

مقایسه و بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های پلاسمای سرد بر روی شاخص‌های جوانه‌زنی بذر نخود

محسن فریدونی^۱، حسین حاجی آقاعلیزاده^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲. دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲)

چکیده

یکی از فناوری‌های به کار رفته در بهبود جوانه‌زنی بذر، استفاده از پلاسمای سرد است. پلاسمای سرد در فشار جوی یا خلاء با استفاده از تخلیه الکتریکی در گاز با فشار پایین ایجاد می‌شود. به منظور بررسی تأثیر دو سامانه تولید پلاسمای سرد بر بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی بذر نخود از ارقام عادل، منصور و آزاد در سه زمان مواجهه با پلاسمای ۳۰ و ۶۰ ثانیه به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تیمار پلاسمای سرد به روش کرونا در مواجهه ۳۰ ثانیه، موجب افزایش معنی‌داری در طول ریشه‌چه در ارقام عادل و منصور در مقایسه با تیمار شاهد گردید. همچنین تیمار مذکور در مواجهه ۳۰ ثانیه سبب بهبود بینه بذر در ارقام عادل و منصور به ترتیب به میزان ۳۵٪ و ۴۱٪ نسبت به شاهد شده و طول ریشه‌چه در تیمار ۳۰ ثانیه به روش کرونا در ارقام عادل، منصور و آزاد به ترتیب به میزان ۳۸٪، ۴۲٪ و ۲٪ نسبت به شاهد افزایش یافت. از طرفی در روش سددی الکتریک صرفاً در شاخص طول ریشه‌چه، در رقم آزاد و در مواجهه ۶۰ ثانیه با پلاسمای سرد افزایش ۲۵٪ نسبت به شاهد مشاهده گردید. بنابراین اثر مثبت قابل توجهی در افزایش بینه بذر و طول ریشه بذر ارقام نخود مورد آزمایش در تیمار پلاسمای سرد به روش کرونا نسبت به شاهد مشاهده گردید در حالی که روش سددی الکتریک دارای یکنواختی بیشتری در تیمارها نسبت به روش تخلیه کرونا بود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم مورچگان، دی الکتریک، کرونا، جوانه‌زنی، نخود

Comparison and optimization of performance of cold plasma systems on chickpea seed germination indices

M. Fereydooni¹, H. Haji Agha Alizadeh^{2*}

1. PhD student Of Department of Biosystem, Faculty of Agriculture, BuAli Sina University, Hamedan, Iran

2. Associate Professor of Department of Biosystem, Faculty of Agriculture, BuAli Sina University, Hamedan, Iran

(Received: Jul. 08, 2021 – Accepted: Nov. 13, 2021)

Abstract

One of the technologies used to improve seed germination is use of cold plasma. Cold plasma is created at atmospheric pressure or vacuum by using electrical discharge in low pressure gas. In order to investigate the effect of two cold plasma production systems on improving the germination indices of chickpea seeds from Adel, Mansour and Azad cultivars in three plasma exposure times of 0, 30 and 60 seconds, they were studied in a completely randomized factorial design. The results showed that cold plasma treatment by corona method at 30 seconds exposure caused a significant increase in the root length index compared to the control treatment in Adel and Mansour varieties. Also, cold plasma treatment by corona method in 30 seconds of exposure caused improvement in seed vigor in Adel and Mansour varieties, respectively, by 35% and 41% compared to the control and root length in 30 seconds corona treatment in Adel, Mansour and Azad varieties, respectively increased by 38%, 42% and 2% compared to the control. On the other hand, in the barrier method, only in the root length index, in Azad variety and in exposure to cold plasma for 60 seconds, 25% increase was observed compared to the control. Therefore a significant positive effect on increasing seed vigor and root length of chickpea varieties tested in cold plasma treatment by corona method compared to the control, while the barrier dielectric method has more uniformity in the treatments than corona method.

Keywords: ACO, Corona, Dielectric, Germination, Chickpea

* Email: h-alizade@basu.ac.ir

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت جهان، نیاز به تأمین مواد غذایی بیشتر وجود دارد. از طرف دیگر، نقش فناوری‌های جدید در افزایش سلامت و تولید سهم قابل توجهی دارد. از پلاسما اغلب به عنوان حالت چهارم ماده یاد می‌شود. سطح انرژی از جامد به مایع و گاز، و در نهایت به حالت یونیزه پلاسما افزایش می‌یابد. حالت‌های معمول برای تولید پلاسما سرد به ترتیب در فشار جوی و خلاء استفاده از تخلیه الکتریکی سددی الکتریک و کرونا می‌باشد. تخلیه کرونا زمانی تشکیل می‌شود که ناهمگونی‌های مکانی در میدان الکتریکی وجود داشته باشد و معمولاً برای این منظور از الکترودهای بسیار نامتقارن نقطه و صفحه استفاده می‌شود. در حالی که در حالت تخلیه سددی الکتریک بدون نیاز به میدان الکتریکی ناهمگن و با پوشاندن یک یا هر دو الکترودها با ماده دی الکتریک پلاسما تولید می‌شود. مطالعات زیادی در زمینه بهینه‌سازی رشد اولیه بذر و پلاسما سرد انجام شده است. پلاسما بر پایه تخلیه سد دی الکتریک میکروارگانسیم‌های روی بذرهای جوانه‌زده را غیرفعال نمود (Butscher et al., 2016). اثر تیمار جت پلاسما تخلیه کرونا بر ضد عفونی و جوانه‌زدن بذر کلزا مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق مذکور، کاهش قابل توجه تا ۹۹٪ در میکروبه‌های بذرهای جوانه‌زده تحت تأثیر تیمار پلاسما سرد بر پایه تخلیه کرونا در مواجهه با پلاسما برای مدت زمان ۲ دقیقه به دست آمد. از طرفی خواص فیزیکی و شیمیایی جوانه‌های بذر تحت تأثیر تیمار پلاسما سرد قرار نگرفت (Puligundla et al., 2017). جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بذرهای زیره سبز با استفاده از پلاسما سرد مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش درصد جوانه‌زنی در ۳ دقیقه مواجهه با پلاسما سرد ۲ کیلوولت در روز چهاردهم از ۴۲٪ به ۷۴٪ افزایش یافت (Shashikanthalu et al., 2020). تأثیر پلاسما سرد بر

