴، ۶۵] همچنین با کاهش میزان مواد سمی و نیترات در بذرها باعث بهبود کیفیت دانه برای مصرف‌کننده می‌شود [۶۶]. پیش تیمار بذر با پلازما باعث ضدعفونی بذر و غیرفعال سازی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا می‌گردد [۵۲، ۶۷، ۶۸]. جیانگ و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند کاربرد پلاسمای سرد با توان ۸۰ وات به‌طور قابل توجهی جوانه‌زنی گندم را افزایش داد [۶۱]. همچنین لینگ و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند پلاسمای سرد با توان

۸۰ وات باعث افزایش جوانه‌زنی بذر سویا به میزان ۱۴/۶۶ درصد گردید و طول ساقه، وزن خشک ساقه، طول ریشه، وزن خشک ریشه به ترتیب ۱۳/۷۷، ۲۱/۹۵، ۲۱/۴۲ و ۲۷/۵۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت [۵۵]. سرا و همکاران (۲۰۱۳) اثبات کردند رشد گیاهچه خشک با کاربرد پلاسمای سرد به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت [۶۹]. پلاسمای سرد باعث افزایش وزن هزار دانه و کاهش ذخیره بذر گردید. این افزایش فعالیت آنزیم به علت افزایش نفوذپذیری پوسته بذر و جذب بیشتر آب در تیمار پلاسماست [۷۰]. گزارش شده است که کاربرد پلاسمای سرد در گندم باعث افزایش طول ریشه نسبت به نمونه شاهد گردید [۶۱]. پژوهشگران نشان دادند که قرار گرفتن بذور ترب در معرض پلاسمای سرد اتمسفری می‌تواند باعث افزایش رشد آن‌ها تا هفته‌ها پس از جوانه‌زنی گردد [۷۱، ۷۲]. در آزمایش دیگری پلاسمای سرد به مدت ۱۵ ثانیه و توان ۸۰ وات در سویا باعث افزایش جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گردید. پلاسمای سرد می‌تواند به افزایش سرعت جوانه‌زنی و شکست خواب بذر کمک کند [۷۳، ۵۵]. پلاسمای سرد باعث افزایش طول ساقه و ریشه و وزن خشک ساقه و ریشه گردید [۵۵]. قرار گرفتن بذر خشک شاهی گوش موشی (*Arabidopsis thaliana* L.) به مدت سه دقیقه در معرض پلاسمای سرد باعث افزایش سرعت رشد گیاه و کوتاه شدن دوره برداشت، افزایش وزن کل دانه و افزایش تعداد دانه نسبت به نمونه شاهد گردید [۷۴].

فصل دوم

تخلیه سد دی الکتریک

۲-۱ مقدمه

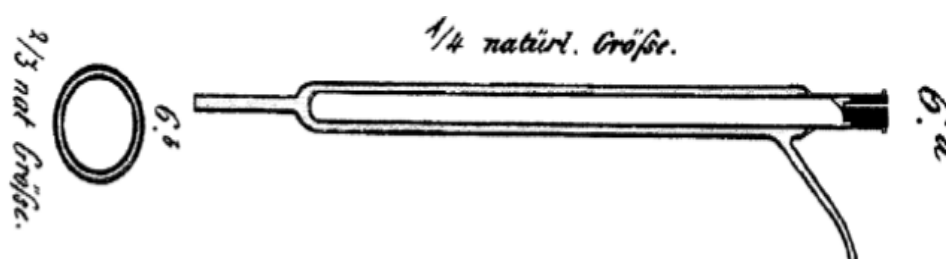
خواص منحصربه‌فرد پلاسما امکان استفاده از آن را به‌طور گسترده در صنعت و پزشکی مهیا ساخته است. طبقه‌بندی از نظر فشار، پلاسما را به دو دسته‌ی کلی پلاسماهای فشار پایین و پلاسماهای فشار اتمسفری تقسیم‌بندی می‌کند. در حال حاضر پلاسماهای فشار اتمسفری به دلیل سادگی و هزینه‌ی کم آن نسبت به پلاسماهای فشار پایین مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این نوع پلاسما غیرتعادلی است، یعنی تعادل ترمودینامیکی محلی ندارد و دارای الکترون‌های داغ تا 10 eV ، یون‌های سرد و گونه‌های خنثی، که دمای آن در محدوده‌ی دمای اتاق است، از نقطه‌نظر ماکروسکوپی، این یک پلاسما سرد است [۷۶]. این خصوصیت مهم پلاسماهای سرد فشار اتمسفری این امکان را فراهم می‌سازد تا از آن در پردازش مواد حساس به گرما و بافت‌های زنده در صنعت و پزشکی استفاده شود [۷۷]. در این فصل تخلیه سد دی‌الکتريک و چگونگی تولید پلاسماهای سرد گفته شده است.

۲-۲ تخلیه سد دی‌الکتريک

به‌طور کلی، تخلیه سد دی‌الکتريک بین دو الکتروود که حداقل یکی از آن‌ها با یک لایه دی‌الکتريک پوشانده شده است، صورت می‌گیرد. این تخلیه با اعمال ولتاژ بالای متناوب در حد چندین کیلوولت با فرکانس 50 Hz تا چندین kHz بین دو الکتروود انجام گرفته و وجود دی‌الکتريک مانع از عبور جریان بالا میان دو الکتروود و شکل‌گیری تخلیه قوسی می‌گردد. جریان عبوری در پلاسماهای تخلیه سد دی-الکتريک در حدود میکرو آمپر است [۷۹] در واقع این نوع تخلیه باعث تولید پلاسماهای سرد فشار اتمسفری می‌شود.

۲-۳ تاریخچه‌ی تخلیه سد دی الکتریک

تخلیه سد دی الکتریک^۱ (DBD) یا تخلیه سد^۲ (BD) بیشتر از یک قرن کشف شده است. اولین بررسی‌های تجربی توسط زیمنس^۳ در سال ۱۸۵۷ انجام شد. وی با استفاده از یک لوله شیشه‌ای که در داخل آن دو الکتروود هم‌محور حلقوی است. با اعمال میدان الکتریکی متناوب گاز اکسیژن و هوا که در بین دو الکتروود قرار دارد را یونیزه کرده و پلاسما را ایجاد کرد. زیمنس از این پیکربندی برای تولید ازن استفاده کرد. پیکربندی شکل (۱-۲) نمونه‌ای از تخلیه سد دی الکتریک (DBD) می‌باشد.



شکل ۱-۲: لوله تخلیه ازن زیمنس در سال ۱۸۵۷ [۸۰].

اندریو^۴ و تایت^۵ در سال ۱۸۶۰ اسم (تخلیه خاموش^۶) را پیشنهاد کردند. امیل واربرگ^۷ در اوایل قرن بیستم بررسی‌های تجربی گسترده‌ای روی ماهیت تخلیه خاموش انجام داد. بکر^۸ در آلمان و اتو در فرانسه طراحی تولیدکننده ازن صنعتی با استفاده از DBD را مطرح کردند. مهندس باس^۹ به شکست هوا در فشار اتمسفر در بین دو الکتروود موازی تخت پوشیده شده با لایه‌ی دی الکتریک پی برد و توانست اولین عکس برداری از استریم را انجام دهد [۸۱].

¹ Dielectric barrier discharge

² Barrier discharge

³ Siemens

⁴ Andrews

⁵ Tait

⁶ Silent discharge

⁷ Emil Warburg

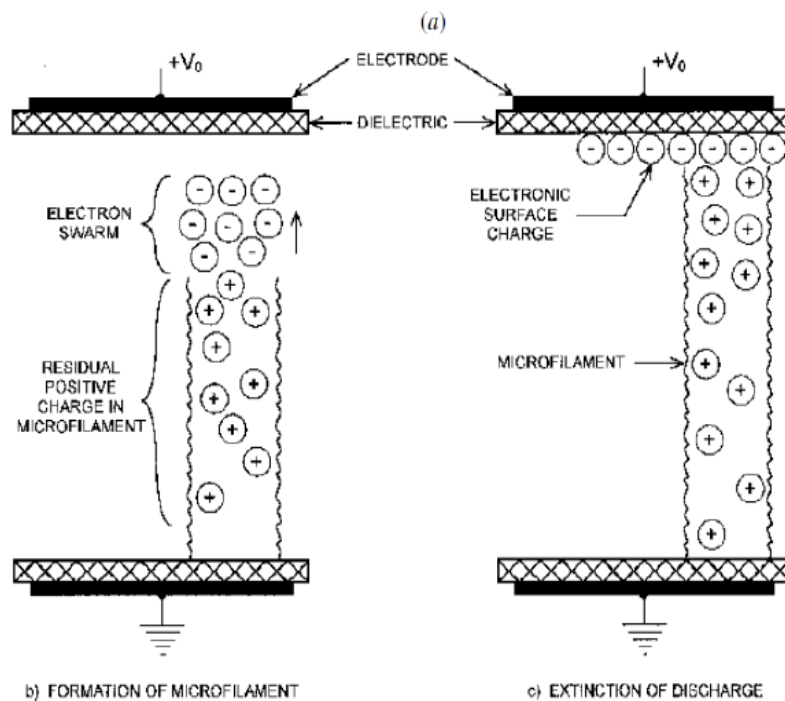
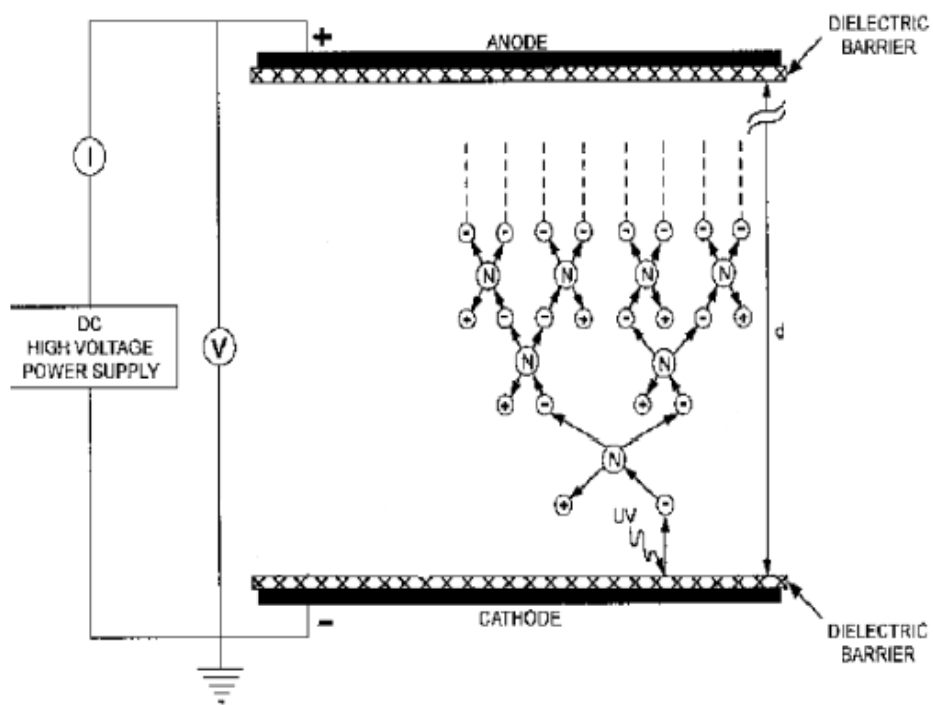
⁸ Becker

⁹ Buss

۲-۴ فرآیند تخلیه سد دی الکتریک

تخلیه سد دی الکتریک (DBD) عبارت است از ولتاژ بالای متناوب و تخلیه‌ی گازی که عموماً در فشار اتمسفری انجام می‌شود. اگر بر روی ساختار الکترودها لایه‌ای از ماده‌ی دی الکتریک قرار بگیرد، حضور این لایه مانع از آن می‌شود که بارهای تولیدشده به سطح الکترودها برسانا برسند. در هر نیم سیکل از نوسانات ولتاژ متناوب، پس از آنکه ولتاژ اعمال شده در گاز به اندازه‌ی ولتاژ لازم برای فروشکست رسید، تخلیه فیلامان‌های باریک شکل می‌گیرد و الکترون‌های رسانش به سمت الکترودها مثبت جریان می‌یابد. زمانی که بار در انتهای هر فیلامان روی سطح دی الکتریک انباشته می‌شود، ولتاژ در راستای فیلامان افت می‌کند تا آنجا که کمتر از اندازه‌ی لازم برای حفظ تخلیه الکتریکی باشد و در نتیجه تخلیه قطع می‌شود. تحرک کم بارهای الکتریکی در دی الکتریک نه تنها منجر به تسریع خاموش شدن فیلامان می‌شود، بلکه ناحیه‌ی افت ولتاژ را محدود و موضعی نیز می‌کند. در نتیجه فیلامان‌ها می‌توانند تا حد ممکن به هم نزدیک شوند [۴۳].

در واقع با اضافه کردن لایه‌ی دی الکتریک به ساختار تخلیه، نوعی کنترل در جریان صورت می‌گیرد. وجود این ماده‌ی عایق باعث انباشتگی بار بر روی سطح آن شده و باعث ایجاد یک میدان الکتریکی در خلاف جهت میدان اولیه می‌شود. لذا می‌توان گفت با اضافه کردن دی الکتریک به ساختار تخلیه، یک جریان با مدت‌زمان نانو ثانیه تولید و پس از این زمان، جریان قطع می‌گردد. اکنون اگر بتوان با سرعتی از همین مرتبه‌ی زمانی، این انباشتگی بار را از روی ماده‌ی دی الکتریک حذف کرد، دوباره میدان برقرار شده و جریان تولید می‌شود. این هدف توسط یک ولتاژ متناوب و یا یک ولتاژ پالسی محقق می‌گردد. به این ترتیب با تغییر جهت میدان، بارها در خلاف جهت قبل حرکت می‌کنند. لذا باید ولتاژ اعمالی بر روی دو الکترودها با سرعتی از حدود نانو ثانیه یا میکروثانیه تغییر جهت دهد که با همین سرعت قطع و وصل جریان صورت می‌گیرد. قطع و وصل جریان در این ساختار و با این سرعت باعث ایجاد پلاسما از نوع پلاسمای سرد در فضای بین دو الکترودها شده و لذا می‌توان آن را منبع تولید پلاسمای سرد در فشار اتمسفری دانست.



شکل ۲-۲: فرآیند تخلیه سد دی الکتریک [۱۰].

۲-۵ ساختار تخلیه سد دی الکتریک

۲-۵-۱ پیکربندی تخلیه سد دی الکتریک

تخلیه سد دی الکتریک دارای کاربردهای متنوعی می باشد. به همین منظور متناسب با کاربرد دارای پیکربندی و ساختار متفاوتی است. تخلیه سد دی الکتریک از لحاظ پیکربندی به سه دسته تقسیم می شود: ۱- تخلیه حجمی^۱، ۲- تخلیه سطحی^۲، ۳- تخلیه صفحه‌ای^۳. در تخلیه حجمی پیکربندی به دو صورت مسطح^۴ و استوانه‌ای^۵ یا هم‌محور^۶ می باشد. پیکربندی مسطح، شامل دو الکتروود موازی است و پیکربندی استوانه‌ای، شامل دو الکتروود استوانه‌ای هم‌محور (الکتروود داخلی و خارجی) است. در پیکربندی مسطح، لایه دی الکتریک به سه صورت در بین الکتروودها قرار می گیرد: ۱- لایه دی الکتریک بر روی هر دو الکتروود، ۲- لایه دی الکتریک تنها روی یک الکتروود ۳- لایه دی الکتریک مابین دو الکتروود موازی است. در پیکربندی استوانه‌ای لایه دی الکتریک به سه صورت در بین الکتروودها می باشد: ۱- لایه دی الکتریک بر روی دو الکتروود خارجی و داخلی، ۲- لایه دی الکتریک بر روی الکتروود داخلی، ۳- لایه دی الکتریک بر روی الکتروود خارجی.

تخلیه سطحی، دو الکتروود موازی که در آن یکی از الکتروودها بزرگ‌تر از دیگری است، لایه‌ی دی الکتریک فضای بین دو الکتروود (گپ) را کامل می پوشاند. در این پیکربندی، فرآیند تخلیه در طول لایه‌ی دی الکتریک و هیچ‌گونه تخلیه در گپ صورت نمی گیرد.

تخلیه صفحه‌ای، این نوع پیکربندی ترکیبی از دو نوع حجمی و سطحی می باشد. الکتروودها در داخل لایه دی الکتریک قرار می گیرند. متناسب با کاربرد تخلیه سد دی الکتریک از پیکربندی‌ها استفاده می شود مثلاً پیکربندی استوانه‌ای معمولاً تولید ازن، پیکربندی مسطح برای اصلاح سطوح و... [۸۲].

¹ Volume discharge

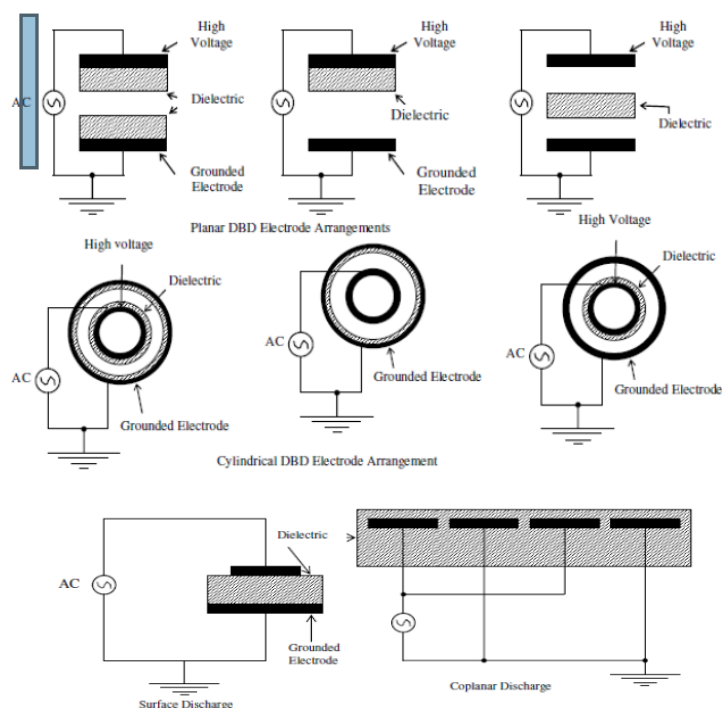
² Surface discharge

³ Coplanar discharge

⁴ Planar

⁵ Cylindrical

⁶ Coaxial



شکل ۲-۳: ساختار تخلیه الکتریکی در حضور سد دی الکتریک با شکل های مختلف الکترودی [۸۲].

۲-۵-۲ دی الکتریک

نوع دی الکتریک مورد استفاده در ساختار تخلیه سد دی الکتریک بسیار اهمیت دارد. معمولاً در تخلیه سد دی الکتریک از عایق هایی مانند شیشه، کوارتز، سرامیک، فویل های پلاستیکی، ورقات تفلون، لایه های پلیمر و... استفاده می شود که این عایق ها دارای استحکام بالا و همچنین ثابت دی الکتریک بالایی هستند. در واقع درجه ی استحکام این مواد از اهمیت بسزایی برخوردار است تا در مقابل برخوردهای الکترون-یونی استقامت خوبی داشته و به مرور زمان فرسوده نشوند [۱۰].

