2025, 15 (1), 105-127 https://doi.org/10.22092/ijsst.2024.365965.1531

Seed Science Society of Iran

Seed and Plant Certification and Registration Institute

Iranian Journal of
Seed Science and Technology

ISSN: 2588-4638

Research Article

An overview of cold plasma-assisted priming on seed germination of medicinal plants and metabolite alterations

Zeinab Chaghakaboodi[1], Danial Kahrizi[2], Abolfazl Mazandarani[3], Jaber Nasiri[4*]

1. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Science and Agricultural Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.
2. Department of Agricultural Biotechnology, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran.
3. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.
4. Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Karaj, Iran.

Article Information

Received: 01 Jun. 2024
Revised: 04 Nov. 2024
Accepted: 06 Nov. 2024

Keywords:
Cold plasma technology,
Medicinal plants,
Secondary metabolites,
Germination, Priming.

Corresponding Author:
jnasiri@aeoi.org.ir

Abstract

The cultivation of medicinal plants has faced significant challenges including seed dormancy, low germination rates, and the need for pre-treatments. Cold plasma technology has emerged as a promising solution to these issues in recent years. It has been successfully used for seed priming of various medicinal plants, and its effects on the morpho-physiological, metabolic, and molecular mechanisms of resulting seedlings have been extensively explored. In this review, we will discuss the use of plasma in seed priming and the consequent metabolic and molecular changes in different medicinal plants. Meanwhile, a growing collection of articles argues that seed priming with plasma is always of interest to researchers and the effect of different types of plasma on various and different seeds is being studied and researched. Although researchers have conducted extensive research in this field, the analysis shows that this field still needs more research. The purpose of this study is to investigate scientific information related to the use of plasma in seed priming and provide a comprehensive understanding of valuable insights with statistical evaluation and data analysis using VOSviewer and R-Studio software to find and reveal the structure and research process in this field for Interested researchers. By addressing this issue, it is hoped to gain a better understanding of the potential benefits and applications of cold plasma in the cultivation of medicinal plants and to identify and use future research directions in this field.

How to cite this paper: Chaghakaboodi, Z., Kahrizi, D., Mazandarani, A., & Nasiri, J. (2025). An overview of cold plasma-assisted priming on seed germination of medicinal plants and metabolite alterations. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 15 (1), 105-127. https://doi.org/10.22092/ijsst.2024.365965.1531

© Authors, Published by Iranian Journal of Seed Science and Technology. This is an open-access article distributed under the CC BY (license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Medicinal plants have been used for centuries as the primary source of healthcare in developing countries, with an estimated 70-95% of the population relying on them for their medicinal needs. Even in developed countries, the use of complementary and alternative medicines, many of which are derived from herbal sources, is widespread, with a reported 70% of the population using them. However, the cultivation of these valuable plants faces challenges, particularly in the form of factors that inhibit seed germination, known as "seed dormancy". This poses a major roadblock in the production and availability of medicinal plants. In response to this challenge, different methods have been developed to overcome seed dormancy, with one of the most promising being "seed priming", where the seeds are prepared in specific ways to promote germination. One such method gaining attention is the use of "cold plasma technology", which offers an environmentally friendly and cost-effective approach to breaking seed dormancy in various agricultural and medicinal plants. This emerging technology holds great potential in increasing the availability and production of medicinal plants, paving the way for a healthier population with access to effective natural remedies. In this review article, an attempt has been made to discuss some of the results related to the use of cold plasma technology in improving the germination of medicinal plant seeds. The recent trends of this technology in seed priming of different plant species were also analyzed using different softwares.

Materials and Methods

To achieve the goals of this review article, firstly, the process of seed germination in plants, the factors involved in it, and the types of seed dormancy are discussed. In the following, different seed priming methods and especially cold plasma technology are described. Also, the types of plasma suitable for seed priming are introduced and finally the uses of plasma (directly and indirectly) in improving the traits related to the germination of plant seeds and the growth and development of the resulting seedlings are mentioned. Meanwhile, to provide a comprehensive understanding of this subject, extensive scientific information and data analysis were conducted using VOSviewer and R-Studio software. Utilizing the Scopus database, which houses a vast array of scientific articles, a thorough search was conducted using relevant keywords and parameters. The publication period was determined to be between 2000 to 2023, and search terms such as "cold plasma" and "seed" and "germination" were employed, with exceptions made for the term "plasma membrane".

Results and Discussion

The results of this research serve to highlight the positive evaluation of the role of cold plasma in seed priming, positioning it as a promising new method in the field. The use of robust statistical evaluations and advanced software, such as VOSviewer and R-Studio, further demonstrate the growth and development of seed priming with plasma over the years. The research indicates a steady annual growth rate of 15.41% from 2000 to 2023, resulting in a total of 501 scientific research articles and the contributions of 2,033 researchers. Of particular note is the low number of single-author studies, comprising only 0.6% of all studies, which is indicative of the interdisciplinary nature of seed priming with plasma and its reliance on collaborative efforts. This suggests that seed priming with plasma is a dynamic and constantly evolving field, drawing on the expertise and collaboration of various researchers from diverse disciplines. The results of the study revealed a significant increase in the production of scientific articles related to plasma seed priming research between the years 2000 and 2023. This period can be divided into three distinct phases, each showcasing a different level of growth and interest in the topic. The first phase, spanning from 2000 to 2011, showed a limited number of publications, with some years even lacking any publications at all. Only 5.2% of all articles were published during this time. The second phase, from 2012 to 2020, exhibited a more moderate but steady increase in the number of articles published, accounting for 43.9% of all articles in the field. On average, 4.88% of the total volume of articles on plasma seed priming research were published annually during this period, indicating a growing interest in the subject. The final phase, between 2021 and 2023, recorded a remarkable spike in scientific article production, with 50.9% of all articles being published in this three-year period alone. This marked a growth of more than 3.5 times compared to the previous period, with an average annual production increase of 16.97%. This upward trend reflects the increasing importance and research interest in the field of plasma seed priming. Furthermore, a separate analysis on active and leading countries in this field revealed China as the top country in terms of research publications. Among these countries, Iran also made significant contributions, placing 11th with more than 3.6% of the total volume of studies published on this topic. These findings highlight the global relevance and advancing state of plasma seed priming research.