فعالیت آنزیمی در جوانه‌زدن لوبیای سبز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که پلاسما سرد به طور معنی‌داری سرعت جوانه‌زنی را به میزان ۲/۳۶٪، طول ریشه‌چه را ۲۰٪ و آبدوستی بذر را ۱۰۲٪ نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش داد (Sadhu et al., 2017). تأثیر پلاسما سرد دما پایین بر پایه تخلیه سد دی الکتریک بر اصلاح سطح بذر، جذب آب توسط بذرهای در زمان‌های مواجهه از ۶۰ تا ۶۰۰ ثانیه بر روی بذر نخود مورد بررسی قرار گرفته است (Stolarik et al., 2015). از طرفی الگوریتم مورچگان یک روش بهینه‌سازی است که می‌تواند در متغیرهای گسسته و پیوسته اجرا شود. پس از اثبات کاربرد اولیه این مفهوم در مورد مسأله فروشنده دوره‌گرد، این الگوریتم برای بسیاری دیگر از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی اعمال شد (Socha and Dorigo, 2008). در یک مطالعه کامل، پیش‌بینی سختی گندم بر اساس تجزیه فراطیفی مادون قرمز با الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان بررسی شد (Zhang et al., 2017). از آنجایی که محصول نخود غالباً به صورت دیم کشت می‌شود، بنابراین افزایش رشد ریشه‌چه و استقرار اولیه در این محصول می‌تواند از نظر بهبود ویژگی‌های گیاه از جمله گسترش بیشتر و بهتر ریشه‌چه، افزایش جذب و نفوذ آب به بذر، جذب عناصر غذایی و افزایش تحمل و مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی مؤثر باشد. اما تاکنون هیچ تحقیقی برای بررسی تأثیر پلاسما سرد بر پایه تخلیه کرونا بر روی رشد ریشه‌چه نخود انجام نشده است. از سوی دیگر، اندازه‌گیری تعدادی از متغیرها در تولید پلاسما سرد پیچیده است، در حالی که استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ساده، پر سرعت و کم‌هزینه است. در این پژوهش، ضمن بررسی تأثیر پلاسما سرد بر پایه تخلیه کرونا و سددی الکتریک بر رشد ریشه‌چه نخود رقم آزاد، عملکرد دو سیستم تولید پلاسما سرد بر پایه تخلیه کرونا و سد دی الکتریک با استفاده از الگوریتم مورچگان نیز مقایسه شد.

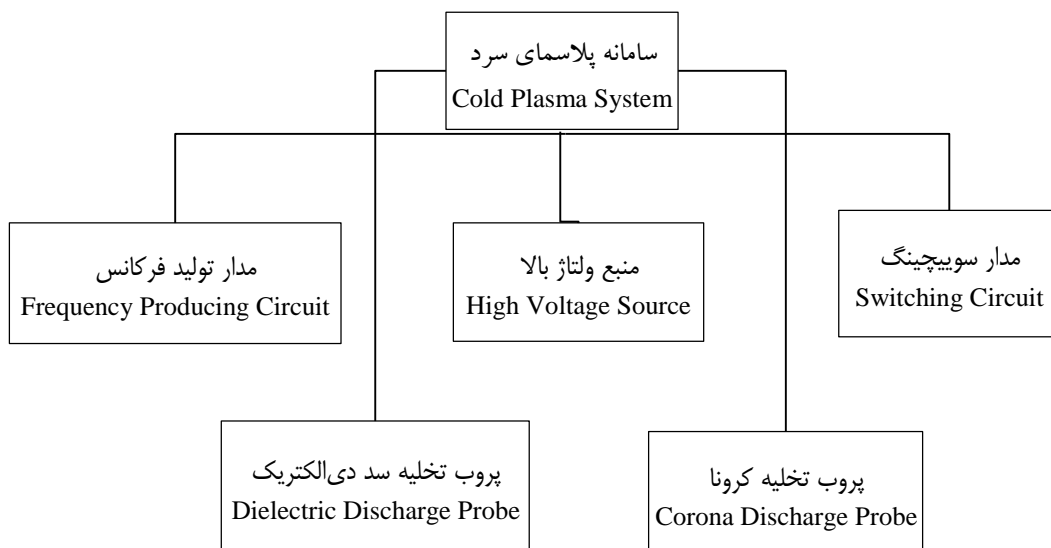
مواد و روش‌ها

شدند. در طول مدت آزمایش تعداد بذور جوانه‌زده به طور روزانه ثبت گردید.

سامانه پلاسمای سرد

سامانه پلاسمای سرد بر اساس دو روش تخلیه کرونای خلاء و تخلیه سد دی‌الکتریک طراحی گردید. در هر یک از این سیستم‌ها، از منبع ولتاژ بالا، تولید کننده فرکانس و مدار سوئیچینگ استفاده گردید. در این سیستم ولتاژ از ۲۲۰ ولت به ۱۲ کیلو ولت و فرکانس از ۵۰ هرتز به ۹ کیلوهرتز تغییر می‌یابد. تخلیه سد دی‌الکتریک، که بعضی اوقات تخلیه خاموش نامیده می‌شود، روشی برای تولید پلاسمای سرد است که در حالت طبیعی از شکست جریان، بدون نیاز به میدان الکتریکی ناهمگن به وجود می‌آید (Kogelschatz, 2003). در نتیجه جریان قادر به تبدیل شدن به قوس نیست و اثر متوسط شکست جریان این است که گاز بین الکترودها را در معرض یک پلاسمای غیرتعادلی یکنواخت قرار می‌دهد (Misra, 2016). اجزای اصلی سامانه تولید پلاسمای سرد به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای انجام این آزمایش، بذر مادری نخود از سه رقم عادل، منصور و آزاد تولید سال ۱۳۹۹ از عاملیت توزیع بذر مادری تحت نظارت جهاد کشاورزی استان کرمانشاه تهیه گردید. به منظور بررسی اثر تیمار پلاسمای سرد با بذر در زمان‌های مواجهه ۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه در مقایسه با نمونه شاهد از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار استفاده شد. در این تحقیق هر واحد آزمایشی از ۲۵ عدد بذر از هر یک از ارقام مورد آزمایش به صورت کاملاً تصادفی انتخاب گردید. پس از تیمار نمونه‌های مورد آزمایش با پلاسمای سرد در دو حالت مواجهه خشک و مرطوب، جوانه‌زنی بذور در محیط آزمایشگاهی و بر اساس روش انجمن بین‌المللی آزمون بذر^۱ مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا بذرها توسط محلول هیپوکلریت سدیم ۰.۵٪ ضد عفونی و با آب مقطر شستشو داده شدند. هر واحد آزمایشی از بذرها در بین ۲ لایه کاغذ صافی استریل شده در پتری‌دیش قرار داده شد. سپس بذرها به ژریناتور منتقل شدند و تحت دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داده