۲-۵-۳ مزایای تخلیه سد دی الکتریک

تولید پلاسمای سرد اتمسفری به روش تخلیه سد دی الکتریک نسبت به روش های دیگر، دارای مزایایی از قبیل دمای پایین گاز [۵]، نداشتن پسماندهای گازی، طول عمر کوتاه گونه های فعال شیمیایی [۴۲]، هزینه کم و عدم نیاز به خلأ می توان نام برد. به همین جهت از این روش در زمینه های پزشکی و علوم زیستی استفاده می شود [۸۲ و ۸۳].

۲-۶ کاربردهای پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک

کار تخلیه سد دی الکتریک در فشار اتمسفری و همچنین عدم نیاز به منابع تغذیه‌ی پیچیده باعث شده، پلاسمای سرد و با دمای پایین تولید شود، که پلاسمای سرد کاربردهای بسیار زیادی دارد که به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است:

۲-۶-۱ تولید صنعتی ازن

ازن از اکسیژن، هوا و دیگر ترکیبات N_2 ، O_2 تشکیل شده است. اولین گام در تولید ازن جدا کردن مولکول‌های O_2 می‌باشد، لذا محیط پلاسما به دلیل وجود برخوردهای الکترون-یونی و نیز ترکیبات فعال، محیطی مناسب برای جدایی مولکول‌های O_2 و تشکیل O_3 می‌باشد.

۲-۶-۲ پمپ لیزرهای CO_2

یکی دیگر از کاربردهای تخلیه سد دی الکتریک استفاده از آن در پمپاژ لیزرهای CO_2 می‌باشد. این روش، یکی از روش‌های متداول است. کاربردهای متداول این نوع لیزر یعنی لیزر تخلیه $SD-CO_2$ در جوشکاری‌های با سرعت بسیار بالا یا برش قطعات فلزی و دیگر مواد می‌باشد [۸۴].

۲-۶-۳ اصلاح و پردازش سطوح

سطوح پلیمری معمولاً بسیار نرم‌اند، به سادگی مرطوب نمی‌شوند و به سادگی به‌بهم نمی‌چسبند، قابل رنگ گرفتن نیستند و نیز به سادگی لایه نشانی نمی‌شوند. وجود این ویژگی‌ها در ساختار پلیمر، کار کردن با انواع مواد با ترکیبات پلیمری را مشکل می‌کند و قبل از استفاده نیازمند اصلاح می‌گردند. این اصلاح با اعمال پلاسمای سرد بر روی این مواد امکان‌پذیر است. در واقع با اعمال تخلیه‌ی DBD بر روی سطح این مواد می‌توان آن‌ها را از لحاظ شیمیایی فعال کرد و خواصی چون چسبندگی و جذب رطوبت را در آن‌ها تقویت نمود. در برخی کارخانه‌ها تولید پارچه با ترکیبات پلیمری، قبل از پاشیدن رنگ بر روی آن‌ها، از این روش استفاده می‌کنند [۸۵].

۲-۶-۴ کنترل آلودگی

یکی دیگر از مهم‌ترین کاربردهای تخلیه DBD که اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، تخریب ترکیبات سمی و کنترل آلودگی است. در حال حاضر تحقیقات گسترده‌ای بر روی تجزیه نیتروژن و اکسید گوگرد موجود در گازهای جاری و کارخانه‌ای در حال انجام است و نکته‌ی جالب اینکه بسیاری از ترکیبات شامل مواد آلی خطرناک تحت تأثیر گونه‌های برانگیخته، رادیکال‌های آزاد، الکترون‌ها، یون‌ها و حتی فوتون‌های UV قرار گرفته و نابود می‌شوند [۸۶].

۲-۶-۵ کاربردهای پزشکی و زیستی

یکی از مهم‌ترین کاربردهای پلاسمای سرد، کاربرد آن در پزشکی و آزمایش‌های زیستی می‌باشد [۱۸].

۲-۶-۵-۱ انعقاد خون

یکی از کاربردهای تخلیه سد دی‌الکتریک در پزشکی، منعقد کردن خون و کاهش زمان انعقاد خون است. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که قطره خونی که از یک زخم سالم گرفته شده است، حدوداً در مدت ۱۵ دقیقه منعقد می‌شود. اما قطره خونی که مدت ۱۵ ثانیه تحت اثر این نوع تخلیه قرار گرفته در کمتر از یک دقیقه منعقد می‌گردد، درحالی‌که هیچ صدمه‌ای به بافت اطراف زخم وارد نخواهد شد. نکته‌ی قابل توجه این است که این نوع پلازما هم‌زمان با انعقاد خون، خاصیت میکروب‌زدایی زخم را نیز از خود نشان می‌دهد که از اهمیت بسزایی برخوردار است. شایان ذکر است که پیشرفت این زمینه از تخلیه سد دی‌الکتریک و تولید منبع قابل حمل آن می‌تواند کمک شایانی برای بیماران هموفیلی که مشکل انعقاد خون دارند را به همراه داشته باشد [۸۷].

۲-۶-۵-۲ باکتری‌زدایی سطوح

آتش به‌عنوان نوعی پلازما از هزاران سال پیش به‌عنوان روش باکتری‌زدایی استفاده می‌شد. باکتری‌زدایی از بافت زنده مثل انسان، حیوانات و گیاهان مورد توجه پزشکی است [۳۴]. باکتری‌زدایی پلاسمایی چون در ابعاد اتمی مولکولی کار می‌کند، موجب می‌شود که تمام سطوح شامل قسمت‌های

داخلی ابزارهای پزشکی (کاتر، سوزن، سرنگ و غیره) و قسمت‌های دیگر که هنگام استفاده از مایعات باکتری زدا در دسترس نیستند، نیز استریل شوند. این روش مزایای زیادی نسبت به روش‌های مرسوم در باکتری زدایی مانند استفاده از حرارت، محلول شیمیایی، گاز یا تابش دارد که موجب آسیب‌های حرارتی، شیمیایی و تابشی به اشیای بی‌جان و زنده می‌شوند [۸۸].

۲-۶-۵-۳ باکتری زدایی مواد غیر زنده

باکتری زدایی تجهیزات پزشکی در بیمارستان‌ها اهمیت بسیار زیادی دارد. زدودن باکتری‌ها از روی ابزارهای جراحی کار دشواری است و روش استریل متداول می‌تواند آسیب‌های اساسی به ابزار وارد کند. روش پلاسمایی در این مورد نیز مؤثر بوده است. در اینجا انتخاب پلاسمای مناسب اهمیت بسزایی دارد. زیرا بعضی از شرایط باکتری زدا می‌تواند به سطح پلیمر آسیب و باعث تخریب پیوندها شود [۳۳].

۲-۶-۵-۴ باکتری زدایی بافت زنده

استفاده‌ی پلاسمای سرد بر روی بافت حیوانی و انسانی گزارش‌هایی شده است. این روش بدون تخریب بافت پوست صورت می‌گیرد [۸۹].

۲-۶-۵-۵ درمان زخم و بیماری‌های پوستی

تحقیقات نشان می‌دهد که پلاسما می‌تواند عوامل عفونت‌زا را در زخم از بین ببرد، بدون اینکه آسیبی به بافت‌های سالم پوست بدن وارد کند. نکته‌ی قابل توجه این است که باکتری‌های عفونی بعد از مدتی می‌توانند نسبت به آنتی‌بیوتیک‌ها مقاوم شوند و دیگر به درمان با دارو پاسخ ندهند، اما این مشکل در درمان زخم با پلاسما به علت تخریب دیواره‌ی سلول وجود نخواهد داشت [۳۰]. همچنین بر اساس گزارش‌ها، پلاسما نمی‌تواند آسیبی به ساختار DNA در سلول‌های یوکاریوت^۱ برساند و اثرات سمی بر بافت ندارد [۸۷ و ۱۹].

^۱ Eukaryote

۲-۶-۵-۶ درمان سلول‌های سرطانی

امروزه یکی از مهم‌ترین مشکلات بشر، مسئله‌ی سلامت در حوزه‌ی سلولی است. سرطان از بزرگ‌ترین معضلات پیش روی بشر است. متأسفانه درمان قطعی دارای معایب فراوان می‌باشد. شیمی‌درمانی، پرتودرمانی و جراحی از انواع این نوع درمان‌ها می‌باشند. مشکلاتی مانند آسیب رساندن به بافت سالم، عدم ارائه‌ی یک درمان کامل موفق، زمان درمان بالا و هزینه‌های گزاف این روش‌های درمانی سبب شده است که این روش‌ها درمان قطعی و کامل برای بیماری سرطان نباشد [۲۰]. در سال‌های اخیر، پلاسما به عنوان روشی نوین برای درمان سرطان می‌باشد. مطالعات نشان داده شده است که پلاسما سلول‌های سرطانی را به روش مرگ برنامه‌ریزی^۱ شده از بین می‌برد. این نوع مرگ برنامه‌ریزی شده سبب شده که پلاسما بر روی سلول‌های سرطانی تأثیر داشته باشد، بدون آنکه بر روی سلول‌های سالم اثر گذارد [۹۰].

۲-۶-۵-۷ پلاسما در دندانپزشکی

روش‌هایی چون سابیدن مکانیکی، روش‌های لیزری و استفاده از مواد شیمیایی برای تمیز کردن و باکتری زدایی بافت در حفره‌ی دندانی و ریشه‌ها استفاده می‌شود [۳۱]. هرچند اغلب این روش‌ها معایب و عوارض جانبی ناخواسته از جمله حرارت و تخریب بافت‌های سالم دارند. اعمال پلاسما بر مینای دندان، بدون درد و با حرارت قابل تحمل است. علاوه بر این پلاسما غیر سمی است و به مینای دندان هم آسیب نمی‌رساند [۲۲]. به علت باریک بودن و شکل هندسی ریشه‌ی دندان، هر ابزار پلاسمایی مؤثر نیست. بنابراین به‌منظور داشتن بازده کافی در کشتن باکتری لازم است که ابزار به‌گونه‌ای طراحی شده باشد که پلاسما داخل کانال تشکیل شود [۳۲]. از جمله ابزارهای طراحی شده در این زمینه، سوزن پلاسمایی^۲ با قطر نازل ۵ میلی‌متر است که در از بین بردن باکتری استرپتوکوکوس موتانس^۳، عامل عفونت‌های دندانی، مؤثر است [۹۱].

¹ Apoptosis

² Plasma needle

³ Streptococcus mutans

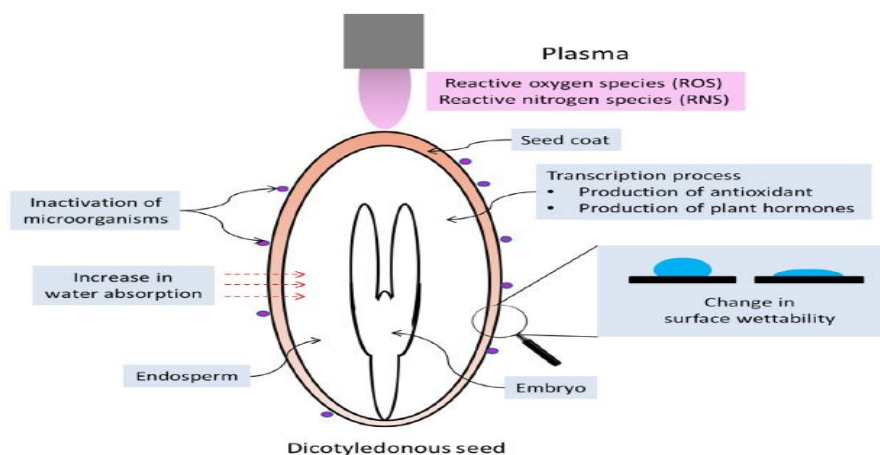
۲-۷ تأثیر تابش پلاسما بر خصوصیات جوانه‌زنی و رشد گیاه

مطالعات نشان داده است که پلاسما ی سرد در افزایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گیاه یولاف نقش مثبت داشت در حالی که تأثیر معنی‌داری روی ساقه‌چه و ریشه‌چه گندم نشان نداد [۵۵،۵۷].

لینگ و همکاران (۲۰۱۴)، نشان دادند که شاخص جوانه‌زنی بذور سویا تحت تأثیر پلاسما ی سرد ۱۶ تا ۶۶ درصد افزایش داشت [۵۵]. همچنین همین محققین ذکر کردند که جذب آب بذر ۱۴ درصد در بذور تیمار شده افزایش داشت و در نهایت وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه سویا به ترتیب ۲۱/۹ و ۲۷/۵ نسبت به بذور تیمار نشده افزایش نشان داد. تیمار پلاسما به طور قابل توجهی می‌تواند افزایش عملکرد محصولات را سبب شود. جیانگ و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که در تیمار پلاسما ی سرد ۸۰ وات به طور قابل توجهی عملکرد گندم افزایش یافته است [۶۱]. همچنین سلوک و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کرده‌اند که با پلاسما ی سرد ویگور دانه حبوبات به طور قابل توجهی افزایش یافته است [۵۲]. فیلاتوا و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که زمان قرار دادن بذر در معرض پلاسما ی سرد میتواند تأثیر معنی‌داری بر ویژگیهای جوانه‌زنی بذور داشته باشد، بطوریکه همین محققین اعلام کردند که از بین پنج زمان جوانه‌زنی ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ دقیقه، مدت زمان ۵ تا ۱۰ دقیقه از سایر زمانها تأثیر بیشتری بر جوانه‌زنی بذور گیاه *Lupinus angustifolius* داشت [۹۲]. پلاسما ی سرد با تحریک مکانیسم‌های داخل سلول منجر به بهبود کیفیت کاشت شده است، اما پلاسما ی بیشتر از ۱۵ دقیقه برای همه‌ی گونه‌های گیاهی مورد آزمایش (سویا، شبدر شیرین) سبب سرکوب جوانه‌زنی شد بنابراین مدت زمان تابش پلاسما برای جوانه‌زنی بذور حائز اهمیت است [۹۳]. سرا و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که جوانه‌زنی و رشد دانه تحت تأثیر زمان و نوع پلاسما قرار می‌گیرد [۵۷]. پردازش مواد با دمای پایین پلاسما ی غیرتعادلی یکی از مهمترین راه‌های افزایش بازده آنهاست. در سالهای اخیر استفاده از فناوری پلاسما در کشاورزی به چشم می‌خورد. پلاسما سبب رشد سریعتر، افزایش در جوانه‌زنی بذر و سرکوب توسعه پاتوژن‌های تهاجمی گیاهی که عامل بیماری در گیاهان در حال رشد است،

می‌شود [۶۶]. همچنین با کاهش مقدار مواد سمی و نیترات در دانه‌ها سبب بهبود مصرف آنها می‌گردد [۶۴].

ذخایر بذر عوامل اصلی موفقیت در طول دوره رشد گیاه چه می‌باشند [۹۴]. پلاسما باعث افزایش ذخایر بذر و افزایش راندمان استفاده از ذخایر بذر می‌گردد. افزایش توانایی جذب آب با افزایش توانایی جذب مواد غذایی همراه است که باعث افزایش رشد گیاه چه می‌شود [۵۵]. پژوهشگران گزارش دادند که پلاسما باعث افزایش قند محلول و مقدار پروتئین می‌شود [۷۰،۶۲] بین و همکاران (۲۰۰۵) افزایش تجمع قند محلول و مقدار پروتئین به وسیله‌ی پلاسما را نتیجه افزایش فعالیت‌های آنزیم‌هایی مانند آمیلاز و پروتئاز می‌دانند [۵۸]. پلاسما از طریق اصلاح پوسته بذر [۵۱] و فعال‌سازی سلول‌های گیاهی [۹۵] باعث افزایش رشد گیاه می‌گردد. لینگ و همکاران (۲۰۱۵) اظهار داشتند پلاسمای سرد باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی حتی در شرایط خشک‌سالی، از طریق افزایش توانایی جذب دانه شده است [۶۰]. سادهو و همکاران (۲۰۱۷) گزارش دادند پلاسما باعث افزایش ۳۶/۲ درصدی سرعت جوانه‌زنی و افزایش ۲۰ درصدی طول ریشه و افزایش ۱۰۲ درصدی هدایت الکتریکی پوسته بذر در گیاه ماش نسبت به نمونه شاهد گردید [۷۰]. افزایش هدایت الکتریکی پوسته بذر ممکن است به علت آسیب سلولی ناشی از بمباران یونی که در نتیجه اعمال پلاسما اتفاق می‌افتد، باشد [۶۵]. تاتی پاتا (۲۰۰۹) گزارش دادند افزایش هدایت الکتریکی به علت از دست دادن تراوایی انتخابی سلول یا از بین رفتن یکپارچگی غشا می‌باشد [۹۶]. افزایش فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز (آنزیم جوانه‌زنی) به میزان ۱۲۶ درصد با پلاسما دهی با برنج قهوه‌ای گزارش شده است [۹۷]. کاربرد پلاسمای سرد به مدت ۱ دقیقه باعث افزایش جوانه‌زنی بذر نخود به میزان ۸۹/۲ درصد گردید و سرعت جوانه‌زنی را به شدت افزایش داد [۷۳].



شکل ۲-۴: خلاصه ای از اثر پلاسما بر بذر

۲-۸ طیف سنجی پلاسما

طیف‌سنجی پلاسما یکی از پابرجاترین و قدیمی‌ترین ابزار تشخیصی در فیزیک نجومی و فیزیک پلاسما می‌باشد [۹۸].

طیف‌سنجی پلاسما در محدوده‌ی طیفی مرئی با یک ابزار آزمایشگاهی ساده و ارزان قابل‌دسترسی است. این روش غیر اختلالی است و حضور میدان RF، میدان مغناطیسی، پتانسیل بالا و ... هیچ مزاحمتی در ثبت طیف‌ها ایجاد نمی‌کند [۹۸]. در این روش تشخیصی سیستم آزمایشگاهی بسیار ساده بوده و فقط یک روزنه‌ی اختصاصی برای ارائه‌ی تصویری از پلاسما لازم می‌باشد. بنابراین طیف‌سنجی پلاسمایی یک روش تشخیصی آسان و ضروری در رابطه با فرایندهای پلاسما و فناوری پلاسما در پژوهش‌های اساسی می‌باشد. لازم به ذکر است که اگرچه خطوط طیفی به‌آسانی قابل‌دسترسی می‌باشند اما تفسیر آن‌ها نسبتاً پیچیده است.

در این پایان‌نامه از روش طیف‌سنجی نوری OES^۱ که مبتنی بر تحلیل نور حاصل از ذرات پلاسما شامل اتم‌های خنثی یون‌ها و مولکول‌ها می‌باشد استفاده شده است.

در این روش با برخورد نور به فیبر نوری نموداری بر اساس شدت برحسب طول‌موج به دست می‌آید درواقع می‌توان برای توصیف گونه‌های برانگیخته در هر طول‌موج از شدت نور آن استفاده کرد. در این

^۱ Optical emission spectroscopy

روش نور حاصل از جابجایی‌های مجاز الکترون بین ترازهای انرژی سنجیده می‌شود [۹۹]. در این آزمایش از طیف‌سنج مدل Avantes با دقت ۲ نانومتر استفاده می‌شود. با حذف زمینه و ثبت نمودار مشخصه‌ی فیبر و پس از بهینه کردن طیف‌های ثبت‌شده، طیف حاصل بر اساس شدت و طول موج به دست می‌آید. از بیشینه‌های نسبی طیف‌های به دست آمده می‌توان اطلاعاتی از جمله وزن آماری نوع عنصر احتمال گذار انرژی تراز بالا و پایین و سایر اطلاعات مورد نیاز را از مرجع خطوط طیفی^۱ NIST استخراج کرد [۱۰۲].