Conclusion

In conclusion, upon comparison of the distance and volume of published studies in Iran to those of other leading and active countries, it is evident that the field of seed priming with plasma in Iran offers a diverse range of areas to explore. However, there is a crucial need for further development and research, particularly in the domain of medicinal plant seeds. Thus, the present study aims to present a comprehensive statistical analysis of relevant insights and trends in seed priming with plasma research, providing interested researchers with a valuable resource to identify future research directions and implementation strategies. By doing so, this study contributes to the advancement of this field in Iran and beyond, ultimately leading to more effective and efficient use of plasma-based seed priming methods.

دوره ۱۵، شماره ۱، صفحات ۱۲۷-۱۰۵ https://doi.org/10.22092/ijsst.2024.365965.1531

نشریه علوم و فناوری بذر ایران

ISSN: 2588-4638

مقاله پژوهشی

مروری بر پرایمینگ بذور مبتنی بر پلاسمای سرد در جوانه‌زنی گیاهان دارویی و تغییرات متابولیک

زینب چقاکبودی[۱]، دانیال کهریزی[۲]، ابوالفضل مازندرانی[۳]، جابر نصیری[۴*]

۱. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲. گروه بیوتکنولوژی کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کرج، ایران

۴. پژوهشکده کشاورزی هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کرج، ایران.

چکیده

کشت گیاهان دارویی با چالش‌های مهمی مانند خواب بذر، سرعت جوانه‌زنی پایین و نیاز به پیش تیمارها مواجه بوده است. در سال‌های اخیر، فناوری پلاسمای سرد بعنوان یک راه حل امیدوارکننده برای غلبه بر این مسائل ظاهر شده است. این فناوری با موفقیت برای پرایمینگ بذور گیاهان دارویی مختلف مورد استفاده قرار گرفته و اثرات آن بر مکانیسم‌های مورفوفیزیولوژیک، متابولیک و مولکولی گیاهچه‌های حاصله بطور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. این فناوری یک رویکرد منحصر به فرد برای پرایمینگ بذر ارائه می‌دهد و پتانسیل آن در بهبود رشد و توسعه گیاهان دارویی موضوع بسیار مورد توجه است. مجموعه رو به رشدی از مقالات استدلال می کند که پرایمینگ بذر با پلاسما همواره مورد توجه محققان قرار داشته و اثر انواع مختلف پلاسما بر بذرهای مختلفی در حال بررسی و پژوهش هستند. اگرچه محققان تحقیقات گسترده ای را در این زمینه انجام داده اند، اما تحلیل‌ها نشان می دهد این زمینه همچنان با قدرت نیازمند پژوهش‌های بیشتر است. هدف این مطالعه بررسی اطلاعات علمی مرتبط با استفاده از پلاسما در پرایمینگ بذر و ارائه درکی جامع از بینش‌های ارزشمند با ارزیابی آماری و آنالیزداده‌ها با استفاده از نرم افزارهای VOSviewer و R-Studio جهت یافتن و پرده برداری از ساختار و روند پژوهش در این زمینه برای پژوهشگران علاقمند است. با پرداختن به این موضوع، امید است بتوان درک بهتری از مزایای بالقوه و کاربردهای پلاسمای سرد در کشت گیاهان دارویی به دست آورد و جهت‌های تحقیقات آینده در این حوزه را شناسایی و استفاده کرد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

واژه‌های کلیدی:

فناوری پلاسمای سرد،

گیاهان دارویی،

متابولیت‌های ثانویه،

جوانه‌زنی،

پرایمینگ.

نویسنده مسئول:

jnasiri@aeoi.org.ir

نحوه استناد به این مقاله:

Chaghakaboodi, Z., Kahrizi, D., Mazandarani, A., & Nasiri, J. (2025). An overview of cold plasma-assisted priming on seed germination of medicinal plants and metabolite alterations. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 15 (1), 105-127. https://doi.org/10.22092/ijsst.2024.365965.1531

مقدمه

از دوران ماقبل تاریخ تاکنون، انسان و نخستی‌های غیر انسان از گیاهان دارویی برای مصارف درمانی استفاده کرده‌اند. گیاهان دارویی اساس بهداشت و درمان اولیه ۷۰-۹۵ درصد جمعیت کشورهای در حال توسعه را تشکیل می‌دهند. بیش از ۷۰٪ مردم در کشورهای توسعه یافته از داروهای مکمل یا جایگزینی استفاده می‌کنند که بسیاری از آنها مربوط به داروهای گیاهی می‌باشند. حجم سالانه تجارت جهانی داروهای گیاهی ۸۳ میلیارد دلار بوده و انتظار می‌رود که در سال‌های آتی افزایش چشمگیری پیدا کند (Robinson and Zhang, 2011). همچنین امروزه از گیاهان دارویی و مواد طبیعی برای سلامت طیور نیز استفاده می‌شود (Pashaei et al., 2024)، ضمن اینکه از برخی نیز نظیر کاملینا (*Camelina sativa* (L.)) بعنوان یک منبع مهم برای تولید روغن استفاده می‌شود (Ebadi et al., 2024)، و یا عصاره یا اسانس برخی نیز به دلیل دارا بودن طیف وسیعی از ترکیبات ثانویه با خاصیت دارویی دارای خواص دارویی متعدد می باشند (Khakdan et al., 2017; Khakdan et al., 2016; Nasiri et al., 2023; Nasiri et al., 2016)، و حتی می توانند بعنوان حشره کش‌های زیستی نیز مورد استفاده قرار گیرند (Chaghakaboodi et al., 2022). همچنین، نظر به حجم وسیعی از اطلاعات موجود در زمینه گیاهان دارویی، امروزه از روش‌های متنوع داده کاوی برای استفاده بهتر از این داده‌ها در صنعت کشاورزی استفاده می‌شود (Hatami et al., 2024).