شکل ۱- نمودار کلی سامانه پلاسمای سرد

Fig. 1- Schematic diagram of cold plasma reactor

1. ISTA (International Seed Testing Association)

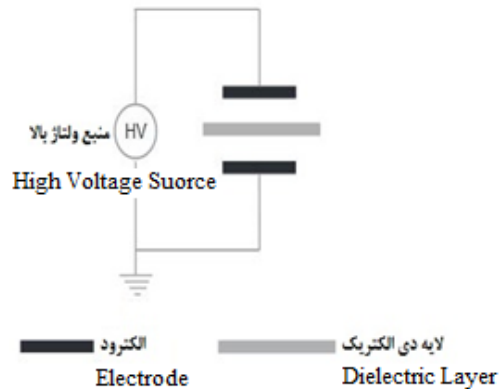
سامانه تخلیه سد دی‌الکتریک برای سیستم پلاسمای سرد

در این روش، مطابق دیاگرام شکل زیر از یک لایه دی‌الکتریک در بین دو الکتروود فلزی استفاده شد (Misra, 2016). الکتروود فوقانی به صورت توری فلزی

مشبک در نظر گرفته شد و نمونه‌ها بر روی آن قرار گرفت. دی‌الکتریک استفاده شده نیز از جنس شیشه عایق انتخاب گردید. دیاگرام و تصویر این سامانه در شکل ۲ نشان داده شده است.



(a)



(b)

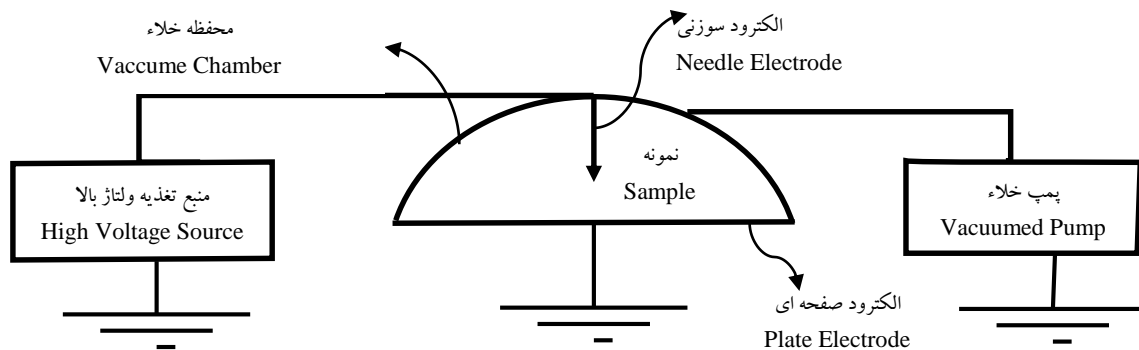
شکل ۲- سامانه پلاسمای سرد بر اساس سد دی‌الکتریک

Fig. 2- Cold plasma reactor based on dielectric barrier

سامانه تخلیه کرونا برای سیستم پلاسمای سرد

تخلیه کرونا، پلاسمای غیرتعادلی یونیزه‌ای بر اساس مکانیسم بهمین الکترونی ایجاد می‌کند. اگر فاصله الکتروودهای رسانا کاهش یابد یا میدان الکتریکی را افزایش دهیم، می‌توان جریان‌های تجزیه طولانی‌تری ایجاد کرد که در نهایت جرقه ایجاد می‌شود. تخلیه تابان دارای

چگالی جریان نسبتاً کمی است و برای پلاسمای غیرحرارتی معمول است. در پروب تخلیه کرونا از الکتروودهای سوزنی و صفحه‌ای استفاده شد. طرحواره اولیه سامانه پلاسمای سرد مبتنی بر تخلیه کرونا و تصویر سامانه استفاده شده در این آزمایش به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- طرحواره سامانه پلاسمای سرد بر اساس تخلیه کرونا

Fig. 3- Schematic of Cold plasma reactor based on corona discharge



شکل ۴- سامانه پلاسمای سرد بر اساس تخلیه کرونا

Fig. 4- Cold plasma reactor based on corona discharge

است و دارای حساسیت ۱ ولت بر متر تا ۲۰۰ کیلو ولت بر متر در میدان الکتریکی و ۰,۱ میلی گاوس تا ۲۰ گاوس در میدان مغناطیسی است. شدت میدان الکتریکی در طول آزمایش ۱۲ کیلوولت بر متر و میدان مغناطیسی ۱۵ میلی گاوس بود (Company, 2016). تصویر دستگاه اندازه گیری مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۵ نشان داده است.

اندازه گیری میدان های الکتریکی و مغناطیسی
با توجه به این که تولید پلاسمای سرد در ولتاژ و فاصله الکترودهای مختلفی که منجر به تولید میدان های الکتریکی و مغناطیسی متفاوتی می گردند، انجام می گیرد، بنابراین در این پژوهش برای ارزیابی میدان های الکتریکی و مغناطیسی از این ابزار استفاده شد. این دستگاه دارای دو سنسور قابل انتخاب برای اندازه گیری میدان های الکتریکی و مغناطیسی



شکل ۵- دستگاه اندازه گیری میدان های الکتریکی و مغناطیسی

Fig. 5- HI-3604 Survey Meter

کند. از طرفی در مقایسه عملکرد دو روش تولید پلاسمای سرد، اندازه گیری تعدادی از متغیرها پیچیده است، در حالی که استفاده از روش های بهینه سازی ساده، بر سرعت و کم هزینه است. بنابراین در این پژوهش از دو روش آماری و الگوریتم بهینه سازی در کنار یکدیگر استفاده شده است. یکی از راه های تصمیم گیری بدون محاسبه

الگوریتم بهینه سازی مورچگان
طرح آماری بر اساس داده های واقعی، امکان تحلیل را فراهم می کند، در حالی که الگوریتم بهینه سازی استفاده شده می تواند با دقت خوبی امکان تحلیل را در نقاطی خارج از داده های واقعی که ممکن است محدودیت هایی از قبیل اندازه گیری متغیرها وجود داشته باشد را پیش بینی

که مورچه‌ها از هوش ازدحامی برای انتخاب مسیر غذایی خود استفاده می‌کنند، در این مطالعه سعی شده بهترین روش برای رشد ریشه نخود از بین دو روش پیشنهادی انتخاب شود. مراحل مختلف الگوریتم عبارتند از: آماده‌سازی، ایجاد و ارزیابی راه حل، به روزرسانی فرمون و شرایط خاتمه.