۲-۸-۱ نشر و جذب

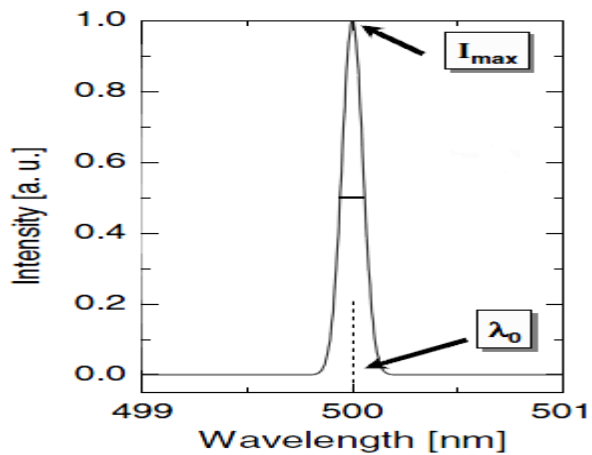
در حالت کلی طیف‌سنجی پلاسما به دو گروه تقسیم می‌شود. که این دو گروه شامل (۱) روش غیرفعال طیف‌سنجی نشری (۲) روش فعال طیف‌سنجی جذبی هست. در طیف‌سنجی نشری خود نور ساطع شده از پلاسما ثبت می‌شود. یکی از فرایندهای اساسی در این روش برانگیختگی ذرات (یون، اتم و مولکول) توسط ضربه‌ی الکترون از سطح q به سطح p و فروپاشی داخل سطح k به واسطه‌ی نشر خود به خودی، با احتمال انتقال A_{pk} است.

همبسته گی چگالی ذرات در تراز بالاتر $n(p)$ طیف نشری با چگالی ذرات در حالت پایه $n(q)$ ملموس می‌باشد. معمولاً q حالت پایه است. بنابراین چگالی حالت پایه به‌طور مستقیم توسط طیف‌سنجی جذبی مشخص می‌شود.

طیف‌سنجی جذب اتمی شامل مطالعه‌ی جذب انرژی تابشی در نواحی ماوراءبنفش و مرئی به‌وسیله‌ی اتم‌های خنثی در حالت گازی است. طیف جذبی یک عنصر در شکل گازی و اتمی آن مرکب از یک سری خطوط باریک کاملاً مشخص به وجود آمده از جهش‌های الکترونی بیرونی‌ترین الکترون‌ها است. جذب یک فوتون به‌وسیله‌ی اتم‌های پایدار برای برانگیخته شدن اتم اساس روش جذب اتمی است. تکنیک‌های جذبی نیازمند تلاش تجربی بیشتری نسبت به طیف‌سنجی نشری می‌باشند. به دلیل اینکه برخی از اصول موجود در طیف‌سنجی نشری در طیف‌سنجی جذبی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند و از آنجایی که طیف‌سنجی نشری پارامترهای متنوعی از پلاسما را در اختیار قرار می‌دهد و یک ابزار تشخیصی منفعل است، تمرکز

^۱ National institute of standards and technology

اساسی این مجموعه بر این نوع طیف‌سنجی معطوف است. شکل (۲-۵) یک طیف‌سنجی نشری خاص را برحسب محورهای شدت و طول موج نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵: خط تابش [۱۰۰].

یک خط نشری به وسیله‌ی انرژی فوتون مطرح می‌شود که این طول موج با انتقال از سطح P با انرژی E_p به سطح K با انرژی E_k متناظر است و با معادله‌ی (۲-۱) ارائه می‌شود [۹۹].

$$\lambda_0 = \frac{hc}{(E_p - E_k)} \quad (1-2)$$

در این فرمول h ثابت پلانک و c سرعت نور است.

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳-۱ زمان و محل اجرای آزمایش

این آزمایش در سال ۱۳۹۷ در آزمایشگاه پلاسما دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود و آزمایشگاه زراعت دانشکده کشاورزی واقع در شهر بسطام انجام شد.

۳-۲ مشخصات طرح آزمایشی

این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۷ در دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. فاکتور اول مدت زمان پرتودهی بذور کلزا با پلاسما سرد در شش سطح شامل: صفر (شاهد)، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ دقیقه و فاکتور دوم ولتاژ مصرفی در سه سطح ۳، ۵ و ۷ کیلوولت بود. پیش تیمار بذور با پلاسما سرد براساس تیمارهای مورد نظر در آزمایشگاه پلاسما دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد، که از دستگاه DBD شرکت پلاسما طب و فرکانس ۱۰۰۰۰ Hz استفاده شد. سپس بخشی از بذور پیش تیمار شده با پلاسما برای بررسی های لازم مورد آنالیزهای آزمایشگاهی قرار خواهد گرفت و بخشی از بذور کلزا جهت انجام آزمایش جوانه زنی در پتری دیش هایی با قطر دهانه ۸ سانتی متر روی کاغذ صافی واتمن شماره یک قرار داده شد. سپس پتری دیش ها به داخل ژرمیناتور با دمای متناوب ۲۵ و ۱۸ درجه سانتی گراد بترتیب در روشنایی و تاریکی قرار گرفت.



شکل ۳-۱: دستگاه تخلیه سد دی الکتریک

۳-۳ ارزیابی صفات مربوط به جوانه زنی

برای محاسبه درصد جوانه زنی از روش معمول نسبت بذر های جوانه زده به کل بذر (رابطه ۳-۱) استفاده گردید [۱۰۹].

$$G_p = 100 \cdot (N_G / N_T) \quad (۳-۱)$$

که در این معادله G_p درصد جوانه زنی، N_G تعداد کل بذر های جوانه زده و N_T تعداد کل بذر ها می باشد.

برای محاسبه سرعت جوانه زنی شمارش روزانه بذور جوانه زده در ساعت معین به مدت ۵روز صورت گرفت. بذوری جوانه زده محسوب شدند که طول ریشه چه آنها در حدود دو میلی متر بودند. سرعت جوانه زنی نیز از طریق معادله ماگنر (رابطه ۳-۲) محاسبه شد [۱۰۹].

$$R_s = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{D_i} \quad (۳-۲)$$

که در آن، R_s سرعت جوانه زنی، S_i تعداد بذرهای جوانه زده در هر شمارش، D_i تعداد روز شمارش تا روز n ام و n دفعات شمارش می باشد.

بعد از گذشت ۵ روز با انتخاب ۵ نمونه از پتری دیش صفاتی مانند طول ریشه چه، طول ساقه چه، وزن خشک ریشه چه، وزن خشک ساقه چه اندازه گیری شد. نمونه ها در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد در دستگاه آون به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند و توزین نمونه ها به وسیله ی ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم صورت گرفت. همچنین برای اندازه گیری طول ساقه چه و ریشه چه از کاغذ میلی متری استفاده شد.

۳-۴ صفات فیزیولوژیکی:

۳-۴-۱ شاخص پایداری غشاء پلاسمایی برگ :

برای تعیین شاخص پایداری غشاء پلاسمایی اقدام به نمونه گیری تعدادی برگ از هر تیمار گردید ، از نمونه برگ های تهیه شده به اندازه ۰/۰۱ گرم به صورت قطعات هم اندازه جدا گردید ، سپس این قطعات به فالکن های حاوی ۱۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شد و ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم و در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد (C₁) قرار داده شدند. به همین ترتیب سری دوم فالکن ها آماده سازی گردید و این بار به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد (C₂) قرار گرفتند. پس از خنک شدن ، در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد هدایت الکتریکی آن ها توسط دستگاه Ec متر اندازه گیری شد و از طریق رابطه (۳-۳) میزان پایداری غشاء پلاسمایی محاسبه گردید [۱۱۰].

$$MSI = 1 - (C_1/C_2) \times 100 \quad (3-3)$$

MSI = شاخص پایداری غشاء پلاسمایی

C₁ = دمای ۴۰ درجه سانتی گراد

C₂ = دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد

۳-۴-۲ درصد پروتئین دانه:

برای انجام عمل هضم ۲۵۰ میلی گرم از ماده گیاهی خوب پودر شده را درون فلاسک های شیشه ای مخصوص کجدال^۱ ریخته و مقدار ۱/۵ گرم سولفات پتاسیم و ۰/۱۵ گرم سولفات مس به عنوان کاتالیزور به هر فلاسک اضافه گردید. سپس به هر فلاسک ۱۵ میلی لیتر اسید سولفوریک غلیظ افزوده شد و فلاسک ها درون اجاق مخصوص قرار داده شدند. دمای اجاق به آرامی و هر بار ۴۰ درجه سانتی گراد افزایش یافت تا به دمای ۳۸۰ درجه سانتی گراد رسید. این شیوه برای جلوگیری از جوشش و کف

¹ kjeldahl

کردن مواد درون فلاسک ها بسیار مؤثر بود. پایان عمل هضم پس از ۲ تا ۲/۵ ساعت و با تبدیل محلول سیاه رنگ درون فلاسک ها به محلولی نسبتاً زلال به رنگ سبز بسیار کم رنگ مشخص می شد. مقدار نیتروژن نمونه ها پس از سرد شدن در دمای آزمایشگاه توسط دستگاه کج‌دال مدل Vapodest 45S ساخت شرکت Gerhardt کشور آلمان سنجیده شد.

دستگاه دارای سه مخزن آب مقطر، سود سوزآور ۴۰ درصد و محلول دریافت کننده بود. محلول دریافت کننده از ترکیب ۱۰۰ میلی لیتر بروموکروزول سبز (۰/۱ گرم بروموکروزول سبز و ۱۰۰ میلی لیتر الکل) ، ۷۰ میلی لیتر متیل قرمز (۰/۱ گرم متیل قرمز در ۱۰۰ میلی لیتر الکل) و ۱۰ لیتر اسید بوریک ۱ درصد تشکیل شده بود. پس از فرار گیری فلاسک ها در دستگاه به ترتیب ۲۰ میلی لیتر آب مقطر و ۳۰ میلی لیتر سود سوز آور ۴۰ درصد به نمونه ها اضافه شده و با فشار بخار آب عمل تقطیر انجام گرفت. طی مرحله تقطیر نیتروژن موجود در نمونه به صورت گاز آمونیاک متصاعد شده و رنگ محلول حاوی نمونه به قهوه ای سوخته تبدیل میگردد. گاز آمونیاک حاصل به ظرفی حاوی محلول دریافت کننده منتقل شده و به همراه اسید بوریک بورات آمونیوم را تشکیل می دهد که معرف های موجود در محلول دریافت کننده آن را به صورت رنگ سبز نمایان می سازند. عمل تیتراسیون نیز صورت گرفت. طی این عمل بورات آمونیوم حاصل در محلول دریافت کننده توسط مقدار کافی از محلول تیترازول اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال و تا رسیدن به رنگ ارغوانی تیره تیتراژ شد. به منظور تبدیل مقدار اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال مصرف شده در تیتراژ به درصد نیتروژن نمونه و تبدیل آن به درصد پروتئین از روابط (۳-۴ و ۳-۵) استفاده شد. ضریب تبدیل برای کلزا ۶/۲۵ در نظر گرفته شد. برای محاسبه درصد پروتئین از حاصلضرب درصد نیتروژن در ضریب تبدیل پروتئین آن استفاده گردید [۱۱۱].

$$\text{وزن نمونه (گرم)} / (A \times 0.14) = \text{درصد نیتروژن نمونه} \quad (3-4)$$

$$\text{ضریب تبدیل پروتئین} \times \text{درصد نیتروژن} = \text{درصد پروتئین نمونه} \quad (3-5)$$

A = حجم اسید کلریدریک ۰/۱ مولار مصرفی بر حسب میلی لیتر

۳-۴-۳ سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز

اندازه گیری کاتالاز به روش ایبی (۱۹۸۴) انجام شد. مخلوط واکنش شامل ۲/۵ میلیلیتر بافر ۵۰ میلی مولار فسفات سدیم (pH=۷) شامل ۰/۲ میلی لیتر پراکسید هیدروژن ۱ درصد و ۰/۳ میلی لیتر عصاره استخراجی بود. سپس فعالیت آنزیم کاتالاز به صورت کاهش در جذب طی ۱ دقیقه در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر محاسبه شد. برای سنجش فعالیت کاتالاز از ضریب خاموشی ($0.043 \text{ Mm}^{-1} \text{ Cm}^{-1}$) استفاده شد [۱۱۲].

۳-۴-۴ سنجش آسکورات پراکسیداز

فعالیت آنزیم آسکورات پراکسیداز را در زمان گل دهی به روش اسدا و ناکانو (۲۰۰۰) اندازه گیری شد [۱۱۳]. یک میلی لیتر مخلوط بافر پتاسیم فسفات یک مولار (pH=7) و ۲۰ میکرولیتر آب اکسیژنه ۵ میلی مولار در حمام یخ مخلوط و بلافاصله ۰/۱ میلی لیتر عصاره آنزیمی به آن افزوده شد و در نهایت با اضافه کردن ۱۰ میکرولیتر آسورات ۱۰ میلی مولار، فعالیت آنزیم آسکورات پراکسیداز بر اساس میزان اکسید شدن آسکورات در طول موج ۲۹۰ نانومتر پس از یک دقیقه محاسبه شد، برای این منظور از ضریب خاموشی ۲/۸ میلی مول در سانتی متر بر اساس میکرومول آسورات اکسید شده در دقیقه استفاده شد.

۳-۴-۵ اندازه گیری غلظت مالون دی آلدئید (MDA)

طبق این روش ۰/۲ گرم از بافت تازه برگی توزین شد و در هاون چینی با ۵ میلی لیتر اسید تری کلرواستیک % ۰/۱ (TCA) ساییده شد. عصاره حاصل با استفاده از دستگاه سانتریفوژ به مدت ۵ دقیقه سانتریفوژ شد. به یک میلی لیتر از محلول رویی حاصل از سانتریفوژ ۴/۵ میلی لیتر محلول ۲۰% TCA که دارای ۵ گرم اسید تیوباربیتوریک (TBA) در ۱۰۰ گرم بود، اضافه شد. مخلوط

حاصل به مدت ۱۰ دقیقه با ۴۰۰۰ دور (g۱۰۰۰) سانتریفیوژ گردید. شدت جذب این محلول با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۳۲ نانومتر خوانده شد [۱۱۰].

۳-۴-۶ استخراج قندهای محلول

میزان قندهای محلول به روش تغییر داده شده اشلیگل (۱۹۸۶) اندازه گیری شد [۱۱۴]. به منظور استخراج کربوهیدرات های غیر ساختاری ۱۰۰ میلی گرم پودر برگ را به فالكون های ۱۵ میلی لیتری منتقل و به آن مقدار ۱۵ میلی لیتر اتانول ۸۰ درصد افزوده و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد در حمام آب گرم قرار داده شد. سپس فالكون های حاوی نمونه ها خارج شدند و به منظور جدا کردن فاز جامد از مایع، پس از سرد شدن فالكون ها به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. می توان به جای سانتریفیوژ، با استفاده از قیف و کاغذ صافی نمونه ها را در فالكون ۵۰ میلی لیتری صاف نمود و ۵ مرتبه با اتانول ۸۰ درصد شستشو داد و حجم را به ۴۰ میلی لیتر رسانید. فالكون ها به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند تا اتانول آن تبخیر شود. پس از تبخیر الکل، ۴۰ میلی لیتر آب مقطر به فالكون ها افزوده شد. به منظور حذف رسوبات اضافی و ترکیبات دیگر، مقدار ۵ میلی لیتر از محلول ۵ درصد سولفات روی و ۴/۷ میلی لیتر از محلول هیدروکسید باریوم ۳ درصد به آن اضافه شد، نمونه ها به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. مقدار ۲ میلی لیتر از عصاره شناور به یک فالكون ۱۵ میلی لیتری منتقل و ۱ میلی لیتر محلول ۵ درصد فنل به آن اضافه شد، سپس مقدار ۵ میلی لیتر اسید سولفوریک ۹۸ درصد به هر یک از نمونه ها افزوده شد، در صورت وجود قند رنگ نمونه به سمت رنگ گلبهی تغییر میکند. پس از ۴۵ دقیقه و با تثبیت رنگ مورد نظر، میزان جذب نمونه با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۸۵ نانومتر قرائت شد.

۳-۴-۷ استخراج عصاره آنزیم آلفا آمیلاز

جهت استخراج عصاره از بذره‌های کلزا پس از طی ۲۴ ساعت از جوانه زنی استفاده گردید. ۰/۲ گرم از بذر جوانه زده با ۲ میلیلیتر بافر استخراج شامل استات سدیم ۵۰ میلی مولار و کلرید سدیم ۲۰ میلی مولار با $\text{pH} = 4/8$ هموزن گردید. سپس عصاره حاصل با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه و بمدت ۱۰ دقیقه و دمای ۴ درجه سانتی گراد سانتریفیوژ گردید. اندازه گیری فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز مخلوط واکنش شامل ۱ میلی لیتر از عصاره استخراجی، ۰/۵ میلیتر نشاسته ۱ درصد و ۱ میلیتر بافر استخراج بود که با ورتکس باهم مخلوط شدند و سپس در بن ماری به مدت ۱۵ دقیقه و در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد انکوبه گردید. واکنش با افزودن ۰/۵ میلی لیتر معرف ۳و۵ دی نیتروسالیسیلیک اسید متوقف شد. سپس مخلوط حاصل بمدت ۵ دقیقه در آب جوش قرار داده شد. سپس جذب در طول موج ۵۴۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر (Unic chines) قرائت گردید [۱۱۵].

۳-۴-۸ محتوی نسبی آب برگ

به منظور تعیین مقدار آب نسبی برگ، از هر پتری دیش سه بوته به طور تصادفی انتخاب شد. پس از توزین با ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم (وزن تر)، به مدت ۲۴ ساعت درون آب مقطر و در یخچال با دمای چهار درجه سانتی گراد قرار داده شدند [۱۱۶]. سپس برگ‌ها از آب مقطر خارج و آب روی آن‌ها با دستمال گرفته و خشک گردیدند و دوباره توزین شدند (وزن اشباع)، در نهایت نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند و وزن خشک آن‌ها اندازه گیری گردید (وزن خشک)، مقدار نسبی آب برگ با استفاده از رابطه (۳-۴) محاسبه شد.

$$(۳-۶) \quad 100 \times \{(\text{وزن خشک} - \text{وزن اشباع}) / (\text{وزن خشک} - \text{وزن تر})\} = \text{محتوی نسبی آب برگ}$$

۳-۵ اندازه‌گیری دما چگالی الکترون توسط طیف‌سنجی نور نشری (OES)

طیف‌سنجی نور نشری یک روش اساسی تشخیصی پلاسما است که برای پلاسماهای مختلف (فشار بالا و کم و بدون محدودیت دما) عمومیت دارد. این تکنیک مبتنی بر اندازه‌گیری تابش‌های نوری طیف-سنجی ساطع شده از پلاسما می‌باشد که خواصی از پلاسما را در محیط‌های حاوی اتم‌ها، مولکول‌ها و ... نشان می‌دهد [۱۰۱]. در روش نور نشری (OES) برانگیختگی ضربه‌ای الکترون یک بخش کوچکی از گونه‌ها را در حالت‌های الکترونیکی بالاتر قرار می‌دهد. سپس فروپاشی اتفاق می‌افتد و نوری ساطع می‌شود [۹۹]. تکنیک‌های مبتنی بر OES غیرتهاجمی و غیر اختلالی بوده و نیازمند تجهیزات طیف-سنجی در حد متوسط می‌باشد. اندازه‌گیری‌های حاصل از این روش اغلب بسیار سریع است. تکنیک-های تشخیصی بکار برنده‌ی OES بر پایه‌ی ارتباط بین نسبت‌های شدت خطوط انتقالی بین تئوری و تجربی بنا می‌شود. شدت‌های خطوط انتقالی تئوری و نسبت‌های آن توسط مدل‌های جمعیتی قابل‌دسترسی است. چگالی جمعیتی حالت‌های برانگیخته تابعی از پارامترهای پلاسما نظیر دمای الکترون و چگالی الکترون می‌باشد. بنابراین دمای الکترونی و چگالی الکترونی را می‌توان از مطابقت بین مدل‌های تئوری و نسبت شدت خطوط اندازه‌گیری شده‌ی تجربی، تعیین کرد.