از سوی دیگر، متکی بودن اقتصاد ایران بر درآمدهای نفتی و تاثیرپذیری درآمدها از مسائل سیاسی و اقتصادی، آسیب‌پذیری اقتصاد کشور را موجب شده است. یکی از راهکارهای مقابله با این چالش، توسعه کشت و کار گیاهان دارویی است که نقش بسزایی در سلامت جامعه، اشتغال‌زایی و صادرات غیرنفتی ایفا می‌نمایند. یکی از عمده مشکلات در زمینه گیاهان دارویی، استفاده از آنها به صورت وحشی (یعنی برداشت از طبیعت) می‌باشد که مشکلات زیست محیطی فراوانی را به همراه دارد، به ویژه اینکه در برخی موارد، این گیاهان از سرعت رشد قابل توجهی نیز برخوردار نیستند. درضمن آنها از تنوع اکولوژیک بالایی نیز بهره نمی‌برند، اگرچه به کمک روش‌های مختلف جهش زایی القایی نظیر پرتوتابی با گاما و یا استفاده از جهش‌زاهای شیمیایی نظیر اتیل متیل سولفانات (EMS) می توان تنوع موجود را بهبود بخشید (Kiani et al., 2023). مشکل عمده دیگر در رابطه با کشت گیاهان دارویی وجود برخی عوامل بازدارنده جوانه‌زنی بذور گیاهان مربوطه می‌باشد که عمدتا مربوط به "خواب بذر" می‌باشند، و خود در دسته بندی‌های متفاوتی قرار می‌گیرد. به منظور غلبه بر چنین محدودیت‌های اجتناب ناپذیری، از مکانیسم‌های مختلفی جهت شکسته شدن خواب بذور استفاده می‌شود که بطورکلی تحت عنوان "پرایمینگ بذر" شناخته می‌شوند. از بین منابع مختلفی که از دیرباز تاکنون برای این مهم استفاده می‌گردد، اخیرا از "فناوری پلاسمای سرد" بعنوان یک روش دوستدار محیط زیست و مقرون به صرفه به کرات در گیاهان مختلف زراعی و دارویی استفاده شده است. در این مقاله مروری، درابتدا به فرآیند جوانه‌زنی بذور در گیاهان، عوامل دخیل در آن، و انواع خواب بذر پرداخته می‌شود. در ادامه، روش‌های مختلف پرایمینگ بذور و به ویژه فناوری پلاسمای سرد شرح داده می‌شود. همچنین انواع پلاسمای مناسب برای پرایمینگ بذور معرفی شده و نهایتا به کاربردهای پلاسما (بصورت مستقیم و غیرمستقیم) در بهبود صفات مرتبط با جوانه‌زنی بذور گیاهان و رشد و نمو گیاهچه‌های حاصل از آن اشاره می‌گردد. این امر به ویژه از این نظر حایز اهمیت می‌باشد که معمولا تولید وسیع و پایدار ترکیبات دارویی موجود در گیاهان دارویی با چالش‌هایی چون مقادیر بسیار پایین و محدودیت تجمع ترکیب مورد نظر در اندامک‌های خاص، پایین بودن سرعت رشد گیاه مورد نظر، انقراض گونه‌های گیاهی پیش از شناسایی آنها و مشکلات در زمینه فراوری ترکیبات استخراجی رو به رو هستند (Nasiri et al., 2016; Nasiri et al., 2017). بنابراین، تولید زیست توده بالا راهکاری برای افزایش تولید این ترکیبات از این گیاهان می‌باشد، امری که تنها با اهلی کردن و ترویج کشت این گیاهان توسط کشاورزان امکان پذیر می‌باشد. اولین قدم و راهکار برای دستیابی به این مهم، کشت گیاهان در مزارع بواسطه بذور می‌باشد.

جوانه‌زنی بذر: اهمیت، موانع، راهکارها

۱- اهمیت جوانه‌زنی بذور در گیاهان

امروزه، امنیت غذایی یک مسئله هشدار دهنده مهم در سراسر کره زمین است و بذر یک ساختار مهم برای حفظ ظرفیت تولید محصولات گیاهی است. با توسعه سریع شهرنشینی و جهانی شدن، روش غالب برای تأمین مواد غذایی استفاده از فن آوری‌های جدید است که با حفظ کیفیت محصول عملکرد دانه و سرعت جوانه‌زنی را بهبود می‌بخشد (Rifna et al., 2019). در رابطه با گیاهان دارویی این موضوع حتی از اهمیت بیشتری نیز برخوردار است، چراکه گاها، بذور برخی از گونه‌های گیاهان دارویی از قدرت جوانه‌زنی پایینی برخوردار هستند و یا اینکه دارای دوره خواب طولانی مدت هستند. این امر از چند جهت مهم می‌باشد. از یکسو، جوانه‌زنی بذور گیاه اولین و ضروری ترین مرحله زندگی گیاه برای استقرار و استمرار حیات گیاه تلقی می‌شود، و از سوی دیگر، برای تولید گیاه بصورت انبوه (اهلی کردن گیاهان دارویی وحشی در طبیعت و اصلاح عملکرد آنها در مزرعه و نهایتا تولید در سطح تجاری) نیاز به بذور با قدرت جوانه‌زنی بالا و به موقع از اهمیت بالایی برخوردار است. درضمن، طول دوره جوانه‌زنی بذور، به عنوان یک عامل مهم در زراعت و اصلاح نباتات تلقی می‌شود، به طوری که ارقامی که سریعتر این دوره را پشت سر می‌گذارند، معمولا از مطلوبیت بالایی برخوردار هستند و اقبال کشاورزان به سمت آنها می‌باشد. موضوع آخر و قابل اهمیت مبحث خواب بذور می‌باشد که خود بر اقسام مختلفی طبقه‌بندی می‌شود و معمولا برای توسعه کشت و کار در سطح وسیع و بویژه برای گیاهان با طول دوره رشد کوتاه، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲- عوامل و موانع دخیل در جوانه‌زنی بذور گیاهان