مرحله آماده‌سازی

این مرحله شامل تعریف مسئله، تعداد مورچه‌ها و آماده‌سازی فضا برای ذخیره اطلاعات است. این مفاهیم در جدول ۱ آورده شده است:

متغیرهای خاص، مدل‌سازی و تعیین خروجی بر اساس تخمین و بهینه‌سازی است. از طرفی عملکرد این سیستم‌ها از روابط خطی پیروی نمی‌کند و رفتار کلی یک مجموعه ازدحامی به گونه غیرخطی از هم آمیختگی رفتارهای تک تک اجتماع به دست می‌آید. مبنای هوش ازدحامی، استفاده از مجموعه‌ای سازمان‌یافته از موجوداتی است که با یکدیگر در یافتن نتیجه مطلوب همکاری می‌کنند. هوش ازدحامی زیرمجموعه‌ای از هوش محاسباتی است. در این روش، توانایی جمعی به توانایی فردی برتری دارد. خودسازمانی و جریان اطلاعات از مؤلفه‌های اصلی هوش ازدحامی هستند (Socha and Dorigo, 2008). از آنجایی

جدول ۱- پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان

Table 1- Parameters of ant colony optimization algorithm

مؤلفه‌های الگوریتم Algorithm Parameters	نماد
فرمون اولیه Primary Phermone	τ_0
ماتریس فرمون Phermone Matrix	T
نرخ تبخیر Evaporate Rate	P
وزن نمایی فرمون Phermone Expontional weight	A
وزن نمایی اکتشافی Exporal Expontional Weight	B
آرایه ای برای نگه داشتن بهترین مقادیر هزینه Array For Saving Best Cost	Best cost

پلاسمای، مسیر بین این نقاط را با استفاده از تابع ریاضی زیر نشان می‌دهیم:

$$L(t) = L_{max} [1 - \exp(-b \cdot t)^c] \quad (1)$$

که در آن، $L(t)$ طول ریشه (میلی‌متر) و L_{max} بیشینه طول ریشه (میلی‌متر)، b و c مقادیر ثابت و t زمان رشد ریشه (روز) است (Raveneau et al., 2011).

مرحله ایجاد و ارزیابی راه‌حل

این مرحله برای هر یک از مورچه‌ها دنبال می‌شود. نقطه صفر مواجهه با پلاسمای سرد را به عنوان نقطه آغاز مسیر در نظر می‌گیریم. سپس، میزان طول ریشه در بذر نخود را در مواجهه با پلاسمای به مدت ۳۰ و ۶۰ ثانیه به عنوان نقاط مقصد در هر دو روش کرونا و دی‌الکترونیک انتخاب می‌کنیم. اکنون در هر یک از روش‌های تولید

$$G = \frac{N}{N_t} \times 100 \quad (2)$$

که در آن

N : تعداد بذرهاى جوانه زده در هر ظرف و N_t : تعداد

کل بذرها در هر ظرف است.

سرعت جوانه‌زنى برای بذور بر اساس معادله زیر

محاسبه شد (Amnuaysin et al., 2018):

$$G_i = \sum \frac{G_t}{D_t} \quad (3)$$

که در آن:

G_i : تعداد بذرهاى جوانه‌زده در روز و D_t : تعداد روزهاى

جوانه‌زنى است.

شاخص بنیه بذر:

$$V_i = \frac{L_s \times G}{100} \quad (4)$$

که در آن

V_i : شاخص بنیه بذر، G : درصد جوانه‌زنى و

L_s : میانگین طول گیاهچه (مجموع ساقه‌چه و ریشه‌چه)

است (Abdulbaki and Anderson, 1973).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس آزمایش فاکتوریل با متغیر وابسته طول ریشه‌چه، فاکتورهای مختلف و اثر متقابل آنها در جدول ۲ نشان داده شده است. از طرفی تیمار پلاسماى سرد بر سرعت و درصد جوانه‌زنى در هر دو روش افزایش قابل توجهی نسبت به شاهد و سایر تیمارها نداشت. همچنین نمونه‌های دارای مواجهه مرطوب با پلاسماى سرد در هر دو روش دارای اختلاف معنی‌داری در سطح ۱٪ نسبت به شاهد در بهبود شاخص طول ریشه‌چه داشته است. مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه بذر نخود نسبت به تیمارهای زمان مواجهه با پلاسماى سرد بر پایه تخلیه کرونا در جدول ۳ صورت گرفته است.

به منظور ارزیابی الگوریتم، باید تابع رشد ریشه تعریف شده را به بیشینه کنیم. در این پژوهش، بهینه‌سازی تابع طول ریشه را براساس مسأله کوله‌پشتی انجام داده و مقدار بحرانی، طول ریشه بذر شاهد در نظر گرفته شد. مقدار باینری صفر به این معنی است که نمونه مورد نظر انتخاب نشده است و مقدار ۱ به معنای انتخاب آن است.

مرحله به‌روزرسانی فرمون

هر مورچه در مسیری که طی کرده فرمون می‌ریزد. به این فرآیند به‌روزرسانی فرمون گفته می‌شود. از طرف دیگر، فرمون‌های تمام مسیرها به دلیل تبخیر کاهش می‌یابد. ضرایب وزنی تبخیر فرمون با توجه به تأثیر هر روش تولید پلاسما، بر روی رشد ریشه‌چه در الگوریتم اعمال شد.

مرحله شرایط خاتمه

در این تحقیق، شرط خاتمه الگوریتم را تعداد تکرارها قرار دادیم. پس از ۳۰۰ تکرار، الگوریتم متوقف گردید. در صورت عدم تحقق شرایط خاتمه، الگوریتم از مرحله دوم تکرار می‌شود.

در این الگوریتم هر مورچه حرکت خود را از نقطه شروع آغاز می‌کند. در راستای افقی، بین نقاط شروع و پایان زمان مواجهه نمونه‌ها با پلاسماى سرد قرار دارد. این زمان بین ۰ تا ۶۰ ثانیه تغییر می‌کند. اعداد تصادفی در این محدوده تولید شده و با استفاده از معادله ۱، مقادیر طول ریشه در هر گره محاسبه شد. محاسبات در هر لایه مخفی در مواجهه با پلاسما در ۳ تکرار انجام شد. در این آزمایش ۲۰ لایه پنهان برای مدت زمان مواجهه با پلاسما در نظر گرفته شد.