به‌طور کلی شدت تابشی از پلاسما به‌وسیله‌ی معادله‌ی (۳-۷) به دست می‌آید:

$$I_{ki} = E_{ki} N_k A_{ki} (W / cm^3) \quad (7-3)$$

در این معادله E_{ki} تفاوت انرژی بین حالت‌های انرژی E_k و E_i ($E_k > E_i$)، A_{ik} احتمال انتقال و N_k چگالی جمعیتی سطح بالاتر انرژی K می‌باشد.

چگالی الکترونی از رابطه (۳-۸) بدست می‌آید [۱۰۲]:

$$N_e \geq 1.6 \times 10^{12} T^{\frac{1}{2}} (\Delta E)^3 cm^3 \quad (8-3)$$

در این معادله N_e چگالی الکترون، T دمای پلاسما و ΔE تفاوت انرژی دو تراز می‌باشد.

برای اندازه گیری دما از روش نسبت استفاده می‌کنیم. ساده ترین روش در تعیین درجه حرارت با در نظر گرفتن نسبت شدت دو خط طیفی است. توجه داشته باشید که درجه حرارت تعیین شده از این روش به دمای تحریک اشاره دارد به این ترتیب اگر شرایط LTE نگه داشته شود، درجه حرارت سپس به عنوان دمای الکترون شناخته می‌شود [۱۰۳].

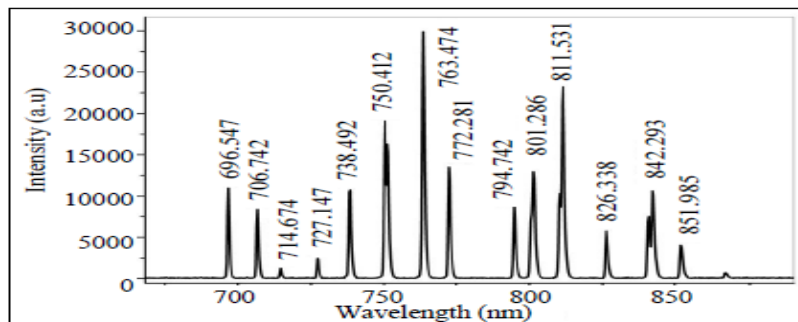
$$I_{ij} = \frac{hcA_{ij}g_j n}{\lambda_{ij}U(T)} e^{\left(\frac{E_j}{kT}\right)} \quad (9-3)$$

جایی که I_{ij} و λ_{ij} طول موج و شدت مربوط به انتقال از تراز i به تراز j هستند، h ثابت پلانک، c سرعت نور، n چگالی ذرات نشر شده، $U(T)$ تابع پارش، A_{ij} احتمال انتقال بین دو سطح i و j ، k ثابت بولتزمن، T دمای حالت برانگیخته، g_i وزن آماری سطح انرژی بالاتر و E_j انرژی سطح بالاتر با واحد ev است.

بعد، با در نظر گرفتن نسبت شدت دو خط طیفی و مرحله یونیزاسیون از همان گونه، ثابت‌ها از معادله حذف شده و رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{g_1 A_1 \lambda_2}{g_2 A_2 \lambda_1} e^{\left[-\left(\frac{E_1-E_2}{kT}\right)\right]} \quad (10-3)$$

برای مثال اگر طیف زیر را داشته باشیم:



شکل ۳- ۲: خطوط طیفی تخلیه تابان آرگون

پیک های طیف شناسایی شده و داده های مربوطه از سایت NIST استخراج شده اند که در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۳-۱: داده های طیف سنجی مربوط به پیک های آرگون

Wavelength λ / nm	Transitions	Statistica l Weight g_k	Transition Probability A / s^{-1}	Upper level energy E_k / cm^{-1}
675.327	$3s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})4d^2[3/2]o \rightarrow s23p5(^2P^{\circ}_{3/2})4p^2[1/2]$	5	1.93×10^6	118 906.6110
687.207	$3s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})4d^2[1/2]o \rightarrow s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})4p^2[1/2]$	3	2.78×10^6	118 651.3950
703.060	$3s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})6s^2[3/2]o \rightarrow s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})4p^2[5/2]$	5	2.67×10^6	119 683.0821
811.531	$3s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})4p^2[5/2] \rightarrow s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})4s^2[3/2]o$	7	3.31×10^7	105 462.7596
912.208	$3s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})4p^2[1/2] \rightarrow s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})4s^2[3/2]o$	3	1.89×10^7	104 102.0990
922.495	$3s^23p^5(^2P^{\circ}_{3/2})4p^2[3/2] \rightarrow s^23p^5(^2P^{\circ}_{1/2})4s^2[1/2]o$	5	5.03×10^6	106 237.5518

از جدول بالا، خطوط ۹۱۲،۲۰۸ نانومتر و ۷۰۳،۰۶۰ نانومتر انتخاب می شوند زیرا این خطوط دارای بیشترین تفاوت در انرژی سطح بالایی خود هستند. با استفاده از معادله (۳-۱۰) خواهیم داشت:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{g_1}{g_2} \frac{A_1}{A_2} \frac{\lambda_2}{\lambda_1} e^{\left[-\left(\frac{E_1-E_2}{KT}\right)\right]}$$

$$\frac{149}{5883} = \frac{5}{3} \frac{(2.67 \times 10^6)}{(1.89 \times 10^7)} \frac{(912.208 \times 10^{-9})}{(703.060 \times 10^{-9})} e^{\left[-\left(\frac{14.840-12.908}{KT}\right)\right]}$$

$$T = 0.776eVor904K$$

۳-۶ تجزیه و تحلیل داده ها

تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار MSTAT-C و مقایسه ی میانگین ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. رسم شکل ها نیز توسط نرم افزار Excel انجام شد و طیف ها با نرم افزار Avantes رسم شد.

فصل چہارم

نتایج و بحث

۴-۱ دمای پلاسما:

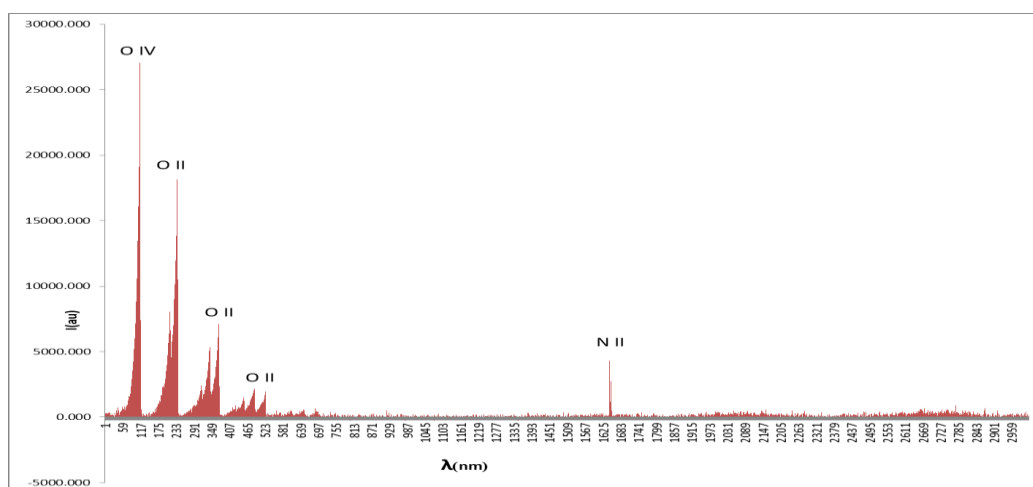
پس از استخراج اطلاعات طیفی از سایت NIST جدول ۴-۱ و قرار دادن این اطلاعات در معادله ۳-۱۰، دمای پلاسما در ولتاژهای سه، پنج و هفت کیلو ولت به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۸۵ و ۱/۱۸ الکترون ولت بدست آمد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش ولتاژ، دمای پلاسما نیز افزایش یافت. در همین راستا گزارش شده است که سرعت فرایندهای بیوشیمیایی در گیاهان با افزایش دما تا حدودی افزایش می یابد اما در دماهای بالا سرعت این فرایندها کاهش پیدا می کند. در آزمایش ما نیز در محدوده ولتاژ مورد استفاده با افزایش دمای پلاسما اکثر صفات مورد بررسی افزایش نشان داد. در همین ارتباط فیلاتوا و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که در زمان بالای ۱۵ دقیقه پلاسما دهی، جوانه زنی چند نوع گیاه کاهش نشان داد [۹۲]. نتایج نشان داد که طیف انتشار نوری در ولتاژهای استفاده شده متفاوت بود. گونه های شناسایی شده در طیف شامل مولکول های طبیعی نیتروژن (N_2) و گونه های اکسیژن (OII، OIV، OIII) بودند. همچنین نتایج نشان داد که در طیف های انتشار نوری، با افزایش ولتاژ شدت (I) پیک های مربوط به اکسیژن و نیتروژن افزایش یافت. فیلاتوا و همکاران (۲۰۱۴) نیز گزارش کردند که N_2 تولید شده در اثر پلاسما، نقش مهمی در تشدید فرآیند های بیولوژیکی در بذور دارد. بنابراین در آزمایش ما تغییرات صفاتی مانند: طول ریشه، محتوی قند محلول، درصد پروتئین، میزان مالون دی آلیئید، آسکوربات پر اکسیداز می تواند تحت تاثیر نیتروژن مولکولی تولید شده در اثر پلاسما ایجاد شده باشد. همچنین، گزارش شده است که پلاسما با تولید مولکول های اکسیژن باعث تسریع فرآیند اکسیداسیون ترکیبات شیمیایی موجود در پوسته های بذر شده و بدین طریق نقش مهمی در تحریک فرآیندهای بیوشیمیایی موثر در جوانه زنی ایفا می کند [۱۳۰]. پیک های حاصل از طیف ها مشخص کننده گونه های ROS^1 و RNS^2 در شکل های ۴-۱، ۴-۲ و ۴-۳ نشان داده شده است.

¹ Reactive oxygen species

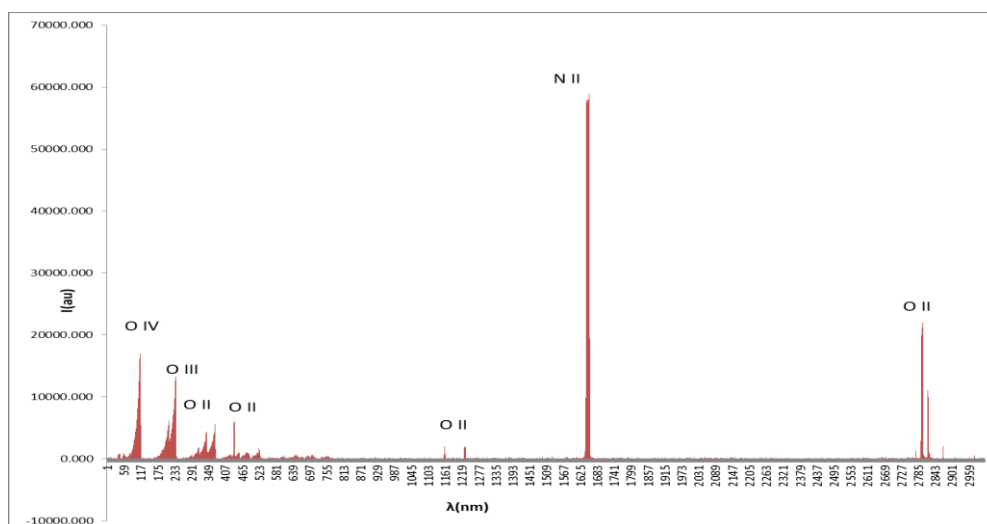
² Reactive nitrogen species

جدول ۴-۱: داده های مربوط به پیک های OII

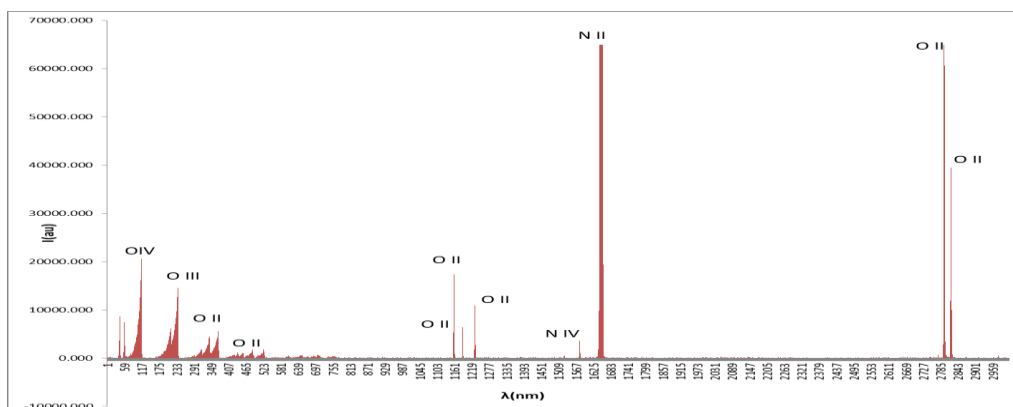
Wavelength λ /nm	$g_k A_{ki}$ (s^{-1})	Upper Level Energy E_k /ev
357.3763	2.01×10^5	34.217
380.2984	1.36×10^8	29.820
391.2117	5.64×10^7	28.829
399.2757	5.08×10^5	28.941
515.247	3.57×10^6	48.874
520.6651	1.33×10^8	28.941
765.6779	4.60×10^6	30.471



شکل ۴-۱: طیف نشری DBD در 3Kv



شکل ۴-۲: طیف نشری DBD در 5Kv



شکل ۴-۳: طیف نشری DBD در 7Kv

۴-۲ جوانه زنی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که سرعت و درصد جوانه‌زنی تحت تاثیر تیمارهای زمان و ولتاژ یا اثر متقابل آنها قرار نگرفت (جدول ۴-۲). جوانه زنی سریع یکنواخت و کامل باعث سبز شدن مطلوب و رشد اولیه ی سریع گیاه می شود. رشد اولیه مطلوب سبب دریافت بیشتر تشعشع خورشیدی و افزایش عملکرد می‌گردد [۱۱۷]. بعد از جذب آب توسط بذر و همزمان با آن یکسری از هورمون‌ها و تعدادی از آنزیم‌های مهم از جمله لیپازها و پروتئازها و آمیلاز درون بذر تولید شده که منجر به تجزیه مواد غذایی اندوخته در بذر از جمله نشاسته و انحلال آنها در آب می شوند که از این طریق انرژی لازم برای خروج ریشه چه و ساقه چه و رشد آن‌ها فراهم می شود. در پژوهشی با تابش پلاسما ی کرونا بر بذر کلزا در زمان یک دقیقه اثرات مثبتی بر جوانه زنی مشاهده شد اما با افزایش زمان تا سه دقیقه، کاهش چشمگیر سرعت جوانه زنی مشاهده شد [۱۳۶]. مشابه با نتایج آزمایش ما در پژوهشی گزارش شد که جوانه زنی کلزا تحت تابش پلاسما تغییری نکرد، همچنین گزارش شده است که سرعت جوانه زنی گندم نیز تحت تاثیر پلاسما ی سرد تغییر اندکی داشته است و اما در آزمایش دیگری جوانه زنی سویا ۱۴/۶۶ تحت تاثیر پلاسما افزایش یافته است [۱۲۵]. به نظر می‌رسد که پارامتر رشد و جوانه زنی به مدت زمان تحت تابش پلاسما و نوع تخلیه پلاسما بستگی دارد و هر چه زمان کوتاهتر باشد اثرات مثبتی در جوانه زنی خواهد داشت [۱۲۶]. فرسایش سطح پوسته بذر ناشی از پلاسما می تواند منجر به

افزایش تعداد بذرهای جوانه زده، جوانه زنی سریع و بهبود وضعیت ریشه زنی از طریق افزایش سطح انرژی و ویژگی های آبدوستی آن شود [۱۲۵]. جوانه زنی بذر و بهبود رشد گیاهچه با تیمار پلاسمای سرد از طریق بهبود رطوبت دانه، فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان، قند محلول و پروتئین و کاهش غلظت پراکسیداسیون لیپیدی بود [۱۳۷]. در گزارشی تیمار های پلاسما فلوتور و کربن باعث مهار جوانه زنی بذر ذرت و لوبیا می شود که با اثر بر پوشش بذر باعث از بین رفتن خاصیت هیدروفیلی و کاهش جذب آب می شود [۵۵]. تحریک یا مهار جوانه زنی و رشد زود هنگام بذر مرتبط با گونه گیاهی، زمان انتشار پلاسما و نوع تخلیه پلاسما است [۱۱۹]. تابش پلاسما بر جوانه زنی جو تاثیری نداشت [۵۷]. در پژوهشی تحت تابش پلاسمای انواع بذور تحت زمان بالای ۱۵ دقیقه مانع جوانه زنی شد [۹۲]. در راستای نتایج پژوهش ما تیمار پلاسمای سرد با سطوح انرژی بالاتر یا پایین تر تاثیری بر جوانه زنی سویا نداشت [۵۵] و این با نتایج ما مبنی بر عدم تاثیر ولتاژ بر جوانه زنی همخوانی دارد.