بطورکلی، چرخه زندگی گیاهان اعم از یکساله، دوساله و چندساله، دستخوش تغییرات بسیاری است که معمولا شروع آن با جوانه‌زنی بذور (برای گیاهان با روش تکثیر به روش بذر)، همراه است. طبق تعریف، جوانه‌زنی شامل آن دسته از رویدادهایی است که با جذب آب توسط بذر خشک ساکن شروع می‌شود و با طویل شدن محور جنینی خاتمه می‌یابد (Bewley, 1997). درحقیقت، جوانه‌زنی بذر یکی از حیاتی ترین و پیچیده ترین پدیده‌های فیزیولوژیک در چرخه زندگی گیاه است که اغلب طعمه تنش‌های محیطی و بیولوژیک می‌شود که منجر به جوانه‌زنی نامنظم می‌شود (Paul et al., 2022). در این راستا، بذور برخی گیاهان معمولا فاقد خواب بوده و معمولا جوانه‌زنی بذور آنها در صورت مساعد بودن شرایط محیطی نظیر دما، اکسیژن و رطوبت کافی به همراه خاک مناسب به آسانی اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، جوانه‌زنی بذور برخی گیاهان حتی درصورت مساعد بودن شرایط محیطی، با تاخیر صورت می‌پذیرد، که تحت عنوان خواب بذر نامیده می‌شود. خواب بذر به بذور اجازه می‌دهد بر دوره‌هایی غلبه کنند که برای استقرار گیاهچه نامطلوب است و بنابراین برای اکولوژی گیاهی و کشاورزی مهم است (Bentsink and Koornneef, 2008). از دیدگاه تعریفی، خواب بذر به عنوان ناتوانی یک بذر زنده برای جوانه زدن در شرایط مساعد تعریف شده است (Finch-Savage and Leubner-Metzger, 2006). بنابراین، بذور دارای خواب نیاز به یک فرایند زمانی خاص دارند تا شرایط بیرونی (نظیر گیاهان با سطوح بذور سخت، برای مثال حاوی کوتیکول و ...) و درونی (نظیر رسیدگی کامل جنین، ایجاد تعادل بین هورمون‌های درون گیاهی نظیر جیبرلین اسید و ایجاد تعادل میزان آن با سایر هورمون‌ها نظیر ABA و...) گیاه کاملا برای جوانه‌زنی فراهم گردد (Finch-Savage and Leubner-Metzger, 2006).

در رابطه به موارد فوق، بطورکلی، خواب بذر در گیاهان به چندین گروه تقسیم بندی می‌شود. ماریانا جی نیکولایوا (Marianna G. Nikolaeva) یک سیستم طبقه‌بندی خواب ابداع کرد که منعکس کننده این واقعیت است که خواب توسط هر دو ویژگی مورفولوژیک و فیزیولوژیک دانه تعیین می‌شود (Nikolaeva, 2004). بر اساس این طرح، Baskin & Baskin یک سیستم طبقه‌بندی جامع ارائه کرده اند که شامل پنج کلاس خواب بذر است: فیزیولوژیک (PD)، مورفولوژیک (MD)، مورفوفیزیولوژیک (MPD)، فیزیکی (PY) و ترکیبی (PY + PD) (Baskin and Baskin, 1998; Baskin and Baskin, 2004). این سیستم بصورت سلسله مراتبی بوده و این پنج کلاس خود به سطوح و انواع بیشتری تقسیم می‌شوند (Baskin and Baskin, 1998; Baskin and Baskin, 2004).

۳- راهکارهای رفع موانع دخیل در جوانه‌زنی بذور گیاهان

جوانه‌زنی یک فرآیند پیچیده و در عین حال حیاتی بذر است که شامل سه مرحله جذب[۱]، فعال‌سازی یا آماده‌سازی[۲] و جوانه‌زنی[۳] است (Hussain et al., 2016; Varier et al., 2010). در مرحله جذب بذور به سرعت آب را جذب می‌کنند تا فرآیندهای متابولیک و فرآیندهای ترجمه خود را دوباره فعال کنند و میتوکندری و DNA آسیب دیده را بازیابی کنند. مرحله فعال سازی یا آماده سازی، تاخیر در جوانه‌زنی بذر است زیرا جذب آب آهسته می‌شود. با این حال، تمام فعالیت‌های فیزیولوژیک و متابولیک در این زمان در اوج خود هستند. علاوه بر سنتز mRNAها و پروتئین‌های جدید، بلوغ میتوکندری انجام می‌شود و مولکول‌های ضروری انباشته می‌شوند. همه اینها پیش نیازهای مرحله نهایی، یعنی جوانه‌زنی بذر هستند. تا این مرحله، فرآیند جوانه‌زنی بذر یک پدیده برگشت پذیر باقی می‌ماند. طی مرحله سوم (یعنی مرحله جوانه‌زنی)، در نهایت جوانه‌زنی بذر از طریق بیرون زدگی ریشه چه و ساقه چه صورت می‌گیرد. این فاز همچنین با جذب سریع آب همراه است (Paul et al., 2022). بطورکلی، پرایمینگ بذر دو مرحله اولیه جوانه‌زنی بذر را هدف قرار می‌دهد و اجازه ورود به فاز سوم را نمی‌دهد (Paul et al., 2022). پرایمینگ بذور به کاهش زمان جوانه‌زنی کمک می‌کند، زیرا بذرهای پرایم شده قبلاً دو مرحله اولیه را انجام داده‌اند و در زمان کاشت می‌توانند به راحتی جوانه بزنند.