شاخص‌های جوانه‌زنى نیز با استفاده از روابط زیر محاسبه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام شد:

درصد جوانه‌زنى برای بذرهاى موجود در هر ظرف بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی

Table 2- Factorial analysis of variance analysis table (Mean-squares) in a completely randomized design

منبع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination Rate	بنیه بذر Seed Vigour	طول ریشه‌چه Root Length
مواجهه Exposure	2	4.525 ^{ns}	2.230 ^{ns}	118.424 ^{**}	1840.097 ^{**}
رطوبت Moisture	1	79.053 ^{ns}	0.650 ^{ns}	0.594 ^{ns}	142.617 ^{**}
رقم Variety	2	33.790 ^{ns}	2.40 ^{ns}	1664.668 ^{**}	1594.727 ^{**}
مواجهه * رطوبت Exposure * Moisture	2	10.940 ^{ns}	0.80 ^{ns}	22.523 ^{**}	1198.103 ^{**}
مواجهه * رقم Exposure * Variety	4	9.480 ^{ns}	0.90 ^{ns}	393.572 ^{**}	186.005 ^{**}
رطوبت * رقم Moisture * Variety	2	19.520 ^{ns}	1.230 ^{ns}	13.128 ^{**}	249.659 ^{**}
مواجهه * رطوبت * رقم Exposure * Moisture * Variety	4	4.780 ^{ns}	0.30 ^{ns}	113.603 ^{**}	22.534 ^{**}
خطا Error	36	23.39	1.23	1.154	2.001
ضریب تغییرات CV (%)		4.93	12.32	8.50	10.90

** : وجود اختلاف معنی دار در سطح ۱٪ / ns: عدم وجود اختلاف معنی دار

** : Significant difference at the 1% level

ns: No Significant difference

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین تأثیر پلاسمای سرد کرونا بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر نخود

Table 3- Results of average comparing of corona cold plasma effect on chickpea seed germination indices

ارقام Variety	تیمار Treatment	بنیه بذر Seed Vigour	طول ریشه‌چه (میلی‌متر) Root Length (mm)
عادل Adel	بدون مواجهه با پلاسما (شاهد) Control	13.18	13.18
	مواجهه ۳۰ ثانیه با پلاسمای سرد 30 Second cold plasma exposure	17.89	18.25
	مواجهه ۶۰ ثانیه با پلاسمای سرد 60 Second cold plasma exposure	13.64	13.83
منصور Mansur	بدون مواجهه با پلاسما (شاهد) Control	8.55	9.07
	مواجهه ۳۰ ثانیه با پلاسمای سرد 30 Second cold plasma exposure	12.13	12.92
	مواجهه ۶۰ ثانیه با پلاسمای سرد 60 Second cold plasma exposure	12.26	12.26
آزاد Azad	بدون مواجهه با پلاسما (شاهد) Control	6.12	6.26
	مواجهه ۳۰ ثانیه با پلاسمای سرد 30 Second cold plasma exposure	8.90	9.47
	مواجهه ۶۰ ثانیه با پلاسمای سرد 60 Second cold plasma exposure	10.75	11.25

LSD (5%) = 4.74

مذکور مشاهده نگردید. مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه بذر نخود نسبت به تیمارهای زمان مواجهه با پلاسمای سرد بر پایه تخلیه سددی الکتریک در جدول ۴ نشان داده شده است.

بر اساس جدول ۳، میانگین طول ریشه چه در رقم عادل دارای مواجهه با پلاسمای سرد در روش کرونا به مدت زمان ۳۰ ثانیه به طور معنی داری بیشتر از شاهد است و در مدت زمان ۶۰ ثانیه مواجهه با پلاسمای سرد اختلاف معنی داری در طول ریشه چه نسبت به شاهد در روش های

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین تأثیر پلاسمای سرد دی الکتریک بر شاخص های جوانه زنی بذر نخود

Table 4- Results of average comparing of dielectric cold plasma effect on chickpea seed germination indices

ارقام Variety	تیمار Treatment	بنیه بذر Seed Vigour	طول ریشه چه (میلی متر) Root Length (mm)
	بدون مواجهه با پلاسما (شاهد) Control	13.18	13.18
عادل Adel	مواجهه ۳۰ ثانیه با پلاسمای سرد 30 Second cold plasma exposure	8.93	8.94
	مواجهه ۶۰ ثانیه با پلاسمای سرد 60 Second cold plasma exposure	7.57	7.83
	بدون مواجهه با پلاسما (شاهد) Control	8.55	9.07
منصور Mansur	مواجهه ۳۰ ثانیه با پلاسمای سرد 30 Second cold plasma exposure	4.13	4.53
	مواجهه ۶۰ ثانیه با پلاسمای سرد 60 Second cold plasma exposure	4.54	5.29
	بدون مواجهه با پلاسما (شاهد) Control	6.12	6.26
آزاد Azad	مواجهه ۳۰ ثانیه با پلاسمای سرد 30 Second cold plasma exposure	7.10	7.53
	مواجهه ۶۰ ثانیه با پلاسمای سرد 60 Second cold plasma exposure	11	11.54

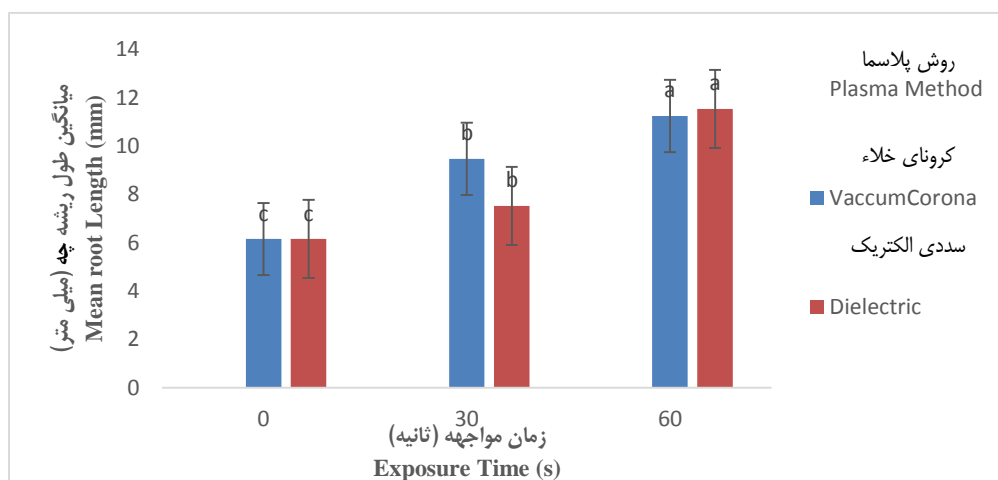
LSD (5%) = 3.64

یکنواختی تأثیر پلاسما بیشتر است. نتایج تأثیر پلاسمای سرد در روش های کرونا و سددی الکتریک بر طول ریشه چه نخود رقم آزاد، ۴۸ ساعت پس از مواجهه با پلاسمای سرد در شکل ۶ نشان داده شده است. برای تعیین مقادیر ثابت در تابع طول ریشه در هر یک از حالت های مورد آزمایش، ابتدا نمودار پراکندگی رسم و منحنی تابع طول ریشه بر آن برازش گردید. سپس با استفاده از محیط بهینه سازی نرم افزار اکسل مقادیر ثابت به