شکل ۴-۴: بذر جوانه زده کلزا

جدول ۴-۲: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر درصد جوانه زنی

میانگین مربعات درصد جوانه زنی	درجه آزادی	منابع تغییر
۲۰۱/۴۰۷ ^{NS}	۲	تکرار
۴۴/۵۱۹ ^{NS}	۲	ولتاژ
۱۱۸/۸۳۰ ^{NS}	۵	زمان
۳۲/۴۳۰ ^{NS}	۱۰	ولتاژ×زمان
۴۸/۳۰۹	۳۴	خطا
۹/۰۴		ضریب تغییرات(درصد)

NS عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

۴-۳ طول ریشه چه

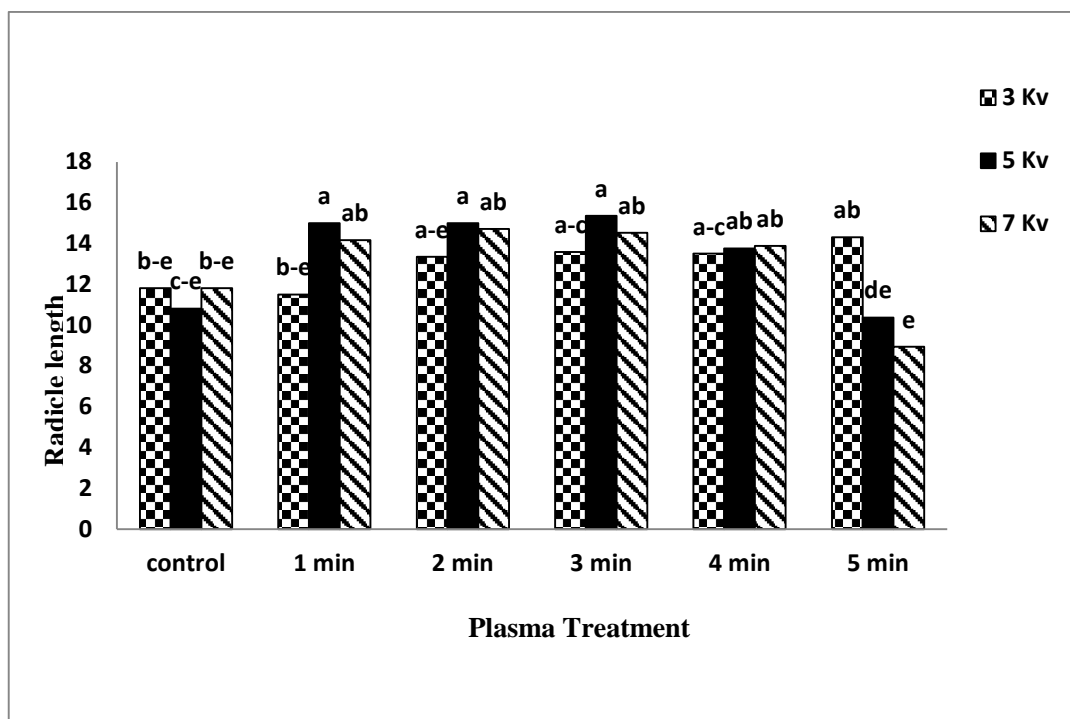
نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که طول ریشه چه گیاه تحت تاثیر تیمار زمان و اثر متقابل زمان-ولتاژ در سطح یک درصد معنی دار شد(جدول ۴-۳). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل زمان-ولتاژ نشان داد (شکل ۴-۵) که بیشترین طول ریشه چه تحت تاثیر زمان پلاسمادهی سه دقیقه در ولتاژ پنج کیلو ولت بدست اگر چه این تیمار با تیمارهای یک، دو و چهار دقیقه در ولتاژ پنج کیلو ولت و یک، دو، سه و چهار دقیقه در ولتاژ هفت کیلو ولت و نیز با زمان دو، سه، چهار و پنج دقیقه در ولتاژ سه کیلو ولت در یک سطح آماری بودند و بین آنها تفاوت معنی داری وجود نداشت. نتایج نشان داد که زمان سه دقیقه در ولتاژ پنج کیلو ولت طول ریشه چه را ۳۵ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. کمترین طول ریشه چه تحت کاربرد زمان پنج دقیقه و ولتاژ هفت کیلو ولت بود که با شاهد، کاربرد زمان یک دقیقه و ولتاژ سه کیلو ولت، کاربرد دو دقیقه و ولتاژ سه کیلو ولت، کاربرد زمان پنج دقیقه و ولتاژ پنج و هفت کیلو ولت در یک گروه آماری از نظر معنی داری قرار گرفتند. به طور کلی می توان گفت در زمان پنج دقیقه و ولتاژهای بالاتر تاثیر بر رشد ریشه چه نداشت. در سایر مطالعات گزارش شده است که ترک های عمیق روی سطح پوشش دانه پس از تیمار پلاسمما بوجود می آید [۱۳۶]. همچنین گزارش شده است که فرسایش سطح ناشی از پلاسمما می تواند منجر به افزایش تعداد بذره های جوانه زده، جوانه زنی سریع و بهبود وضعیت ریشه زنی به علت افزایش سطح انرژی و ویژگی

های آبدوستی آن شود. تحریک یا مهار جوانه زنی و رشد زودهنگام بذر بستگی به گونه گیاهی، زمان انتشار پلاسما و نوع تخلیه پلاسما دارد [۱۱۹]. ریشه چه به سبب آنکه گیاه را در ارتباط مستقیم با خاک قرار می دهد و جذب آب و املاح را در ابتدای زندگی گیاه میسر می سازد و ساقه چه به دلیل فراهم نمودن مواد مورد نیاز گیاه از ریشه چه و انجام فرآیند فتوسنتز از اهمیت ویژه ای برخوردارند [۱۱۸]. به نظر می رسد افزایش طول ریشه چه در تیمار پلاسما نسبت به شاهد به دلیل افزایش نفوذ پذیری پوسته بذر در اثر پلاسما و متعاقباً افزایش سرعت جذب آب و شروع سریعتر فرآیندهای متابولیکی موثر در جوانه زنی و در نهایت رشد سریعتر ریشه چه می باشد. پژوهشگران دیگری نیز اشاره نموده اند که استفاده از امواج اولتراسونیک با تسریع فرآیندهای جوانه زنی باعث افزایش سرعت جوانه زنی و طول ریشه چه شده است. در پژوهشی محققان گزارش کرده اند که طول ریشه گیاه ذرت تحت تاثیر پلاسما تا زمان ۲/۵ دقیقه افزایش نشان داد اما در نوعی لوبیا تا زمان ۵ دقیقه کاهش طول ریشه را نشان داد [۱۳۰]. کاهش جذب آب از طریق بذر در شرایط تنش سبب کاهش ترشح هورمون ها و فعالیت آنزیم ها و در نتیجه اختلال در رشد گیاهچه (ساقه چه و ریشه چه) می شود [۱۲۱].

جدول ۴-۳: نتایج تجزیه واریانس اثر پلاسما بر طول ریشه چه

میانگین مربعات طول ریشه چه	درجه آزادی	منابع تغییر
۱/۲۳۲ ^{ns}	۲	تکرار
۱/۰۵۴ ^{ns}	۲	ولتاژ
۱۲/۳۸۹ ^{**}	۵	زمان
۱۰/۳۰۳ ^{**}	۱۰	ولتاژ×زمان
۳/۳۹۳	۳۴	خطا
۱۴/۳۲		ضریب تغییرات(درصد)

ns عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.



شکل ۴-۵: مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و ولتاژ پلاسما بر طول ریشه چه

۴-۴ طول ساقه چه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که طول ساقه چه تحت تاثیر تیمارهای زمان و ولتاژ یا اثر متقابل آنها قرار نگرفت (جدول ۴-۴). در پژوهشی پلاسما دهی به مدت ۱۵ ثانیه باعث افزایش ۱۳/۷۷ درصدی طول ساقه نسبت به شاهد گردید [۵۵]. تابش پلاسما از طریق اصلاح پوسته بذر و فعالسازی سلولهای رشدی سبب افزایش رشد گیاه می شود [۹۵ و ۵۱]. پژوهشگران نشان دادند پلاسما دهی بذر گندم با توان ۸۰ وات باعث افزایش ۲۱/۸ درصدی ارتفاع بوته نسبت به شاهد گردید [۵۴]. در پژوهشی تیمار پلاسمای سرد باعث بهبود رشد گیاهچه در گیاه خشخاش و همچنین بهبود رشد گیاهچه در گیاه گوجه فرنگی تحت تاثیر پلاسمای فشار اتمسفری اتفاق افتاد [۵۵]. همین پژوهشگران گزارش کردند که استفاده از سطح انرژی بالا تر یا پایین تر تاثیری در رشد ساقه نداشته است و این با نتایج این پژوهش مبنی بر عدم تاثیر ولتاژ بر طول ساقه همخوانی دارد زیرا این صفت تحت تاثیر عوامل ژنتیکی می باشد بنابراین می توان انتظار داشت که این صفت تحت تاثیر پلاسما قرار نگیرد.

جدول ۴-۴: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر طول ساقه چه

میانگین مربعات طول ساقه چه	درجه آزادی	منابع تغییر
۰/۰۵۷ ^{ns}	۲	تکرار
۰/۰۷۰ ^{ns}	۲	ولتاژ
۰/۲۳۲ ^{ns}	۵	زمان
۰/۱۵۵ ^{ns}	۱۰	ولتاژ×زمان
۰/۱۳۰	۳۴	خطا
۱۱/۷۶		ضریب تغییرات(درصد)

ns عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

۴-۵ وزن خشک ریشه چه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که وزن خشک ریشه چه گیاه تحت تاثیر تیمارهای ولتاژ و زمان پلاسما یا اثر متقابل آنها قرار نگرفت (جدول ۴-۵).

جدول ۴-۵: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر وزن خشک ریشه چه

میانگین مربعات وزن خشک ریشه چه	درجه آزادی	منابع تغییر
۰/۰۲۲ ^{ns}	۲	تکرار
۰/۰۰۹ ^{ns}	۲	ولتاژ
۰/۰۱۸ ^{ns}	۵	زمان
۰/۰۰۷ ^{ns}	۱۰	ولتاژ×زمان
۰/۰۰۷	۳۴	خطا
۱۵/۷۵		ضریب تغییرات(درصد)

ns عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

۴-۶ وزن خشک ساقه چه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که وزن خشک ساقه چه گیاه تحت تاثیر تیمارهای آزمایش یا اثر متقابل آنها قرار نگرفت (جدول ۴-۶). گزارش شده است که پلاسمای سرد رشد گندم و جو را بهبود بخشید و باعث افزایش وزن خشک ساقه گردید [۵۷]. همچنین لینگ و همکاران (۲۰۱۴) گزارش دادند پرتو دهی پلاسمای سرد به مدت ۱۵ ثانیه بر بذر سویا باعث افزایش وزن خشک ساقه گردید [۵۵]. تابش پلاسمای رشد ساقه را افزایش داده و باعث افزایش عملکرد محصول می شود [۷۴]. همچنین مکاریان و همکاران گزارش کردند که تابش پلاسمای تاثیر بر وزن خشک ساقه علف هرز گاو پنبه نداشت [۱۳۴].

جدول ۴-۶: تجزیه واریانس اثر پلاسمای بر وزن خشک ساقه چه

میانگین مربعات وزن خشک ساقه چه	درجه آزادی	منابع تغییر
۰/۰۱ ^{ns}	۲	تکرار
۰/۹۸ ^{ns}	۲	ولتاژ
۰/۰۷۳ ^{ns}	۵	زمان
۰/۰۷۳ ^{ns}	۱۰	ولتاژ×زمان
۰/۱۲۹	۳۴	خطا
۱۹/۷۶		ضریب تغییرات (درصد)

ns عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

۴-۷ شاخص پایداری غشا

نتایج تجزیه واریانس نشان داد شاخص پایداری غشا تحت تاثیر تیمارهای ولتاژ و زمان یا اثر متقابل آنها قرار نگرفت (جدول ۴-۷). پایداری غشاء به عنوان شاخصی جهت اندازه گیری میزان مقاومت در برابر تنش های محیطی و از جمله خشکی مطرح می باشد [۱۲۰]. اثرات سودمند پرایمینگ بذر به بازسازی و تجمع اسیدهای نوکلئیک، سنتز پروتئین ها و بازسازی غشاء مربوط است. تحقیقات نشان

داده که پرایمینگ بذر اسفناج موجب افزایش تجمع پروتئین های LEA (پروتئین هایی که نقش سم زدایی و کاهش صدمات سلولی در هنگام کمبود آب در سلول را بر عهده دارند) شده است و این ترکیبات با افزایش پایداری غشای پلاسمایی مانع از اثر تنش ها بر فعالیت و نقش غشاء گردیده اند [۱۲۰]. در پژوهشی پایداری ذرت و گندم تا ۲/۵ دقیقه توسط پلاسما افزایش یافت اما با افزایش زمان تا ۱۰ دقیقه موجب کاهش پایداری گردید و در راستای نتایج پژوهش ما تابش پلاسما در گیاه لوپن تاثیری بر پایداری نداشت که با نتایج ما هم خوانی دارد [۱۳۰].

جدول ۴-۷: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر پایداری غشاء

میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر
پایداری غشاء		
۲۹/۰۲۹ ^{ns}	۲	تکرار
۱۰/۴۵۱ ^{ns}	۲	ولتاژ
۲۷/۶۶۸ ^{ns}	۵	زمان
۳۵/۴۰۳ ^{ns}	۱۰	ولتاژ×زمان
۱۷/۷۲۷	۳۴	خطا
۱۲/۲۴		ضریب تغییرات(درصد)

ns عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

۸-۴ پروتئین

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مقدار پروتئین تحت تیمار زمان پلاسمادهی در سطح یک درصد معنی دار شد (جدول ۴-۸). نتایج مقایسه میانگین نشان می دهد که تیمار زمان در سطح ۱ درصد معنی دار شده است.

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که همه ی تیمارهای تابش پلاسما در زمان های مختلف به جز یک دقیقه نسبت به شاهد افزایش معنی داری در پروتئین بذر ایجاد کرد (شکل ۴-۶). نتایج نشان داد بیشترین میزان پروتئین تحت تاثیر کاربرد زمان چهار دقیقه بدست آمد، که نسبت به شاهد افزایش

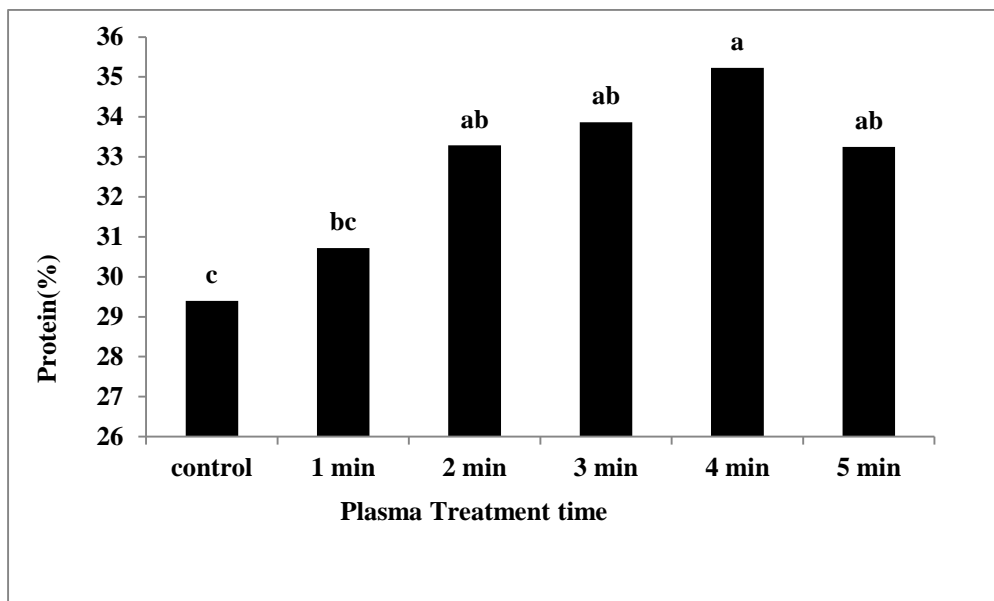
۲۰ درصدی داشت اگر چه با تیمارهای دو، سه و پنج دقیقه در یک گروه آماری قرار گرفتند. طی یک ارزیابی آزمایشگاهی گزارشی شده است که میزان پروتئین دانه در بذور گیاه سویا که توسط پلاسمای سرد تیمار شده اند نسبت به شاهد ۲۵/۸ درصد افزایش داشته است [۵۵]. همچنین افزایش قابل توجه مقدار پروتئین دانه در ذرت نسبت به شاهد گزارشی شده است [۶۲]. تاثیر مثبت پرایمینگ در افزایش پروتئین دانه در گیاهان ذرت و گلرنگ نیز گزارشی شده است [۴۴ و ۱۲۸]. چن و همکاران نشان داد که محتوای پروتئین در برنج قهوه ای نیز تحت تاثیر تیمار پلاسمایی سرد افزایش می یابد [۱۳۷]. بین و همکاران (۲۰۰۵) افزایش پروتئین به وسیله پلاسمای افزایش فعالیت آنزیم هایی مانند آمیلاز و پروتئاز که مربوط به سوخت و ساز هستند می دانند [۵۸]. میل ترکیبی زیاد اکسیژن فعال با بیومولکول های حیاتی نظیر پروتئین ها سبب دناتور^۱ شدن آنها می شود در آزمایش ما آنزیم آسکوربات پراکسیداز تحت تاثیر پلاسمای افزایش یافت که به منزله حفظ تعادل ROS های درون سلول است به نظر می رسد افزایش این آنزیم ارتباط مثبت با افزایش پروتئین نشان دارد.

جدول ۴-۸: تجزیه واریانس اثر پلاسمای بر درصد پروتئین

میانگین مربعات پروتئین	درجه آزادی	منابع تغییر
۱۰/۷۴۶ ^{NS}	۲	تکرار
۲/۵۳۸ ^{NS}	۲	ولتاژ
۴۱/۷۸۱ ^{**}	۵	زمان
۶/۲۶۲ ^{NS}	۱۰	ولتاژ×زمان
۴/۹۲۸	۳۴	خطا
۶/۸۰		ضریب تغییرات (درصد)

NS عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

¹ Denature



شکل ۴-۶: مقایسه میانگین اثر زمان پلاسمادهی بر درصد پروتئین

۴-۹ آنزیم کاتالاز (CAT)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مقدار آنزیم کاتالاز تحت تیمارهای آزمایش یا اثر متقابل آن‌ها قرار نگرفت (جدول ۴-۹). آنزیم کاتالاز به طور مستقیم باعث تجزیه ی پراکسید هیدروژن می‌شود [۱۲۹]. کاتالاز آنزیمی است که در تمام موجودات زنده از جمله سلول های گیاهی، جانوری و میکروارگانیسم های هوازی یافت شده و بعنوان یکی از مهمترین آنزیم های آنتی اکسیدان ایفای نقش می کند [۱۳۱]. آنزیم کاتالاز یکی از مهمترین آنزیم های سیستم آنتی اکسیدانی می باشد که در شرایط تنش افزایش می یابد، ولی با استفاده از تکنیک پرایمینگ می توان میزان این آنزیم را در گیاهان تحت تنش بیشتر افزایش داد [۱۲۲]. در شرایط تنش میزان اکسیژن های آزاد در گیاهان افزایش می یابد و گیاهان در مقابله با این اکسیژن های واکنش پذیر، فعالیت آنزیم های آنتی اکسیداتیو خاص از قبیل کاتالاز، پراکسیداز، گلوتاتیون ریداکتاز و سوپراکسید دیسموتاز را افزایش می دهند. در پژوهشی ر تیمار با پلاسما سرد، فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز را در گیاهچه کلزا افزایش داد [۱۳۷].

جدول ۴- ۹: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر کاتالاز

میانگین مربعات کاتالاز	درجه آزادی	منابع تغییر
۱۸ ^{NS}	۲	تکرار
۶۴۸/۵ ^{NS}	۲	ولتاژ
۳۸۳/۲ ^{NS}	۵	زمان
۸۱/۳ ^{NS}	۱۰	ولتاژ×زمان
۲۳/۳۵	۳۴	خطا
۸/۵		ضریب تغییرات(درصد)

NS عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

۴-۱۰ آسکوربات پراکسیداز

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که تیمارهای زمان و ولتاژ و اثر متقابل آن‌ها تاثیر معنی داری در سطح یک درصد بر میزان آسکوربات پراکسیداز داشت (جدول ۴-۱۰). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و ولتاژ بر آنزیم آسکوربات پراکسیداز نشان می دهد که بیشترین میزان آسکوربات پراکسیداز تحت تاثیر کاربرد زمان ۵ دقیقه پرتو دهی و ولتاژ ۷ کیلو ولت پرتو دهی بدست آمد که نسبت به شاهد ۱۰ درصد افزایش یافته است (شکل ۴-۷). در ولتاژ ۳ کیلو ولت با افزایش زمان پرتو دهی میزان آسکوربات پراکسیداز نسبت به شاهد تغییری نداشت و در یک گروه آماری قرار داشتند. در تیمار پنج وهفت کیلو ولت با افزایش زمان پلاسما دهی میزان آسکوربات پراکسیداز افزایش داشت. همچنین نتایج نشان داد که در همه ی سطوح زمان پرتو دهی ولتاژ هفت از پنج کیلو ولت تاثیر بیشتری بر آنزیم آسکوربات پراکسیداز داشت.