پرایمینگ بذر (بعنوان مثال، هیدروپرایمینگ، اسموپرایمینگ، پرایمینگ شیمیایی، پرایمینگ فیزیکی، پرایمینگ هورمونی، پرایمینگ بیولوژیک و پرایم ردوکس) بعنوان یک فرآیند فیزیولوژیک تعریف می‌شود که بوسیله آن گیاه آماده می‌شود تا به تنش‌های زیستی و غیرزیستی قریب الوقوع پاسخ سریعتر یا تهاجمی را بدهد و با تیمار با ترکیبات طبیعی یا مصنوعی قبل از جوانه زدن بذر القا می‌شود (Babajani et al., 2019; Jisha et al., 2013; Paparella et al., 2015). پرایمینگ یک فناوری ساده و مناسب برای اطمینان از جوانه‌زنی همزمان بذر، افزایش سبز شدن و استقرار بهتر گیاهچه‌ها، کاهش استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی، افزایش عملکرد محصول و ایجاد مقاومت سیستمیک در گیاهان است (Jisha et al., 2013; Paul et al., 2022). در این رابطه، معمولا برای بذور دارای خواب و همچنین با قدرت جوانه‌زنی پایین، از تیمارهای مختلفی نظیر پردازش فشار بالا[۴]، میدان الکتریکی پالسی[۵]، فراصوت[۶]، پردازش اُزُن[۷]، اشعه ماوراء بنفش[۸]، میدان مغناطیسی[۹]، تابش مایکروویو[۱۰]، پلاسمای غیر حرارتی[۱۱]، آب اکسید کننده الکترولیز شده[۱۲]، و آب فعال شده با پلاسما[۱۳] استفاده می‌شود (Rifna et al., 2019). علاوه بر پرایمینگ، از موارد ذکر شده نظیر طیف‌های مختلف نوری، برای بهبود زیست توده و یا میزان اسانس موجود در گیاهان دارویی نیز استفاده می‌شود (Namdaran Gooran et al., 2022).

فناوری پلاسمای سرد

۱- تاریخچه و کاربردهای فناوری پلاسمای سرد

پلاسما، چهارمین حالت ماده بعد از جامد، مایع و گاز، است که شامل یون‌های مثبت و منفی غیر محدود، الکترون‌ها، اتم‌های خنثی، رادیکال‌های فعال متعدد، تابش‌های الکترومغناطیسی و میدان‌های الکتریکی قوی می‌باشد (Li et al., 2018; Lu et al., 2014; Lu et al., 2016). برخلاف الکترون‌ها که به‌عنوان گونه‌های "سبک" مطرح می‌شوند، یون‌ها، رادیکال‌ها، مولکول‌ها و اتم‌های

1 Imbibition phase
2 Activation or preparatory phase
3 Germination
4 High pressure processing
5 Pulsed electric field
6 Ultrasound
7 Ozone processing
8 Ultraviolet
9 Magnetic field
10 Microwave radiation
11 Non-thermal plasma
12 Electrolyzed oxidizing water
13 Plasma activated water

موجود در پلاسما به‌عنوان گونه‌های "سنگین" تعریف می‌شوند (Moreau et al., 2008). امروزه، علم و فناوری پلاسمای سرد بطور فزاینده ای برای استفاده در انبوهی از مسائل ارائه شده در بخش‌های کشاورزی و مواد غذایی مورد بررسی قرار می‌گیرد (Bourke et al., 2018)، به گونه ای که در برخی منابع استفاده از واژه "کشاورزی به کمک پلاسما" به یک امر رایج تبدیل شده است (Šimek and Homola, 2021). با این وجود، تاریخچه استفاده از این فناوری توسط انسان به سال‌ها قبل بر می‌گردد. مشابه با سایر پدیده‌های شگفت انگیز موجود در طبیعت که توسط بشر کشف شده است، فناوری پلاسمای سرد در طی تاریخِ پیدایشِ آن دارای نقاط عطفی بوده است.

پلاسماها بطورکلی براساس تعادل دمایی ترمودینامیک اجزای تشکیل دهنده به دو گروه اصلی پلاسمای حرارتی و پلاسمای غیر حرارتی (یا پلاسمای سرد) طبقه‌بندی می‌شوند (Moreau et al., 2008; Neyts et al., 2015; Yan et al., 2017). نوع اول پلاسما (پلاسمای حرارتی) دارای یک تعادل ترمودینامیکی در میان گونه‌ها است و الکترون‌ها در دماهای مشابه با آنچه برای گونه‌های سنگین تر است می‌باشد، در حالی که در دومی (پلاسمای غیر حرارتی یا سرد) الکترون‌ها با دمای بسیار بالاتری نسبت به سایر گونه‌های فعال موجود در توده پلاسما حضور دارند ولی یون‌ها و مولکول‌ها، خنک و موثرتر از الکترون‌های پر انرژی عمل می‌کنند و گاز در دمای پایین باقی می‌ماند (Zhou et al., 2020)، که این امر باعث می‌شود آنها برای تیمار مواد زیستی و فرآیندسازی مواد مناسب باشند (Bazaka et al., 2011; Bazaka et al., 2010).

شکل ۱ جدول زمانیِ برخی از نقاط عطف مهم فناوری پلاسمای سرد در تیمار بذر برای بهبود کیفیت بذر و بهره‌وری محصول در زمینه کشاورزی را نشان می‌دهد که در نهایت منجر به فناوری پرایمینگ بذر می‌شود (Shelar et al., 2022). با توجه به شکل ۱، سرآغاز استفاده از پلاسمای سرد در بهبود کیفیت بذر را می‌توان به مطالعه "سر ویلیام کروکس" که برای اولین بار در سال ۱۸۷۹ پلاسما را مشاهده کرد و آن را به عنوان "ماده تابشی" و "چهارمین حالت ماده" توصیف کرد، ردیابی کرد. در سال ۱۹۲۷، ایروینگ لانگمویر جایزه نوبل شیمی را برای ابداع اصطلاح "پلاسما" دریافت کرد. با توجه به اینکه لانگمویر پدیده غلاف پلاسما[1] را کشف کرد، می‌توان او را اولین فیزیکدان پلاسما در تاریخ دانست (Langmuir, 1928). کراپیوینا و همکاران (۱۹۹۰) اولین حق ثبت اختراع ایالات متحده را در مورد کاربرد پلاسما برای بذور منتشر کرد که جوانه‌زنی و رشد دانه‌های سویا را با پلاسمای سرد اتمسفر تولید شده از مخلوطی از گازهای معدنی افزایش داد (Krapivina et al., 1994). پس از این مطالعه، تحقیقات گسترده و وسیعی در رابطه با کاربرد پلاسمای سرد در جوانه‌زنی بذور گیاهان بعنوان یک عامل پرایمینگ فیزیکی بذور در گیاهان و سازگار با محیط زیست و بدون مواد افزودنی و شیمیایی گزارش شده است. پلاسما بعنوان فاز چهارم و پرانرژی ماده، از قرن نوزدهم تاکنون کاربرد گسترده ای در کشاورزی، صنایع غذایی و پزشکی پیدا کرده است (شکل ۲)، اگرچه، در اواسط قرن بیستم دانشمندان کاربرد جدیدی را در فناوری پلاسما نشان دادند (Feizollahi et al., 2021; Laroussi, 2020; Šimek and Homola, 2021; Zhou et al., 2020).