در مقایسه تیمارها در جدول های ۳ و ۴ مشاهده می گردد که در شاخص های جوانه زنی ذکر شده در مواجهه ارقام مورد آزمایش با پلاسمای سرد به روش کرونا، تغییرات مثبت و مؤثرتری نسبت به روش دی الکتریک ایجاد شده است و این موضوع با نحوه تأثیر پلاسما بر نمونه در روش های مورد استفاده همخوانی دارد. به طوری که در روش کرونا پلاسما به صورت نقطه ای بر نمونه وارد می شود در حالی که در روش سددی الکتریک

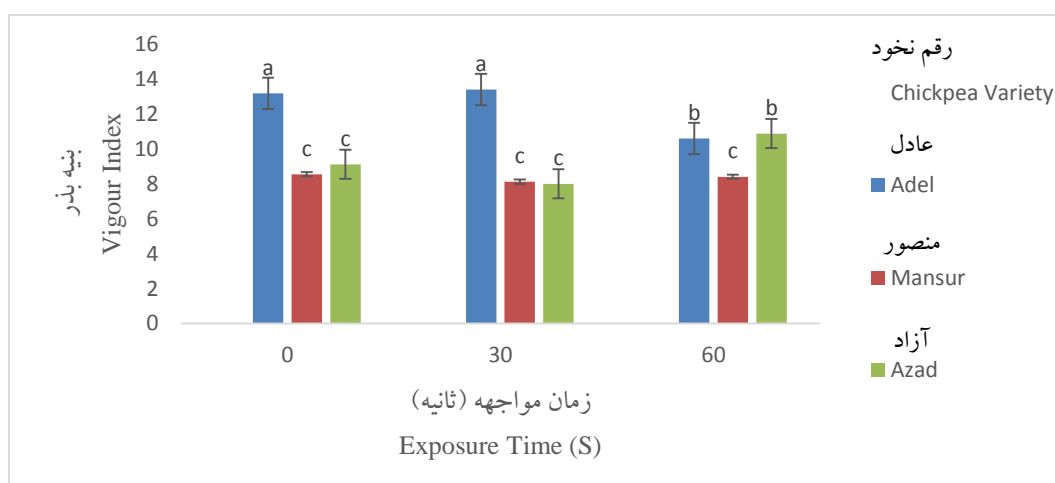
در تمامی موارد مورد بررسی در جدول‌های ۵ و ۶ مقدار ریشه خطای مربعات قابل قبول بوده و از میانگین واقعی کمتر است. همچنین بر اساس داده‌های به دست آمده از جدول‌های مذکور، نمونه‌هایی که به صورت خشک مورد تیمار و بررسی قرار گرفته‌اند، طول ریشه‌چه بیشتری را نسبت به نمونه‌های مرطوب ایجاد کرده‌اند.

نحوی محاسبه شد که مقدار مجموع مربعات ناشی از رگرسیون کمینه گردد. این کار برای تولید پلاسمای سرد به روش‌های کرونا و سددی‌الکتریک به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. پارامترها و مقادیر تعیین شده در هر یک از حالت‌های آزمایش برای نمونه‌های دارای مواجهه خشک با پلاسمای سرد در جدول ۵ بیان شده است.



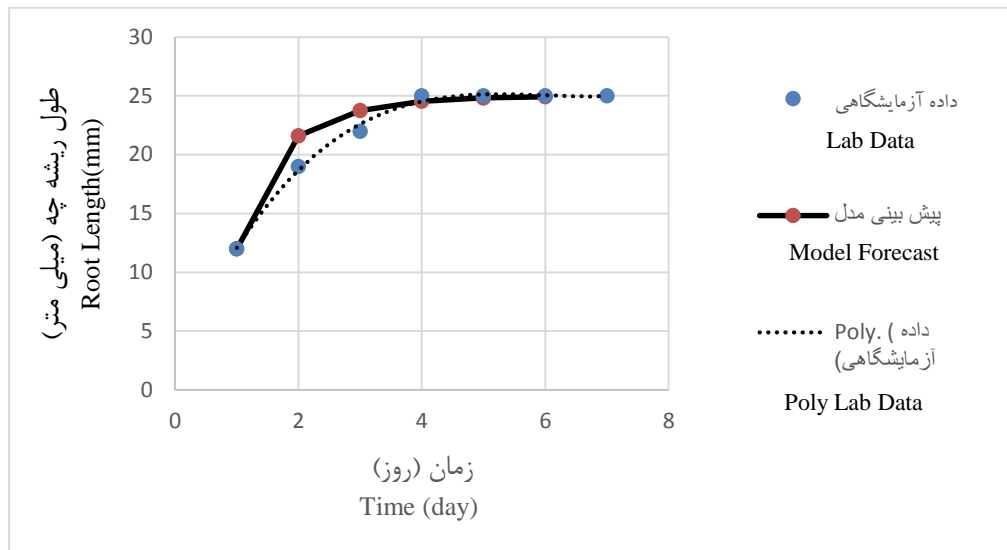
شکل ۶- تأثیر پلاسمای سرد بر طول ریشه‌چه نخود رقم آزاد

Fig. 6- Effect of cold plasma on root length of Azad chickpea variety



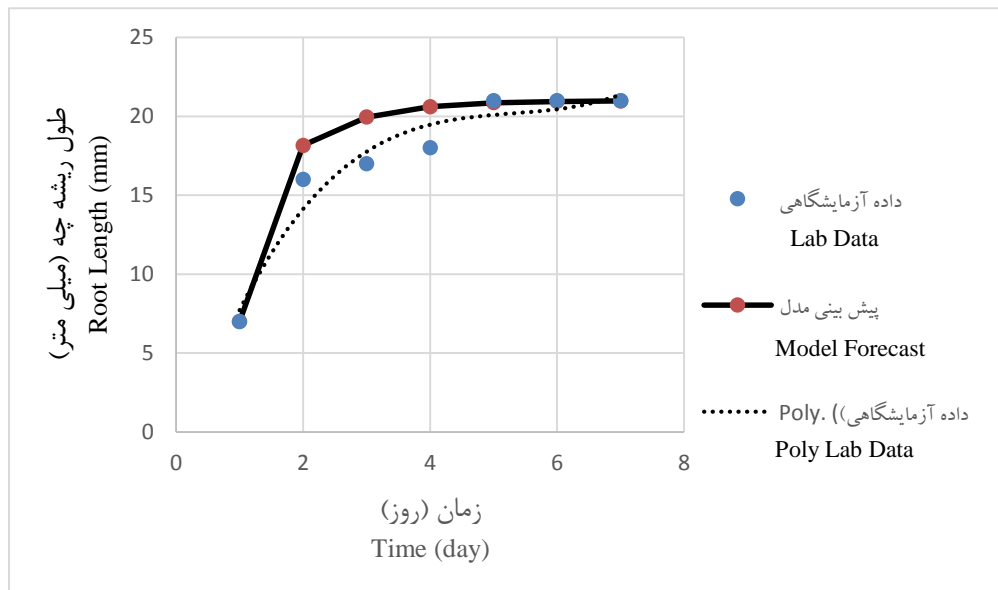
شکل ۷- تأثیر پلاسمای سرد بر شاخص بینه بذرارقام نخود