فعالیت بالای آنزیم آسکوربات پراکسیداز نشانه ی حفاظت بیشتر گیاه در برابر آسیب های اکسایشی القاء شده به وسیله ی تنش است. از آنجا که پلاسما یک منبع تولید ROS است باعث افزایش گونه

های فعال اکسیژن می شود. افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در شرایط تنش های غیر زیستی بر اثر افزایش گونه های فعال اکسیژن است که با فعال کردن مسیرهای انتقال پیام باعث افزایش بیان ژن های کد کننده ی آنزیم های پاراکسنده و افزایش فعالیت آنزیم ها می شود [۱۲۹].

فعالیت بالای آنزیم آسکوربات پراکسیداز باعث تجزیه بیشتر H_2O_2 و مقاومت بیشتر گیاه به تنش اکسایشی شده و کاهش فعالیت آنزیم نیز بر اثر کاهش ROS باعث کاهش ساخت (سنتز) آنزیم می شود [۱۲۳]. گیاهان جهت مقابله با تنش های اکسیداتیو ناشی از ROS از طریق ساز و کارهای آنتی اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی گونه های فعال اکسیژن را کاهش می دهند تجمع گونه های اکسیژن فعال در سلول موجب آسیب رساندن به لیپید غشاء، پروتئین و اسیدهای نوکلئیک می شود [۱۳۲].

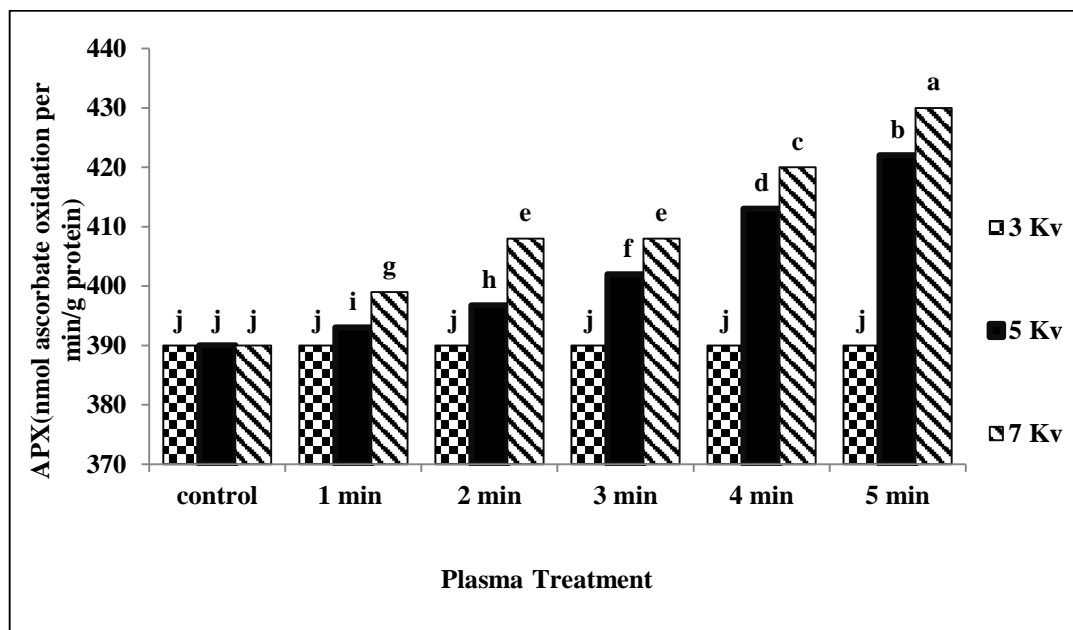
همچنین آسکوربات پراکسیداز توانایی واکنش مستقیم با رادیکال سوپراکسید و سایر فرم های فعال اکسیژن را دارد که می تواند شدت آسیب را مستقیم کاهش دهد [۱۳۳]. با توجه به پیک های بدست آمده از طیف ها گونه های ROS و RNS در آن مشخص شده است مشاهده می شود که با افزایش ولتاژ ROS های بیشتری تولید شده است و از آنجا که APX^1 یک تنظیم کننده و کنترل کننده داخل سلولی جهت حفظ تعادل ROS می باشد طبق نتایج بدست آمده میزان APX با افزایش زمان و ولتاژ افزایش یافته است. پلاسما منجر به تولید انواع رادیکالهای اکسیژن می شود و سطح بالای آنزیم های آنتی اکسیدانی جاروب کننده رادیکالهای آزاد موجود در گیاهان مبین افزایش تحمل آنها به تنش های محیطی است. آنزیم APX در جمع آوری گونه های فعال اکسیژن به منظور جلوگیری از آسیب بیش از حد بر روی غشاء پلاسمایی فعال است.

¹ Ascorbate peroxidase

جدول ۴-۱۰: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر آسکوربات پراکسیداز

میانگین مربعات آسکوربات پراکسیداز	درجه آزادی	منابع تغییر
۰/۲۷۲**	۲	تکرار
۱۷۱۴/۷۷۹**	۲	ولتاژ
۷۰۴/۳۵۹**	۵	زمان
۱۸۶/۲۷۲**	۱۰	ولتاژ×زمان
۰/۰۱۲	۳۴	خطا
۰/۰۳		ضریب تغییرات(درصد)

NS عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.



شکل ۴-۷: مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و ولتاژ پلاسما بر میزان APX

۴-۱۱ مالون دی آلدئید

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای ولتاژ و زمان و اثر متقابل آنها تاثیر معنی داری در سطح یک درصد بر میزان مالون دی آلدئید داشت (جدول ۴-۱۱). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل

تیمارها نشان داد که همه تیمارها کاهش معنی‌داری در این صفت نسبت به شاهد داشته‌اند (شکل ۴-۸). بیشترین میزان مالون دی‌آلدئید در شاهد (عدم پلاسما) و کمترین میزان مالون دی‌آلدئید تحت تاثیر کاربرد زمان پنج دقیقه و ولتاژ هفت کیلو ولت مشاهده گردید. بطوریکه میزان مالون دی‌آلدئید تحت تاثیر کاربرد زمان پنج دقیقه و ولتاژ هفت کیلو ولت کاهش ۳۵ درصدی نسبت به شاهد داشت. بطور کلی با افزایش زمان و ولتاژ میزان مالون دی‌آلدئید کاهش یافت، اما در زمان‌های مختلف پرتودهی میزان کاهش مالون دی‌آلدئید در ولتاژ هفت از ولتاژهای سه و پنج بیشتر بود. میزان مالون دی‌آلدئید و تخریب غشای سلولی در شرایط تنش خشکی به دلیل تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) بالا می‌رود [۱۲۴]. کاهش در تخریب یا پراکسیداسیون غشای سلولی و تولید^۱ MDA با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بهبود می‌یابد که با استفاده از تابش پلاسما می‌توان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان به ویژه کاتالاز و پراکسیداز را افزایش داد و از تخریب غشای سلول‌ها جلوگیری کرد. گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) موجب اکسایش اسیدهای چرب غیر اشباع غشاهای یاخته‌ای شده که در نهایت در اثر این عمل مالون دی‌آلدئید تولید می‌شود. بالا بودن میزان مالون دی‌آلدئید در گیاه نشان‌دهنده آسیب بیشتر به چربی‌های غشاء است که منجر به کاهش یکپارچگی غشاء می‌شود [۱۳۷]. پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء توسط گونه‌های فعال اکسیژن منجر به خسارت غشاءها، افزایش نفوذ پذیری غشاء و کاهش پایداری غشاء می‌گردد. مالون دی‌آلدئید در اثر پراکسیداسیون اسیدهای چرب غیر اشباع توسط گونه‌های فعال اکسیژن تولید می‌شود. تغییر در پراکسیداسیون لیپیدها به عنوان شاخص میزان خسارت اکسایشی در موجودات زنده محسوب می‌گردد. به نظر می‌رسد دلیل اصلی خسارت شدید به غشای سلولی تولید رادیکال‌های اکسیژن ناشی از تابش پلاسما باشد که در نهایت منجر به پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی می‌گردد [۱۳۵]. در راستای نتایج این پژوهش میزان MDA دو رقم از کلزا پس از تیمار با پلاسما سرد ۲۸/۸۵ و ۱۳/۰۸ درصد پس از تیمار با پلاسما سرد کاهش یافت [۱۳۷]. یافته‌ها مبین آن است که تحت تاثیر

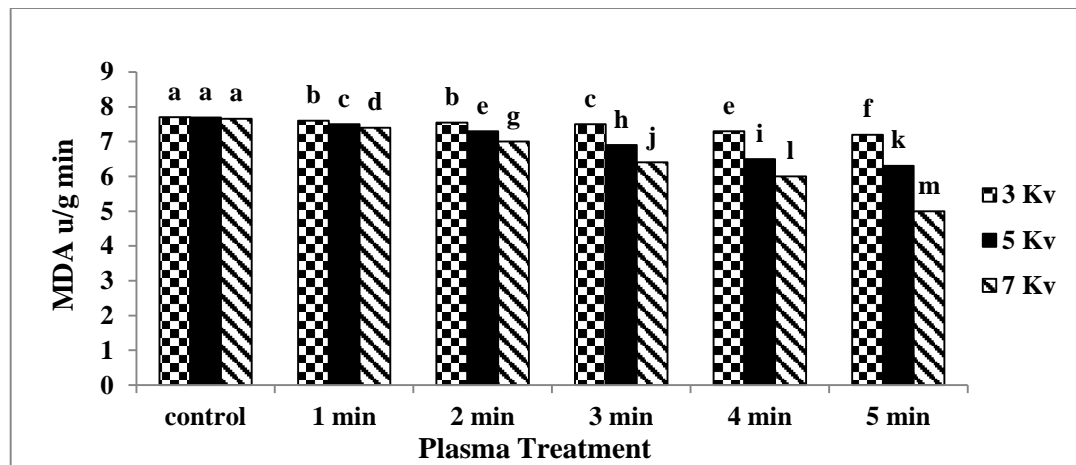
¹ Malondialdehyde

تیمار پلاسما بر بذر، مقدار ترکیب مضر مالون دی آلدئید و پراکسیداسیون کل مواد بطور معنی داری کاهش یافت که خود بخود به معنی مقاوم تر بودن گیاه به تنش وارده است. بطور کلی نتایج پژوهش ما نشان داد که پلاسمای سرد نقش موثری در کاهش میزان ترکیب مضر مالون دی آلدئید در گیاهچه کلزا داشت. کاهش MDA نشان دهنده مطلوب بودن سطح فعالیت آنزیم APX در جمع آوری گونه های فعال اکسیژن جهت جلوگیری از آسیب به غشاء است.

جدول ۴-۱۱: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر مالون دی آلدئید

میانگین مربعات مالون دی آلدئید	درجه آزادی	منابع تغییر
۰/۱۶۱**	۲	تکرار
۳/۷۸۲**	۲	ولتاژ
۲/۹۶۶**	۵	زمان
۰/۵۴۶**	۱۰	ولتاژ×زمان
۰/۰۰۱	۳۴	خطا
۰/۳۳		ضریب تغییرات(درصد)

NS عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.



شکل ۴-۸: مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و ولتاژ پلاسما بر MDA

۴-۱۲ درصد قند محلول

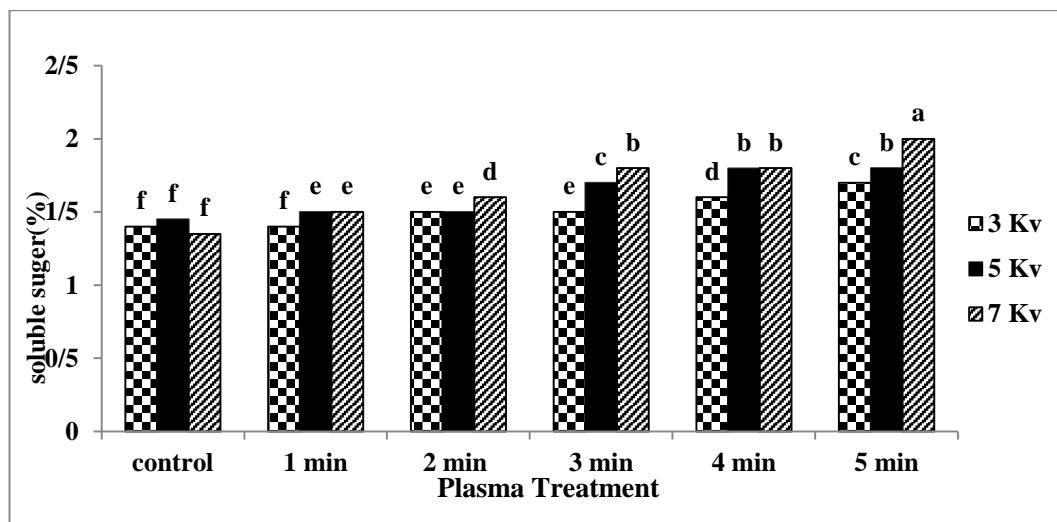
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای ولتاژ و زمان و اثر متقابل آنها تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر درصد قند داشت (جدول ۴-۱۲). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارها نشان داد که بیشترین محتوی قند محلول تحت تاثیر ولتاژ ۷ کیلو ولت و زمان ۵ دقیقه پرتو دهی بدست آمد (شکل ۴-۹). کمترین میزان قند محلول نیز در تیمار کنترل مشاهده گردید. با افزایش زمان پرتو دهی از صفر تا پنج دقیقه در ولتاژهای مختلف یک روند افزایشی در قند محلول بذر مشاهده گردید. میزان قند محلول تحت تاثیر پرتو دهی به مدت زمان پنج دقیقه و ولتاژ هفت کیلو ولت نسبت به شاهد ۴۸ درصد افزایش داشت. قند های محلول به عنوان محافظت کننده های اسمزی در تنظیم اسمزی یاخته نقش داشته و در پاسخ به تنش های محیطی تجمع می یابند. در راستای نتایج ما گزارش شده است که میزان قند محلول در رقمی از کلزا تحت تیمار پلاسما ۱۳/۲۱ درصد افزایش داشته است [۱۳۷]. میزان قند محلول سویا تحت تاثیر پلاسمای سرد ۱۶/۵۱ درصد افزایش یافت [۵۵]. چن و همکاران نشان دادند که محتوای قند محلول در برنج قهوه ای نیز تحت تاثیر تیمار پلاسمایی سرد افزایش یافته است [۱۳۷]. تحت تنش خشکی، تیمار با پلاسما سرد می تواند باعث نگه داشتن آب در گیاهچه کلزا و از طریق افزایش ذخیره قندهای محلول و پروتئین های محلول باعث افزایش انرژی ذخیره شده در گیاهچه شود. از این رو، تیمار با پلاسمای سرد منجر به کاهش اثرات منفی تنش خشکسالی بر رشد گیاهچه کلزا می شود [۱۳۷]. بنابر نتایج بدست آمده می توان گفت که تنش های متعدد زنده و غیر زنده گیاه را تهدید می کند استفاده از پیش تیمار بذر با پلاسمای سرد می تواند از طریق افزایش آنزیم ها و درصد قند محلول اثرات تنش را کاهش دهد. قند های محلول به منزله تنظیم کننده های اسمزی ثبات دهنده غشای سلولی و حفظ کننده تورژسانس سلول عمل می کند و افزایش قند محلول بر اثر تابش پلاسما سبب بهبود تنظیم اسمزی می شود و می تواند قدرت جذب

آب توسط سلول گیاه را افزایش دهد که طبق نتایج این پژوهش^۱ RWC نیز افزایش یافته و همخوانی دارد.

جدول ۴-۱۲: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر قند محلول

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات قند محلول
تکرار	۲	۰/۰۰۱ ^{ns}
ولتاژ	۲	۰/۱۲۷ ^{**}
زمان	۵	۰/۲۴۹ ^{**}
ولتاژ×زمان	۱۰	۰/۰۱۵ ^{**}
خطا	۳۴	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات(درصد)		۲/۴۷

NS عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.



شکل ۴-۹: اثر متقابل زمان و ولتاژ پلاسما بر درصد قند محلول

¹ Relative content of leaf water

۴-۱۳ آلفا آمیلز

نتایج تجزیه واریانس نشان داد آنزیم آلفا آمیلز تحت تاثیر تیمارهای آزمایش قرار نگرفت (جدول ۴-۱۳). آمیلزها آنزیم هایی هستند که عمل آنها به عنوان یک کاتالیزور برای هیدرولیز کربوهیدرات ها می باشد و نقش آنها در گیاهان برای شکستن نشاسته است. نشاسته در طی جوانه زنی دانه ها پردازش شده و به قند تبدیل می شود که این قندها منبع اصلی انرژی در طی رشد اولیه گیاهان هستند. بدون بتا آمیلز دانه ها قادر نخواهند بود جوانه بزنند و رشد کنند زیرا اندوخته غذایی شان (آندوسپرم) را نمی توانند بدون تجزیه و تبدیل شدن به قند قابل مصرف تبدیل کنند و در نتیجه به مرحله ی بالغ شدن و استفاده از نور خورشید نمی رسند. آلفا آمیلزها تولید گلوکز کرده و بتا آمیلزها تولید مالتوز می کنند. بتا آمیلز در حرارت ۶۰ درجه سانتی گراد به سرعت غیر فعال می شود. آلفا آمیلزها تولید گلوکز کرده و بتا آمیلزها تولید مالتوز می کنند. در پژوهشی تأثیر میدان مغناطیسی در بازه های مختلف زمانی بر فعالیت آنزیم های دخیل در جوانه زنی نشان داد که فعالیت آنزیم آلفا آمیلز با اعمال میدان مغناطیسی در همه ی بازه های زمانی افزایش معنی داری نسبت به شاهد داشت.