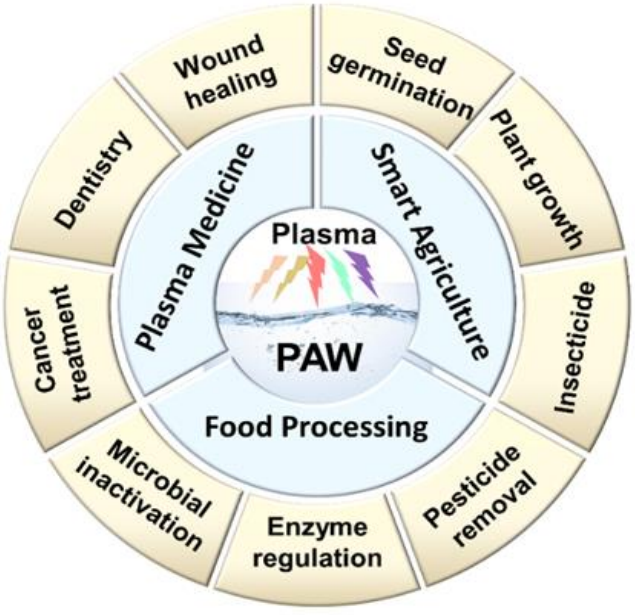
"سر ویلیام کروکس" برای اولین بار در سال ۱۸۷۹ پلاسما را مشاهده کرد و آن را به عنوان "ماده تابشی" و "چهارمین حالت ماده" توصیف کرد (Crookes, 1879). در سال ۱۹۲۷، ایروینگ لانگمویر اصطلاح "پلاسما" را ابداع نمود (Langmuir, 1928). کراپیوینا و همکاران (۱۹۹۰) اولین حق ثبت اختراع ایالات متحده را در مورد کاربرد پلاسما برای بذور منتشر کرد (Krapivina et al., 1994). جیانگ و همکاران (۲۰۱۴)، اثر تیمار بذور با پلاسمای سرد را برای بهبود مقاومت بذور به بیماری پژمردگی باکتریایی گوجه فرنگی را گزارش نمودند (Jiang et al., 2014b). اثر همزمان تیمار بذور با پلاسمای سرد و سالیسیک اسید در بهبود تحمل به تنش شوری گیاهچه‌های برنج توسط شتیوی و همکاران (۲۰۱۹) گزارش گردید (Sheteiwy et al., 2019). اثر تیمار همزمان نانوذرات اکسید روی و پلاسمای سرد بر بذور فلفل قرمز (*Capsicum annuum*) مورد بررسی قرار گرفت (Iranbakhsh et al., 2018). اصطلاح "واکسیناسیون پلاسمایی[2]"

1 Plasma sheath
2 Plasma vaccination

با تکیه بر مطالعات پیشین، توسط آدهیکاری و همکاران (۲۰۲۰) معرفی شد (Adhikari et al., 2020).

شکل ۱- جدول زمانیِ برخی از نقاط عطف مهم فناوری پلاسمای سرد در تیمار بذر برای بهبود کیفیت بذر و بهره‌وری محصول در زمینه کشاورزی (Shelar et al., 2022).

Figure 1- Timeline of some important milestones of cold plasma technology in seed treatment to improve seed quality and crop productivity in agriculture (Shelar et al., 2022).



شکل ۲- شمای کلی از کاربردگسترده فناوری پلاسمای سرد در کشاورزی، صنایع غذایی و پزشکی (Zhou et al., 2020).

Figure 2- Overview of the wide application of cold plasma technology in agriculture, food industry and medicine (Zhou et al., 2020).

۲- منابع تولید پلاسمای سرد

پلاسما را می توان با قرار دادن یک گاز در معرض اشکال مختلف انرژی از جمله: میدان‌های حرارتی، الکتریکی یا مغناطیسی و فرکانس‌های رادیویی یا مایکروویو، که انرژی جنبشی الکترون‌ها را افزایش می‌دهند و منجر به افزایش تعداد برخوردها در ذرات شکیل دهنده آن می شوند، ایجاد کرد. معمولا منابع پلاسمای سرد اتمسفری شامل پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD)، پلاسمای فرکانس رادیویی (RF)، پلاسما جت (PJ)، تخلیه کرونا (CD)، تخلیه گلاو یا گلایدینک آرک (GA) می‌باشند (Bárdos and Baránková, 2010; Moreau et al., 2008). اجزای پلاسمای سرد اتمسفری هوا شامل الکترون‌ها، یون‌ها، ذرات خنثی، UV/VUV، میدان الکتریکی، و بسیاری از رادیکال‌های اکسیژن و نیتروژن است که در برخورد با آب گونه‌های فعال نیتروژن (RNS) و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) با عمر طولانی همچون آب اکسیژنه (H_2O_2)، آمونیم (NH_4^+)، نیترات (NO_3^-)، نیتریت (NO_2^-)، ازن (O_3) و گونه‌های واکنشی با عمر نسبتاً کوتاه همانند رادیکال‌های هیدروکسیل ($^{\bullet}OH$)، نیترو اکسید ($^{\bullet}NO$)، سوپراکسید (O_2)، پیروکسی نیترات ($OONO_2^-$) و پیروکسی نیتریت ($ONOO^-$) و ... را تولید می‌کند (Laroussi, 2020; Zhou et al., 2020). اثربخشی همه یا برخی از این عوامل در تحریک پذیری جوانه‌زنی در برخی از گیاهان گزارش شده است (Babajani et al., 2019; Rifna et al., 2019; Zhou et al., 2020).