Fig. 7- Effect of cold plasma on vigour index of chickpea varieties



شکل ۸- برازش منحنی بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی طول ریشه‌چه و زمان مواجهه در روش کرونا

Fig. 8- Curve fitting between laboratory data and predicting root length and exposure time in the corona method



شکل ۹- برازش منحنی بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی طول ریشه‌چه و زمان مواجهه در روش دی‌الکتریک

Fig. 9- Curve fitting between laboratory data and predicting root length and exposure time in the dielectric method

گردید. نتایج مقایسه روش‌های کرونا و دی‌الکتریک به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶، مشاهده می‌شود که طول ریشه‌چه نخود رقم آزاد در مواجهه با پلاسما به روش کرونا به مدت ۳۰ ثانیه، تا ۵۰٪ افزایش یافت، در حالی که این مقدار در روش

پارامترها و مقادیر تعیین شده در هر یک از حالت‌های آزمایش برای نمونه‌های دارای مواجهه مرطوب با پلاسمای سرد در جدول ۶ بیان شده است. پس از استخراج معادله ریاضی بین متغیر طول ریشه‌چه و زمان مواجهه با پلاسما، برنامه الگوریتم مورچگان اجرا

نفوذپذیری آب به بذر می‌گردد. همچنین پیش‌ تیمار پلاسمای سرد بر پایه تخلیه سد دی‌الکتریک باعث ایجاد تغییرات هورمونی درون‌زا شده و موجب افزایش درصد جوانه‌زنی و پارامتر رشد شامل طول ریشه‌چه در بذر نخود گردید که با زمان مواجهه با پلاسما ارتباط دارد (Stolarik *et al.*, 2015).

دی‌الکتریک به ۱۶٪ می‌رسد. به عبارت دیگر، مدت زمان مواجهه با پلاسما تأثیر متفاوتی در دو روش تولید پلاسما بر افزایش طول ریشه‌چه دارد. با افزایش زمان مواجهه، تأثیر مثبت تقریباً در دو روش یکسان است. بر اساس نتایج سایر مطالعات، پلاسمای سرد تغییرات قابل توجهی در سطح بذر ایجاد کرده که موجب

جدول ۵- پارامترهای برآورد شده در مدل گمپرتز در بررسی اثر پلاسمای سرد بر افزایش طول ریشه‌چه بذر خشک نخود رقم آزاد

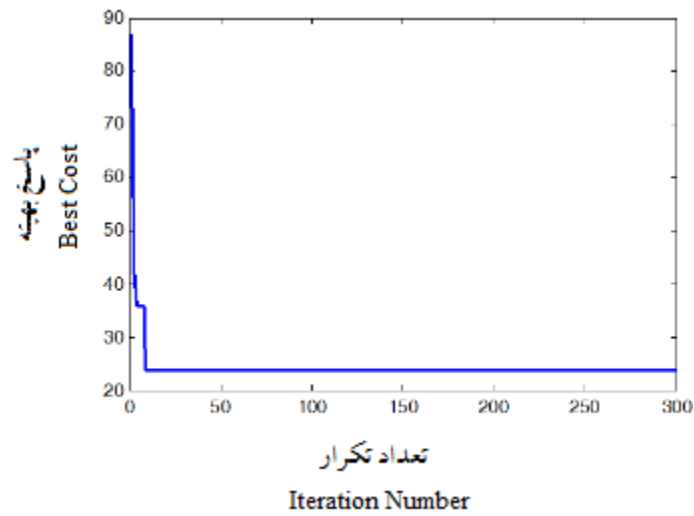
Table 4- Estimated parameters of Gompertz model in investigating the effect of cold plasma on root length of dry Azad chickpea variety seed

نمونه پیش‌ تیمار شده Treatment Sample	زمان مواجهه Exposure Time	متوسط طول ریشه‌چه چه پیش‌بینی شده Predicted Root Length	متوسط طول ریشه‌چه اندازه‌گیری شده Measured Root Length	مقدار ثابت b	مقدار ثابت c	ریشه خطای مربعات RMSE	ضریب تبیین R ²
شاهد Control	0	25.23	20.86	0.29	0.36	6.18	0.90
کرونا Corona	30	21.17	21.86	0.68	0.97	0.88	0.53
دی‌الکتریک Dielectric	30	18.36	17.28	0.64	0.64	4.49	0.72
کرونا Corona	60	18.21	18.42	0.71	0.71	3.07	0.80
دی‌الکتریک Dielectric	60	26.10	26.28	1.36	0.26	3.69	0.83

جدول ۶- پارامترهای برآورد شده در مدل گمپرتز در بررسی اثر پلاسمای سرد بر افزایش طول ریشه‌چه بذر مرطوب نخود رقم آزاد

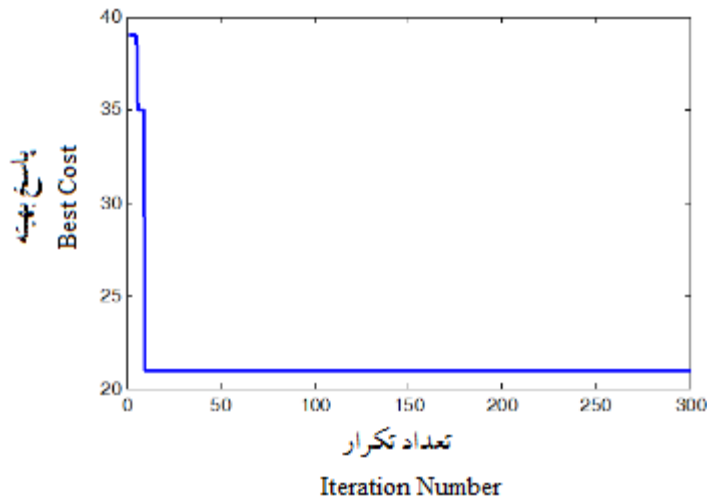
Table 5- Estimated parameters of Gompertz model in investigating the effect of cold plasma on root length of wet Azad chickpea variety seed

نمونه پیش‌ تیمار شده Treatment Sample	زمان مواجهه Exposure Time	متوسط طول ریشه‌چه پیش‌بینی شده Predicted Root Length	متوسط طول ریشه‌چه اندازه‌گیری شده Measured Root Length	مقدار ثابت b	مقدار ثابت c	ریشه خطای مربعات RMSE	ضریب تبیین R ²
شاهد Control	0	14.67	14.85	0.64	0.64	2.78	0.76
کرونا Corona	30	18.34	16.71	0.76	0.76	2.71	0.79
دی‌الکتریک Dielectric	30	13.00	12.80	0.66	0.66	1.45	0.61
کرونا Corona	60	8.56	8.71	0.83	0.83	1.38	0.66
دی‌الکتریک Dielectric	60	12.11	12.28	0.74	0.74	1.88	0.71