جدول ۴-۱۳: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر آلفا آمیلز

میانگین مربعات آلفا آمیلز	درجه آزادی	منابع تغییر
۴/۵ ^{ns}	۲	تکرار
۷۱۲/۶۶۷ ^{ns}	۲	ولتاژ
۲۳۵/۰۶۷ ^{ns}	۵	زمان
۸۲/۸۶۷ ^{ns}	۱۰	ولتاژ×زمان
۲۳/۰۱	۳۴	خطا
۷/۹		ضریب تغییرات(درصد)

ns عدم معنی داری * و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

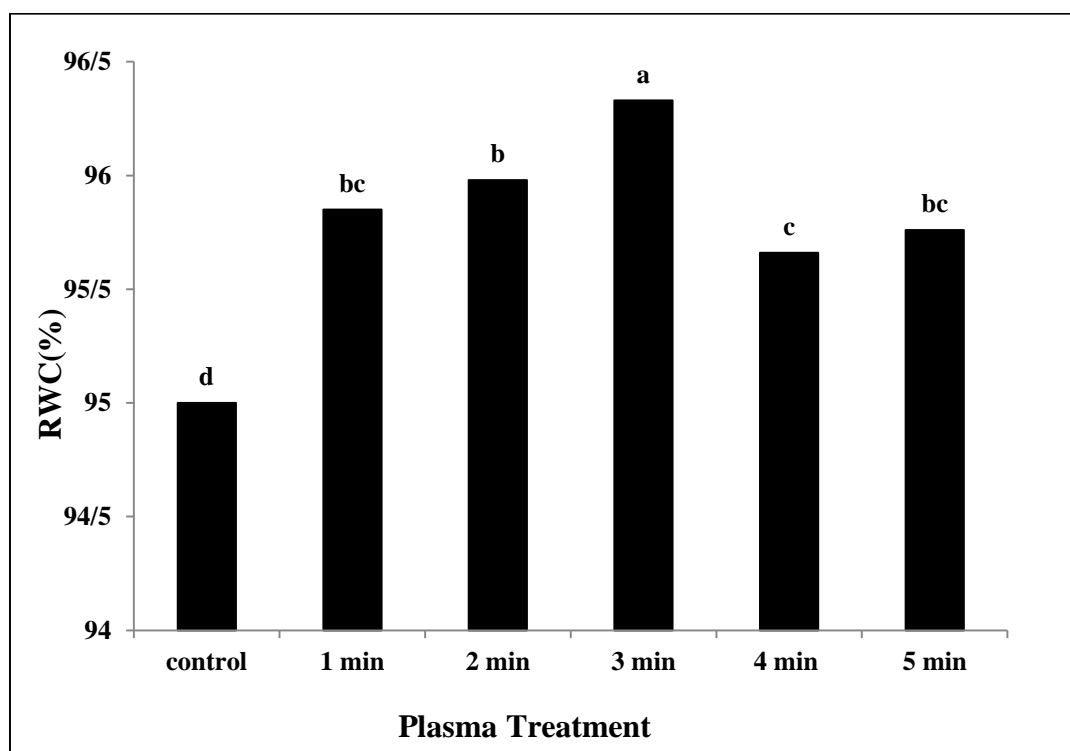
۴-۱۴ محتوی نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد رطوبت نسبی برگ در سطح پنج درصد تحت تاثیر تیمار زمان قرار گرفت (جدول ۴-۱۴). نتایج مقایسه میانگین تاثیر زمان پلاسمادهی نشان داد که بیشترین محتوی نسبی آب برگ مربوط به زمان سه دقیقه بود بطوریکه نسبت به شاهد (عدم پلاσμα) یک درصد افزایش محتوی نسبی آب برگ مشاهده شد (شکل ۴-۱۰). نتایج نشان داد که کمترین محتوی نسبی آب برگ در تیمار عدم پلاσμα بدست آمد، همچنین زمان‌های چهار و پنج دقیقه پلاسمادهی باعث کاهش محتوی نسبی آب برگ نسبت به زمان سه دقیقه گردید. شاخص محتوی نسبی آب سلول (RWC) جذب آب بوسیله ی بافت ها و یاخته ها را نشان می دهد. بطور کلی از این شاخص در شرایط تنش برای ارزیابی تحمل به خشکی گیاهان استفاده می شود. افزایش کارایی ریشه در جذب آب می تواند سبب افزایش محتوی نسبی آب برگ و بهبود در رشد گیاه گردد. پژوهش گران متعددی از جمله عبادی و همکاران (۲۰۰۲) گزارش دادند که تنش خشکی می تواند محتوی نسبی آب برگ را کاهش دادند. سینگ و او شا (۲۰۰۳) نیز گزارش کردند که پرایمینگ بذر ذرت و گندم منجر به افزایش محتوی نسبی آب برگ شده است [۴۴]. در پژوهشی جذب آب در گیاه سویا تحت تاثیر پلاσμα حدود ۱۴ درصد افزایش گزارش شد. در آزمایش ما زمان سه دقیقه پلاσμα دهی افزایش معنی دار محتوی نسبی آب برگ را نسبت به سایر تیمارها به همراه داشت. افزایش رشد ریشه چه در اثر پلاσμα نسبت به شاهد در آزمایش ما مشهود و معنی دار بود بنابراین رشد ریشه بعنوان عامل تاثیر گذار در افزایش محتوی نسبی آب برگ تحت تاثیر پلاσμα می تواند دلیل افزایش محتوی آب نسبی برگ باشد. سایر محققین نیز افزایش رشد ریشه تحت تاثیر پلاσμα را گزارش کرده اند [۶۱، ۵۵، ۷۰]. در آزمایش ما زمان پنج دقیقه سبب کاهش رشد و توسعه ریشه گردید و به نظر می رسد کاهش محتوی نسبی آب برگ در زمان چهار و پنج دقیقه پلاسمادهی به دلیل کاهش رشد ریشه در این تیمارها باشد.

جدول ۴-۱۴: تجزیه واریانس اثر پلاسما بر محتوی نسبی آب برگ

میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر
محتوی نسبی آب برگ		
۰/۰۲ ^{NS}	۲	تکرار
۰/۰۶۳ ^{NS}	۲	ولتاژ
۰/۹۳۲*	۵	زمان
۰/۱۹۹ ^{NS}	۱۰	ولتاژ×زمان
۰/۲۷۲	۳۴	خطا
۰/۵۴		ضریب تغییرات(درصد)

NS عدم معنی داری و ** و *** به ترتیب بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد می باشد.



شکل ۴-۱۰: مقایسه میانگین اثر زمان پلاسمادهی بر محتوی نسبی آب برگ

نتیجه گیری

تابش پلاسما در زمان سه دقیقه سبب بیشترین افزایش طول ریشه، در زمان چهار دقیقه سبب بیشترین افزایش درصد پروتئین دانه، در زمان پنج دقیقه و ولتاژ هفت کیلو ولت سبب بیشترین افزایش APX و محتوی قند محلول و همچنین سبب بیشترین کاهش MDA نسبت به شاهد گردید. تابش پلاسما در زمان ۳ دقیقه بیشترین RWC را نسبت به شاهد نشان داد. بر اساس نتایج حاصل از طیف سنجی انتشار نوری انجام شده گونه های اکسیژن با افزایش ولتاژ و زمان پلاسما افزایش نشان داد. بنابراین انتظار می رفت که این گونه های اکسیژن اثر مخربی روی غشاء پلاسمایی، پروتئین و سایر فرآیندهای بیوشیمیایی سلول داشته باشد اما طبق نتایج بدست آمده در این آزمایش حتی ولتاژ و زمان بالای پلاسما تاثیری بر پایداری غشاء پلاسمایی نداشت لذا بنظر می رسد پلاسما با افزایش میزان آسکوربات پراکسیداز از اثرات مخرب گونه های فعال اکسیژن جلوگیری کرده است و باعث افزایش پروتئین، قند محلول، طول ریشه، محتوی نسبی آب برگ و کاهش مالون دی آلدئید شده است. در نهایت نتایج این پژوهش نشان داد که بهره مندی از تابش پلاسمای سرد از طریق بهبود فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان و بهبود صفات فوق موجب افزایش تحمل گیاه به تنش ها می شود.

پیشنهادات

پژوهش های زیر جهت تکمیل و ادامه این تحقیق پیشنهاد می گردد:

- ✓ تابش پلاسما در زمان ها و ولتاژ های دیگر
- ✓ بررسی اثر پلاسما بر پوشش بذر با SEM¹
- ✓ بررسی اثر پلاسما بر کاهش بار میکروبی بذر
- ✓ استفاده از دیگر گازها

¹ Scanning electron microscope

- [1] D. Frank-Kamenetskii. (2012). Plasma: The fourth state of matter.
- [2] H. Conrads, M. Schmidt . (2000).Plasma generation and plasma sources, Plasma Sources Sci. Technol, 9: 441-454.
- [4] Misra, N., B. Tiwari, K. Raghavarao and P. Cullen. (2011). Non thermal plasma inactivation of food-borne pathogens. Food Eng. Rev. 3: 159-170.
- [5] Keener, K. (2011). Atmospheric Plasma Technology in the Meat Industry. J. Food Saf.
- [6] Misra, N. N., K. M. Keener, P. Bourke, J.-P. Mosnier and P. J. Cullen. (2014). Inpackage atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes. J. Biosci. Bioeng. 118: 177-182.
- [7] A. Fridman, A. Kennedy, A. Lawrence. (2004).Plasma Physics and Engineering.
- [8] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg .(1994).Principles of plasma discharges and materials processing.
- [9] N. S. J. Braithwaite. (2000) . Introduction to gas discharge. Plasma Sources Sci. Technol, 9: 517-527.
- [10] J. R. Roth. (2001). Industrial Plasma Engineering Volume 2: Applications to Nonthermal Plasma Processing.
- [11] J. R. Roth . (1995). Industrial Plasma Engineering Volume 1: Principles.
- [12] Jayasena, D. D., H. J. Kim, H. I. Yong, S. Park, K. Kim, W. Choe and C. Jo. (2015). Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: Effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes. Food Microbiol. 46: 51-57.
- [13] Stoica, M., P. Alexe and L. Mihalcea. (2014). Atmospheric Cold Plasma as New Strategy for Foods Processing-an Overvi. Innovative Rom Food Biotechnol. 15: 1.
- [15] Tendero, C., C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison and P .Leprince.(2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. Spectrochim. Acta, Part B. 61: 2-30.
- [16] Baier, M., M. Gorgen and A. Frohling. (2012). Fresh produce decontamination by an atmospheric pressure plasma jet. In Proceedings of the 11th International Congress on Engineering and Food ICEF. (Vol. 3, pp. 1643-4).
- [17] B. Ladislav, H. Barankova.(2010).Cold atmospheric plasma: Sources, processes and applications, Thin Solid Films, 23: 6705-6713.
- [18] T. Hirata, T. Kishimoto, C. Tsutsui, T. Kanai, A Mori.(2013). Healing burns using atmospheric pressure plasma irradiation, J. Appl. Phys,53: 010302-010304.

- [19] A. V. Nastuta, I. Topala, C. Grigoras, V. Pohoata, G. Popa .(2011). Stimulation of wound healing by helium atmospheric pressure plasma treatment, *J. Phys. D: Appl. Phys*, 44: 1-9.
- [20] S .J. Kim, T. H. Chung, S. H. Bae, S. H. Leem .(2010). Induction of apoptosis in human breast cancer cells by a pulsed atmospheric pressure plasma jet, *Appl. Phys. Lett*, 97 :1-3.
- [21] Z. Xiong, X. P. Lu, A. Feng, Y. Pan, K. Ostrikov.(2010). Highly effective fungal inactivation in He + O₂ atmospheric-pressure non equilibrium plasmas, *Phys. Plasmas*, 17: 123502-123506.
- [22] R. Wang, H. Zhou, P. Sun, H. Wu, J. Pan, W. Zhu, J. Zhang, J. Fang .(2011). The effect of an atmospheric pressure, DC nonthermal plasma microjet on tooth root canal, dentinal tubules infection and reinfection prevention, *Plasma Medicine*, 1: 143-155.
- [23] B. R. Locke, M. Sato, P. Sunka, M. R. Hoffmann, J. S. Chang.(2006). Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment, *Ind. Eng. Chem. Res*, 45 :882-905.
- [24] Y. T. Chang, G. Chen .(2014). Oral bacterial inactivation using a novel low-temperature atmospheric-pressure plasma device, *J. Dental Sci*, 60 :1-7.
- [25] Ch. Patel, N. Masani, T. Parekh .(2014) . Plasma Antenna, *Int. J. Eng. Sci*, 15 :275-277.
- [26] I. Matveev, S. Matveeva, A. Gutsol, A. Fridman. (2005). Non-Equilibrium plasma igniters and pilots for aerospace application, *Am. Hist*, 25: 1-6.
- [27] M. R. Khani, S. H. Razavi Barzoki, M. Sahba Yaghmaee, S. I. Hosseini, M. Shariat, B. Shokri, A. R. Fakhari, S. Nojavan, H. Tabani, M. Ghaedian.(2011). Investigation of cracking by cylindrical dielectric barrier discharge reactor on the n-Hexadecane as a model compound, *IEEE Trans. Plasma Sci*, 39 :1807-1813.
- [29] Khamsen, N., A. Akkarachainon, K. Fookiat, J. Srisala, S. Chomchuen, W. Kanokbannakorn and S. Srisonphan. (2016). Atmospheric Cold Plasma via Fringe Field Enhanced Corona Discharge on Single Dielectric Barrier for Large-volume Applications. *Procedia Comput. Sci*. 86: 321-324.
- [30] Fridman, G., G. Friedman, A. Gutsol, A. B. Shekhter, V. N. Vasilets and A. Fridman. (2008). Applied plasma medicine. *Plasma Processes Polym*. 5: 503-533.
- [31] Weltmann, K., T. Von Woedtke, R. Brandenburg and J. Ehlbeck. (2008). Biomedical applications of atmospheric pressure plasma. In II Central European Symposium on Plasma Chemistry.
- [32] Foest, R., E. Kindel, A. Ohl, M. Stieber and K. Weltmann. (2005). Non-thermal atmospheric pressure discharges for surface modification. *Plasma Phys. Controlled Fusion*. 47: B525.

- [33] Heinlin, J., G. Morfill, M. Landthaler, W. Stolz, G. Isbary, J. L. Zimmermann, T. Shimizu and S. Karrer. (2010). Plasma medicine: possible applications in dermatology. *JDDG: J. Dtsch. Dermatologischen. Ges.* 8: 968-976.
- [34] Carlson, N. E. and R. B. Roach.(2002). Platelet-rich plasma: clinical applications in dentistry. *J. Am. Dent. Assoc.* 133: 1383-1386.
- [35] Mohsenian, S., M. S. Esmaili, B. Shokri and M. Ghorbanalilu.(2015). Physical characteristics of twin DC thermal plasma torch applied to polymer waste treatment. *J. Electrostat.* 76: 231-237.
- [36] Zanini, S., E. Grimoldi, A. Citterio and C. Riccardi. (2015). Characterization of atmospheric pressure plasma treated pure cashmere and wool/cashmere textiles: Treatment in air/water vapor mixture. *Appl. Surf. Sci.* 349: 235-240.
- [37] Guimond, S., B. Hanselmann, M. Amberg and D. Hegemann.(2010). Plasma functionalization of textiles: specifics and possibilities. *Pure Appl. Chem.* 82: 1239-1245.
- [38] Yousefi, H., M. Ghoranneviss, A. Tehrani and S. Khamseh. (2003). Investigation of glow discharge plasma for surface modification of polypropylene. *Surf. Interface Anal.* 35: 1015-1017.
- [39] Gadri, R. B., J. R. Roth, T. C. Montie ,K. Kelly-Wintenberg, P. P.-Y. Tsai, D. J. Helfritch, P. Feldman, D. M. Sherman, F. Karakaya and Z. Chen. (2000). Sterilization and plasma processing of room temperature surfaces with a one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP). *Surf. Coat. Technol.* 131: 528-541.
- [40] Pankaj, S. K., C. Bueno-Ferrer, N. Misra, V. Milosavljević, C. O'Donnell, P. Bourke, K. Keener and P. Cullen. (2014). Applications of cold plasma technology in food packaging. *Trends Food Sci. Technol.* 35: 5-1.
- [41] Grabowski, M., M. Hołub, M. Balcerak, S. Kalisiak and W. Dąbrowski. (2015). Black pepper powder microbiological quality improvement using DBD systems in atmospheric pressure. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 71: 20811.
- [42] Schlüter, O., J. Ehlbeck, C. Hertel, M. Habermeyer, A. Roth, K. H. Engel, T. Holzhauser, D. Knorr and G. Eisenbrand. (2013). Opinion on the use of plasma processes for treatment of foods. *Mol. Nutr. Food Res.* 57: 920-927.
- [43] Schwabedissen, A., P. Łaciński, X. Chen and J. Engemann.(2007). PlasmaLabel—a new method to disinfect goods inside a closed package using dielectric barrier discharges. *Contrib. Plasma Phys.* 47: 551-558.
- [45] Moghaieb, R. E., El-Awady, M. A., El Mergawy, R. G., Youssef, S., & El-Sharkawy, A. M. (2006). A reproducible protocol for regeneration and transformation in canola (*Brassica napus L.*). *African Journal of Biotechnology*, 5(2), 143.
- [51] Sera, B., Stranak, V., Serry, M., Tichy, M. and Spatenka, P. (2008). Germination of chenopodium Album in resonance to microwave plasma treatment. *Plasma Science*.

- [52] Selcuk Selcuk, M., Oksuz, L. and Basaran, p.(2008). Decontamination of grain and legumes infected with *Aspergillus* spp. And *penicillium* spp. By cold plasma treatment. *Bioresource Technolgy*. 99: 5104-5109.
- [53] Zhou, Z.W., Huang, Y.F., Yang, S.Z. and Chen, W. (2011). Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and alication on tomato seeds. *Agri. Science*. 2:23-27.
- [54] Jiafeng, J., Xin, H., Ling, L., Jiangang, L., Hanliang, S., Qilai, X. and Renhong, Y. (2014).Effect of cold plasma treatment on seed germination and growth of wheat. *Plasma Science and Technology* 16:54-48.
- [55]Li Ling, Jiang Jiafeng, Li Jiangang¹, Shen Minchong,⁴He Xin^{1,4}, Shao Hanliang³&Dong Yuanhua.(2014). Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of Soyben. *SCIENTIFIC REPORTS* |4:5859| DOI:10.1038/srep05859.
- [56] Chen, H H., Chen, Y.K. and Change, H.C. (2012). Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice. *Food Chem*. 135:4-9.
- [57]Sera, B., Spatenka, P., Sery, M., Vrchotova, N. and Hruskova, I. (2010).Influence of plasma treatment on wheat and out germination and early growth. *IEEE Transaction on plasma science* 38:2963-2968.
- [58] Yin, M.Q., Huang , M.J, Ma, B.Z. and Ma, T.C. (2005). Stimulating effects of seed treatment bymagnetized plasma on tomato growth and yield. *Plasma Science. Techno*. 7:3143-3147.
- [59] Zhou, Z.W., Huang, Y.F., Yang, S.Z. and Xiong, D. Y. (2012). Progrees in electromagnetics research symposium proceedings. Kuala Lumper, Malaysia. 1577.
- [60] Ling, L., Jiangang, L., Minchong, S., Chunlei, Z. and Yuanhua, D.(2015). Cold plasma treatment enhances oilseed rae seed germination under drought stress. *Scientific Reports*. 5:13033.<http://dx.doi.org/10.1038/srep13033>.
- [61]Jiang, J. F., Lu, Y. F.,Li, J.G.,Li, L., He,X., Shao, H. L.and Dong, Y.H.(2014). Effectof seed treatment by cold plasma on the resistance of tomato to *Ralstonia solanacearum* (bacterial wilt). *Plos one* 9: 1-6.
- [62] Wu, Z.H., Chi, L.H., Bian, S.F. and Xu, K.Z.(2007). Effects of cold plasma treatment on maze seedling resistance. *J Maize Science*. 15:111-113.
- [63] Bormashenko, E., Shapira, Y., Grynyov, R., Whyman, G., Bormashenko, Y. and Drori, E. (2015). Interaction of cold radiofrequency plasma with seeds of beens (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journalof experimental botany*, 66(13):4013-4021.
- [64]Filatova, I., Azharonok, V., Lushkevich, V., Zhukovsky, A., Spacić, K., Živković, S., Puač, N., Lazović, S., Malović, G. and Petrović, Z. Lj.2013. Abstr. 31st ICPIG, July1419.(2013). Granda, Spain Ps4-105;http://icping2013.net/papers/127_2.pdf.