بهبود جوانه‌زنی بذور با پرایمینگ مبتنی بر پلاسما

۱- روش مستقیم و روش غیرمستقیم

در روش پرایمینگ بذور مبتنی بر پلاسما، معمولا دو رویکرد عمده استفاده می‌شود. در حالت اول، بذور بطور مستقیم تحت تاثیر پلاسما قرار می‌گیرند، درحالی که در حالت دوم (روش غیرمستقیم) از "آب فعال شده با پلاسما (PAW)[1]" استفاده می‌شود (Zhou et al., 2020). آب پلاسمایی نیز خود به دو صورت مستقیم (قرار دادن مستقیم پلاسما در معرض آب) و غیرمستقیم (با پاشیدن قطرات کوچک آب و هوا بین دو الکترود) ایجاد می‌شود (Benstaali et al., 2002; Pipliya et al., 2023).

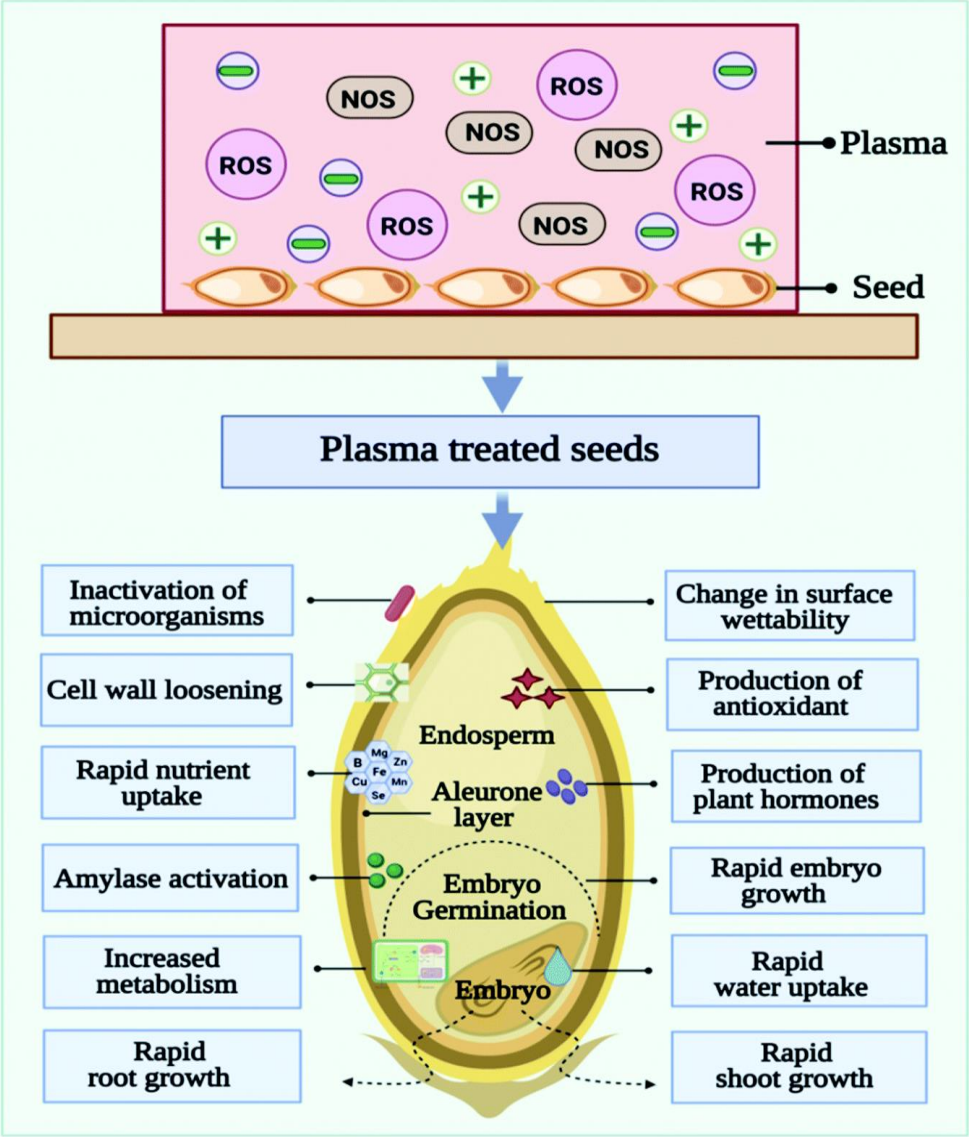
اکثر مطالعات کاهش فوری pH و افزایش رسانایی الکتریکی و پتانسیل کاهش اکسیداسیون ORP را در نتیجه تشکیل گونه‌های فعال در نمونه‌های PAW نشان داده‌اند. هنگامی که PAW تولید می‌شود، گونه‌های گازی از گاز در حال کار یا گاز اتمسفر وارد فصل مشترک گاز-مایع می‌شوند و در نتیجه واکنش‌های پیچیده‌ی فیزیکوشیمیایی وجود دارد که منجر به عدم تعادل و افزایش چگالی بخش‌های یونی مثل گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن مانند واکنش‌های زیر می‌شود (Soni et al., 2021; Wang et al., 2023; Zhou et al., 2020). البته این مواد فعال ناپایدار هستند و می‌توانند به سرعت تجزیه شوند. بنابراین، هیچ ترکیب خطرناکی بر روی بذور تیمار شده با PAW باقی نمی‌ماند (Yang et al., 2023). پلاسما منجر به شکستگی در کلاسترهای مولکول‌های آب و تولید آب تک مولکولی می‌شود. مقدار مولکول کلاستر آب کاهش می‌یابد و تعداد آب تک مولکولی افزایش می‌یابد. بنابراین فعالیت بدست آمده توسط آب افزایش می‌یابد. آب فعال/تک مولکولی دارای اندازه ای بسیار کوچک است که به آن اجازه می‌دهد به راحتی از غشا، منافذ گیاهان، حیوانات و غذاهای فراوری شده عبور کند.