شکل ۱۰- نتیجه بهینه‌سازی طول ریشه‌چه در روش کرونا

Fig. 9- Result of root length optimization in corona method



شکل ۱۱- نتیجه بهینه‌سازی طول ریشه در روش دی‌الکتریک

Fig. 11- Result of root length optimization in dielectric method

کرونا مدل در مقادیر بیشتری همگرا شده است و مقادیر بیشتری را در طول ریشه‌چه ایجاد کرده است. در تکرار بیش از ۲۰ مرتبه، هر دو روش به سمت یک عدد واحد در مجموع طول ریشه‌چه همگرا گردیده‌اند. بنابراین افزایش طول ریشه‌چه در روش کرونا و یکنواختی عملکرد در روش دی‌الکتریک مشهود می‌باشد.

همانگونه که تحقیقات گذشته نشان داده است پلاسما

نتیجه مدل‌سازی انجام شده، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. در این دو نمودار، طول ریشه‌چه به عنوان پاسخ بهینه در محور عمودی و تعداد تکرار در محور افقی نمایش داده شده است. مدل معرفی شده در روش دی‌الکتریک یکنواخت‌تر از روش کرونا همگرا شده است و این می‌تواند بیانگر یکنواختی عملکرد در این روش باشد که با اساس کارکرد آن همخوانی دارد. از طرفی در روش

تأثیر کمی بر میزان جوانه‌زنی بذر گندم داشته، اما بر پارامترهای رشد مانند طول ریشه‌چه در مقایسه با شاهد تأثیرگذار بوده و طول بیشتری تا ۱,۲ برابر ایجاد کرده است (Dobrin *et al.*, 2015).

همچنین اثر نوع روش تولید پلاسما بر جوانه‌زنی و رشد بذر بسیار مؤثر است و با افزایش زمان مواجهه بذر با پلاسما سرد اثر مهارکنندگی در جوانه‌زنی مشاهده می‌گردد (Sera *et al.*, 2012).

نتیجه‌گیری نهایی

پلاسما سرد در افزایش طول ریشه‌چه در بذر نخود مؤثر بوده است. رشد ریشه‌چه بذر ارقام نخود مورد آزمایش در مواجهه ۳۰ ثانیه با پلاسما سرد به روش کرونا، موجب افزایش طول ریشه بذر نسبت به شاهد با اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ گردید. همچنین طول

ریشه‌چه در نخود رقم آزاد در مدت زمان ۳۰ ثانیه مواجهه با پلاسما سرد در روش کرونا تا ۵۰٪ افزایش یافت، در حالی که این مقدار در روش دی‌الکتریک ۱۶٪ بود. استفاده از الگوریتم مورچگان برای مقایسه روش‌های دی‌الکتریک و کرونا در تولید پلاسما سرد مزایایی دارد. در نتیجه‌ی اجرای الگوریتم مورچگان در ۳۰۰ تکرار، مشخص شد که عملکرد ریشه‌چه بذر نخود در روش کرونا در هنگام مواجهه با پلاسما سرد طول ریشه‌چه بیشتری ایجاد کرده و این افزایش می‌تواند در جذب عناصر غذایی، بهبود تغذیه گیاه، افزایش تحمل و مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی مؤثر باشد. از طرفی روش تولید پلاسما سرد بر پایه تخلیه سد دی‌الکتریک دارای یکنواختی بیشتری در عملکرد می‌باشد. به طوری که تغییرات طول ریشه‌چه در رقم عادل و در مواجهه ۳۰ ثانیه با پلاسما سرد در روش کرونا به میزان ۲ برابر بیشتر از روش سد دی‌الکتریک است.

Reference

منابع

- Abdulbaki, A., and J. D. Anderson 1973.** Physiological and biological determination of seeds. Pp 283-310. In T.T. Kozlowskin (Ed). Seed biology. Academic Press, New York.
- Butscher, D., H. Van Loon, A. Waskow, P.R. von Rohr, and M. Schuppler. 2016.** Plasma inactivation of microorganisms on sprout seeds in a dielectric barrier discharge. Food Sci. 238: 222-232.
- Lindgren. 2016.** Survey meter HI model user manual.
- Dobrin, D., M. Magureanu, N.B. Mandache, and M.D. Ionita. 2015.** The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth. Food Sci. 29: 255-260.
- International Seed Testing Association (ISTA). 2003.** Handbook for seedling evaluation (3rd ed.). Published by ISTA, Switzerland.
- Kogelschatz, U. 2003.** Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. Plasma Chem Plasma P. 23(1): 1-46.
- Misra, N. N., O. Schlüter, and P.J. Cullen. 2016.** Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications. Elsevier, Netherlands.
- Puligundla, P., J.W. Kim, and C. Mok. 2017.** Effect of corona discharge plasma jet treatment on decontamination and sprouting of rapeseed (*Brassica napus L.*) seeds. Food Sci. 71: 376-382.
- Raveneau, M. P., F. Coste, P. Moreau-Valancogne, I. Lejeune-Henaut, and C. Durr. 2011.** Pea and bean germination and seedling responses to temperature and water potential. Seed Sci. 21(3): 205.
- Sadhu, S., R. Thirumdas, R.R. Deshmukh, and U.S. Annapure. 2017.** Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiate*). Lwt. 78: 97-104.

Šerá, B., I. Gajdová, M. Černák, B. Gavril, E. Hnatiuc, D. Kováčik, V. Kříha, J. Sláma, M. Šerý, and P. Špatenka. 2012. How various plasma sources may affect seed germination and growth. *Can. Agric. Eng.* 1365-1370.

Shashikanthalu, S. P., L. Ramireddy, and M. Radhakrishnan. 2020. Stimulation of the germination and seedling growth of *Cuminum cyminum* L. seeds by cold plasma. *J. Plasma Med.* 18: 100259.

Socha, K. and M. Dorigo. 2008. Ant colony optimization for continuous domains. *J. Math. Biosci.* 185(3): 1155-1173.

Stolárik, T., M. Henselová, M. Martinka, O. Novák, A. Zahoranová, and M. Černák. 2015. Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.). *Plasma Chem.* 35(4): 659-676.

Zhang, H., B. Gu, J. Mu, P. Ruan, and D. Li. 2017. Wheat hardness prediction research based on NIR hyperspectral analysis combined with ant colony optimization algorithm. *Sci. Rep.* 174: 648-656.