- [65] Mitra, A., Yang-Fang Li, T.G. Klampfl, T., Shimizu, J., Jeon, G.E. and Morfi Il, J.L.(2014). Zimmermann, Food Bioprocess Technol., 7: 645-653.
- [66]Gordeev, Yu. A. and Yuldashev, R. Z. (2011). Vestn. Tadzhih. Tekhn. Univ., 15, No.3:56-61.
- [67]Filatova, I., Azharonok, V., Gorodetskaya, E., Mel'nikova, L., Shedikova, O. and Shik, A. (2009). Plasma-radiowave stimulation of plant seeds germination and inactivation of pathogenic microorganisms. Proceeding of the International Plasma Chemistry Society 19:27.
- [68] Schenabel, U., Niquet, R., Krohmann, U., Winter, J., Schluter, O., Weltmann, KD. and Ehlbeck, J.(2012). decontamination of microbiologically contaminated specimen by direct and indirect plasma treatment. Plasma Processing of Polymers 9:569-575.
- [69]Sera, B., Gajdva, I., Sery, M. and Spatenka, P.(2013). New physicochemical treatment method of poppy seeds for agriculture and food industries. Plasma Science. Technol. 15:935-938.
- [70] Sadhu, S., Thirumdas, R., Deshmukh, R.R. and Annapure, U.S. (2017). Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiate L.*). Food science and technology. 78:9-104.
- [71] Sarinont, T., Koga, K., Kitazaki, S., Uchida, G., Hayashi, N. and Shiratani, M.(2014). Jps Conf. Proc. 1,01508.
- [72] Kitazaki, S., Sarinont, T., Koga, K., Hayashi, N. and Shiratani, M.(2014). Curr. App, Phys. 14,S149.
- [73] Mitra, A., Yang-Fang Li., Klampfl, T.J., Shimizu, T., Jeon. J., Morfi Il. G.E.et all.(2012).Inactivation of surface-borne microorganisms and increased germination of seed specimen by cold atmospheric plasma. Food and Bioprocess Technology. 7:645-653.
- [74] Koga, K., Thapanut, S., Amano, T., Seo, H., Itagaki, N., Hayashi, N., & Shiratani, M. (2016). Simple method of improving harvest by nonthermal air plasma irradiation of seeds of *Arabidopsis thaliana (L.)*. *Applied Physics Express*, 9(1), [016201]. <https://doi.org/10.7567/APEX.9.016201>
- [75] Tong, J., He, R., Zhang, X., Zhan, R., Chen, W. and Yang, S. (2014). Effects of atmospheric pressure air plasma pretreatment on the seed germination and early growth of *Andrographi paniculata*. Plasma Science Technology. 16:260-266.
- [76] N. Georgescu.(2008).High voltage pulsed, cold atmospheric plasma jets: electrical characterization, Plasma Phys. Rep, 60:1025-1032.
- [77] M. Laroussi, C. Tendero, X. Lu, S. Alla, W. L. Hynes .(2006).Inactivation of bacteria by the plasma pencil, Plasma. P. Polym, 3: 470-473.

- [79] Y. Ma, G. J. Zhang, X. M. Shi, G. M. Xu, Y. Yang .(2008). Chemical mechanisms of bacterial inactivation using dielectric barrier discharge plasma in atmospheric air, *IEEE. T.Plasma Sci*, 36 :1615-1620.
- [80] A. Chirokov, A. Gutsol, A. Fridman.(2005). Atmospheric pressure plasma of dielectric barrier discharges, *Pure Appl. Chem*, 77: 487-495.
- [81] U. Kogelschatz. (2003). Dielectric-barrier discharges: Their History, discharge Physics, and Industrial applications, *Plasma Chem. Plasma P*, 23 :1-45.
- [82] V. Nehra, A. Kumar, H. K. Dwivedi. (2008) . Atmospheric non-Thermal plasma sources, *Int. J. Eng*, 2 :53-68.
- [83] F. Liu, P. Sun, N. Bai, Y. Tian, H. Zhou, S. Wei, Y. Zhou, J. Zhang, W. Zhu, K. Becker, J. Fang.(2010). Inactivation of bacteria in an aqueous environment by a direct-current, cold atmospheric pressure air plasma microjet, *Plasma P. Polym*, 7: 231-236.
- [84] A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, J. Mullen.(2002). Gas discharge plasmas and their applications, *Spectrochim. Acta, Part B*, 57: 609-658.
- [85] S. Hoshik, J. M. Choi, T. W. Kim.(2013). Surface modification by atmospheric pressure DBDs plasma: application to electroless Ni plating on ABS plates, *T. Electr. Electron Mater* ,14: 133-138.
- [86] H. H. Kim,(2004).Nonthermal plasma processing for air-pollution control: A Historical Review, current issues, and future prospects, *Plasma P. Polym*, 1: 91-110.
- [87] S. P. Kuo. (2012) .Air plasma for medical applications, *J. Bio. Sci. Eng*, 5: 481-495.
- [88] A. Angela, T. Nakajima, H. Kurita, A. Mizuno.(2014).Safety evaluation of nonthermal atmospheric pressure plasma liquid treatment: Single DNA molecule-based method. *J. Electrostatics*, 72: 210-217.
- [89] P. K. Chu, J. Y. Chen, L. P. Wang, N. Huang. (2002).Plasma-surface modification of biomaterials, *Materials Sci. Eng*, 36: 143–206.
- [90] E. Stoffels, Y. Sakiyama, D. B. Grave. (2008). Cold atmospheric plasma: charged species and their interactions with cells and tissues, *IEEE. T. Plasma Sci*, 36: 1441-1457.
- [91] Z. Xiong, Y. Cao, X. Lu, T. Du.(2011). Plasmas in Tooth Root Canal, *IEEE. T. plasma sci*, 39 :2968-2969.
- [92] Filatova, V., Azharonok, M., Kadyrov, V., Beljavsky, A., Gvozдов, A., Shik, A.(2011). The Effect Of Plasma Treatment of Seeds of some Grain And Legumes On Their Sowing Quality And Productivity. Received January 24.

- [93] Filatova, I., Azharonok, V., Shik, A., Antoniuk, A. and Terletskaia, N. (2012). Plasma for Bio.
- [94] Soltania, A., Golipoor, M. and Zeinali, E. (2006). Seed reserve utilization and seedling growth of wheat as affected by drought and salinity. *Environ. Exp. Bot.* 55:195-200.
- [95] Mori, Y., Kobayashi, J., Murata, T., Hahizume, H., Hourii, M. and Ito, M. (2015). Proc. ICRP-9/GEC-8/SPP-33, LW1.00146.
- [96] Tatipata, A. (2009). Effect of seed moisture content packaging and storage period on mitochondria inner membrane of soybean seed. *Journal of Agricultural Technology*. 5:51-54.
- [97] Chen, H.H., Change, H.C., Chen, Y.K., Hung, C.L., Lin, S.Y. and Chen, Y.S. (2016). An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: Low pressure plasma. *Food Chemistry*, 191:120-12.
- [98] Hebner G. A., Miller P. A. and Woodworth J. R. (2000). *Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques*, Springer, Berlin Heidelberg, PP. 146.
- [99] P. J. Cullen and V. Milosavljevi. (2015). Spectroscopic characterization of a radio-frequency argon plasma jet discharge in ambient air, *PTEP*, 6, 063J01.
- [100] Fantz U. (2006). Basics of plasma spectroscopy, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 15, PP 137.
- [101] Yubero C., Garcia M. C., Varo M. and Martine P. (2013). Gas temperature determination in microwave discharges at atmospheric pressure by using different Optical Emission Spectroscopy techniques, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 90, pp 61.
- [102] NIST Standard Reference Database, National Institute of Standards and Technology, http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
- [103] Aragon C. and Aguilera J. A. (2008). Characterization of laser induced plasma by optical emission spectroscopy: a review of experiments and methods. *Spectrochimica Acta Part B*. Vol. 63, pp 893-916.
- [104] Zhu X. M. and Pu Y. K. (2010). Optical emission spectroscopy in low-temperature plasmas containing argon and nitrogen: determination of the electron temperature and density by the line-ratio method.
- [105] Zhu X. M. and Pu Y. K. (2008). Using OES to determine electron temperature and density in low-pressure nitrogen and argon plasmas, *Plasma Sources Science and Technology*, 17, 2, pp 240.

- [106]Boivin R. F., Kline J. L. and Scime E. E. (2001) .Electron temperature measurement by a helium line intensity ratio method in helicon plasmas.Physics of Plasmas., 8, 12, pp 5303.
- [107] Goto M. and Sawada K. (2014) .Determination of electron temperature and density at plasma edge in the Large Helical Device with opacity-incorporated helium collisional-radiative model, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer., 137, pp 23.
- [108] Ochkin V. N. (2009).Spectroscopy of low temperature plasma, WILEY-VCH. Emissions from a cement kiln. Fuel Process. Technol. 104: 343e351.
- [109]Maguire, J.D. (1962). Seed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence vigour. Crop Sci. 2: 176-178.
- [110] Valentovic, P., Luxova, M., Kolarovi, L. and Gasparikora, O. (2006). Effect of osmotic stress on compatible solutes content, memberane stability and water relation in two maize. Plant Soil Enviroment 52: 186-191.
- [111] Waling, L., Vark, W.V., Houba, V.J.G. and Van der Lee, J.J. (1989). Soil and plant and analysis, a series of syllabi. Plant analisis procedures ,Wageningen Agriculture University, the Netherlnd.
- [112] Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. Methods in Enzymology, 105:121-126.
- [113] Nakano, Y., and Asada, K. 1987. Purification of ascorbate peroxidase in spinach chloroplast: inactivation in ascorbate-depleted medium and reactivation by monodehydroascorbate radical. Plant Cell Physiology 28: 131-140.
- [114] Sheligl, H.Q. (1986). Die verwettung orgngischer souren durch chlorella lincht. Planta Journal, 11:47-51.
- [115] Dehghanpour Farashah, H., Tavakkol-Afshari R., Sharifzadeh F. & Chavoshinasab S. (2011). Germination improvement and á-amylase and â-1,3-glucanase activity in dormant and nondormant seeds of Oregano (*Origanum vulgare*). Australian Journal of Crop Science, 5(4): 421-427.
- [116] Gupta, R.K., Majumdar, D., Trivedi, J.V., Bhanarkar, A.D. (2012). Particulate matter and elemental.
- [118] Kopyra, M. and Gwóźdz, E.A. (2003). Nitric oxide stimulates seed germination and counteracts the inhibitory effect of heavy metals and salinity on root growth of *Lupinus luteus*. Plant Physiol. Biochem. 41 : 1011-1017.
- [119] Sera, B., Gajdova, I., Cernak, M., Gavril, B., Hnatiuc, E., Kovacik, D., et al. (2012). How various plasma sources may affect seed germination and growth. In Proceedings of the 13th international conference on optimization of electrical and electronic equipment (pp. 1365e1370). OPTIM, art.no. 6231880.

- [120] Saneoka, H., et al. (2004). Nitrogen nutrition and water stress effects on cell membrane stability and leaf water relations in *Agrostis palustris* Huds. *Environmental and Experimental Botany* 52(2): 131-138.
- [121] Nasir Khan, M., Siddiqui, M.H., Mohammad, F., Masroor, M., Khan, A. and Naeem, M. (2007). Salinity induced change in growth, enzyme activities, photosynthesis, prolin accumulation and yield in linseed genotypes. *J. Agri. Sci.* 3: 685-689.
- [122] Moosavi, A., et al. (2009). Effect of seed priming on germination characteristics, polyphenoloxidase, and peroxidase activities of four amaranth cultivars. *J. Food Agric. Environ* 7(3-4): 353-358.
- [123] Polle, A. (2001). Dissecting the superoxide dismutase-ascorbate-glutathione-pathway in chloroplasts by metabolic modeling. Computer simulations as a step towards flux analysis. *Plant physiology* 126(1): 445-462.
- [124] Zhang, J. and M. Kirkham (1996). Antioxidant responses to drought in sunflower and sorghum seedlings. *New Phytologist* 132(3): 361-373.
- [125] Thirumdas, R. (2018). Exploitation of cold plasma technology for enhancement of seed germination. *Agri. Res. Tech* 13: 1-4.
- [126] Šerá, B., et al. (2012). How various plasma sources may affect seed germination and growth. 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), IEEE.
- [127] Patel, P. K. and A. Hemantaranjan (2012). Antioxidant defence system in chickpea (*Cicer arietinum* L.): influence by drought stress implemented at pre-and post-anthesis stage. *Am J Plant Physiol* 10: 3932.
- [129] Mittler, R.(2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Plant Sci.* 7:405-410.
- [130] Filatova, I., et al. (2014). Effect of rf plasma treatment on the germination and phytosanitary state of seeds. *Journal of Applied Spectroscopy* 81(2): 250-256.
- [131] Bloch, K.E., Shichman, M., Vorobeychik, D. and Vardi, P. (2007). Catalase expression in pancreatic alpha cells of diabetic and non-diabetic mice. *Cell Biol.* 127:227-232.
- [132] Abdul Jalal, C., Riadh, K., Gopi, R., Manivannan, P., Ines, J., Change-Xing, X., Hong-Bo, S. and Panneerselvam, R. (2009). Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints. *Acta Physiol. Plant.* 31:427-436.
- [133] Israr, M. and Sahi, S.V. (2006). Antioxidative responses to mercury in the cell cultures of *Sesbania drummondi*. *Plant Physiol. Biochem.* 44:590-595.

[135] Li, H., Sun, Y.L., Yu, X., Guo, H.P., Lian, H.F., Sun, X.D., Shi Q. H. and Liu S. Q. (2015). Effects of exogenous calcium on the growth and physiological traits of garlic seedlings under cadmium stress. *J. Animal Plant Sci.*25:107-113.

[136] Puligundla, P., et al. (2017). Effect of corona discharge plasma jet treatment on decontamination and sprouting of rapeseed (*Brassica napus L.*) seeds. *Food Control* 71: 376-382.

[137] Ling, L., et al. (2015). Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress. *Scientific reports* 5: 13033.

[۳] اف چن، مقدمه ای بر فیزیک پلاسما و همجوئی هسته ای، ترجمه‌ی صمد سبحانیان، انتشارات دانشگاه تبریز (۱۳۸۰)

[۱۴] مظلوم، س.م.، فلاح شجاعی، ح. کمانی و ح. ا. میرزایی. ۱۳۹۲. مروری بر امکان استفاده از فناوری پلاسمای سرد در صنعت بسته بندی. علوم و فنون بسته بندی ۴: ۴۸-۶۱.

[۲۸] هارونی، ا. و س. عباسی. ۱۳۹۰. تکنولوژی پلاسما روش‌های تولید و کاربرد آن در صنایع غذایی، بیستمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی.

[۴۴] نیسی، ع.، غلامی، ا.، نصیری دهرخی، ع. ۱۳۹۴. تاثیر پیش تیمار بذر توسط سالیسیلیک اسید بر جوانه زنی و خصوصیات رشد گیاهچه ذرت (*Zea Mayz L.*). نخستین کنفرانس ملی دستاوردهای نوین در علوم زیستی و کشاورزی. اردیبهشت ماه، دانشگاه شهید بهشتی.

[۴۶] دهشیری، ع. ۱۳۷۸. زراعت کلزا. انتشارات دفتر تولید برنامه های ترویجی و انتشارات فنی معاونت و ترویج. ص ۶۳.

[۴۷] عزیزی، م.، سلطانی، ا. و خاوری خراسانی، س. ۱۳۷۸. کلزا. تألیف: (Kimber, D. S. and Mc Gregor) (D.I.)، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. صفحه ۲.

[۴۸] حاجی بابایی، م. ۱۳۷۶. پایداری کشاورزی یا کشاورزی پایدار. مجله علمی-فنی کشاورزی زیست محیطی. شماره ۹۶.

[۴۹] ناصری، ف. ۱۳۷۵. دانه های روغنی، انتشارات آستان قدس رضوی.

[۵۰] جلالی جوران، م.، هاشم زاده، ح. و موسوی، ا. ۱۳۸۳. بررسی تغییرات کمی و کیفی میزان پروتئین، کلروفیل و کارتنوئید در کلزای تراریخت شده با آنتی سنس ژن گلوتامین سنتتاز (GSI). مجله علوم آب و خاک-علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۸(۲): ۱۲۰-۱۰۷.

[۱۱۷] ایزدی دربندی، ا.، محمدیان، م.، یانق، ع. و زرقانی، ه. ۱۳۹۱. اثرات دما و شوری بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه توده‌های کنجد. مجله پژوهش‌های زراعی ایران. ۳۳۵-۳۴۵: ۱۰.

[۱۲۸] اشرفی، ا.، رزمجو، خ. ۱۳۸۸. بررسی اثر هیدرو پرایمینگ بر خصوصیات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گلرنگ تحت تنش خشکی. فصلنامه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. دوره ۱، شماره ۱. ۳۴-۴۳.

[۱۳۴] مکاریان، ح. مومنی، م. و سعیدی، ع. (۱۳۹۶). تاثیر پلاسمای سرد بر خصوصیات جوانه زنی و رشد گیاهچه علف هرز گاوپنبه (*Abutilon theophrasti L.*)، هفتمین همایش علوم علف های هرز ایران، گرگان.

Abstract

Plasma is an ionized gas consisting of ions, electrons, neutral atoms, radicals and species excited, which is called the fourth element of nature. Today, cold plasma technology can replace many of the most expensive and harmful chemical compounds for the environment and human health for pre-treatment of plant seeds. In order to evaluate the effect of plasma on germination indices and physiological traits of seed and seedlings of rapeseed, a factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications in Shahrood University of Technology in 2018. The first factor was the duration of irradiation of canola seeds with cold plasma in six levels: zero (control), 1, 2, 3, 4, and 5 minutes, and the second factor was the voltage applied at three levels of 3, 5 and 7 kV. The results showed that the intensity of active oxygen species and nitrogen production increased with increasing voltage. The results also showed that interaction effects of plasma exposure time and voltage significantly affected malondialdehyde, ascorbate peroxidase, soluble sugar content and root length . Also, the effect of plasma treatment time had a significant effect on seed protein percent. The amount of malondialdehyde was decreased significantly by 35% in plasma treatment for 5 minutes at a voltage of 7 KV compared to control. Also, The amount of ascorbate peroxidase increased significantly by 10% in plasma treatment for 5 min at a voltage of 7 kV compared to control . The percentage of soluble sugar increased significantly by 48% in plasma treatment for 5 min at a voltage of 7 kV compared to control. The percentage of Protein was also increased significantly by 20% in plasma treatment for 4-minute treatment of plasma compared to control. According to the results of this study, the time of five minutes of plasma radiations with a voltage of 7 KV had the greatest effect on most of the studied traits .

Keywords: improve plant growth, dielectric barrier discharge, an enzyme changes, rapeseed.



Faculty of Physics and Nuclear Engineering
M.Sc.Thesis in Atomic and Molecular Physics

**Evaluating the effects of different parameters of cold plasma on germination and
physiological characteristics of seed and seedling of rapeseed**

(Brassica napus)

By: Rezvan Dehghani

Supervisors:

Dr. M. Momeni

Dr. H. Makarian

June 2019