۲- نقش گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن در پرایمینگ مبتنی بر پلاسما

همانگونه که در بالا ذکر شد، طیفی از گونه‌های فعال نیتروژن (RNS) و اکسیژن (ROS) با عمر طولانی‌مدت در اثر پلاسما ایجاد می‌گردد که نقش تنظیم کننده عمده‌ای در طول فرآیندهای رشد و نمو بذر از جمله جوانه‌زنی، متابولیسم، انتقال سیگنال، جذب مواد مغذی، پیری، و توانایی تحمل تنش‌های زیستی و غیر زنده دارا می‌باشند (شکل ۳) (Shelar et al., 2022). گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و گونه‌های نیتروژن فعال (RNS) نقشی محوری در سیستم‌های پیام رسانی سلولی پویا در گیاهان، حتی در شرایط تنش زیستی و غیر زنده، ایفا می‌کنند (Khan et al., 2023). در طول دو دهه گذشته، مطالعات مختلف این ایده را تایید کرده‌اند که این مولکول‌ها می‌توانند به عنوان مولکول‌های پیام رسان درون سلولی و بین سلولی در غلظت بسیار کم برای

1 Plasma Activated Water

کنترل رشد و نمو گیاه، ارتباط همزیستی و مکانیسم‌های دفاعی در پاسخ به شرایط تنش زنده و غیرزیست عمل کنند (Khan et al., 2023). بطورکلی، ROS به دو دسته تقسیم می‌شود: رادیکال‌ها و غیر رادیکال‌ها. رادیکال ROS شامل آنیون‌های سوپراکسید (O_2^-)، رادیکال‌های هیدروکسیل (OH^-)، آلکوکسیل (RO^-)، هیدروپروکسیل (HO_2^-)، پراکسیل (ROO^-)، کربنات (CO_3^-) و semiquinone (SQ^-) است. ROS غیر رادیکال شامل اسید هیپوبروم (HOBr)، اکسیژن منفرد ($^1O_2^-$)، ازن (O_3)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، اسید هیپویدوز (HOI)، هیپوپراکسیدها (ROOH) و اسید هیپوکلرو (HOCl) است (Khan et al., 2023; Sarkar et al., 2022). بطور مشابه، RNS نیز به دو دسته تقسیم می‌شود: رادیکال‌های آزاد و غیر رادیکال‌ها. RNS رادیکال‌های آزاد شامل اکسید نیتریک (NO)، دی اکسید نیتریک (NO_2) و اکسید نیتریک (NO_3) است. RNS غیررادیکال شامل اسید نیتروژن (HNO_2)، آنیون نیتروکسیل (NO^-)، کاتیون نیتروزونیوم (NO^+)، پراکسی نیتریت ($NOOO^-$)، تتروکسید دی‌نیتروژن (N_2O_4) و تری اکسید دی نیتروژن (N_2O_3) می باشد (Khan et al., 2023; Kwon et al., 2021).



شکل ۳- نقش تنظیمی گونه‌های فعال نیتروژن (RNS) و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) حاصل از پلاسما در بذور تیمار شده با پلاسمای سرد (Shelar et al., 2022).

Figure 3- The regulatory role of reactive nitrogen species (RNS) and reactive oxygen species (ROS) from cold plasma in plasma-treated seeds (Shelar et al., 2022).

تغییرات مورفو-فیزیولوژیک، متابولیک و مولکولی در جوانه‌زنی بذور تیمار شده با پلاسما (نقش پرایمینگ)

نویسندگان این مطالعه در تحقیقات گذشته خود، اثر پلاسما را بر جوانه‌زنی و پارامترهای رشد، مورفولوژی سطح، آبنوشی و شاخص بنیه بذور جو (Mazandarani, Abolfazl et al., 2020) و آنغوزه (Nasiri et al., 2025) را بررسی کرده اند. در کلیه بذور نام برده عملکرد مثبت معناداری از اثر پلاسمای سرد در پرایمینگ مشاهده شده است. اثرات زمان پرایمینگ، توان پلاسما، انبار مانی و نوع پلاسما در مطالعات مختلف بررسی و گزارش شده است. همچنین دستگاه‌های مختلفی از مولد پلاسمای سرد تاکنون توسط نویسندگان طراحی، شبیه سازی و ساخته شد (Mazandarani, Abolfazl et al., 2020; Mazandarani, A et al., 2020). در شکل ۴ دو نمونه از دستگاه‌های ساخته شده توسط نویسندگان این مطالعه مروری نشان داده شده است (Mazandarani, Abolfazl et al., 2020).

شکل ۴- دو نمونه از مولدهای پلاسمای سرد تخلیه سد دی الکتریک (DBD) ساخته شده توسط نویسندگان (Mazandarani, Abolfazl et al., 2020).

Figure 4- Two examples of dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma generators made by the authors (Abolfazl Mazandarani et al., 2020).

نتایج تجربی تیمار پلاسمایی تخلیه سد دی الکتریک (DBD) بر روی جوانه‌زنی و رشد گیاهچه جو تجزیه و تحلیل و ارائه شده است. بذرها به مدت ۱۵ ثانیه در معرض پلاسمای DBD با توان‌های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ وات قرار گرفتند. تمامی تیمارها بر جوانه‌زنی بذر، رشد گیاهچه و شاخص بنیه اثر مثبت نشان دادند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و ارزیابی‌های جذب آب دانه‌های تیمار شده با پلاسما نشان داد که تیمارها جذب آب را در دانه‌ها بهبود می‌بخشند. ترک‌های الکترونی در سطح بذور مشاهده شد که عامل توجیه جذب آب و خارج شدن راحت جنین از پوسته ضخیم بذور است. بهبودهای مثبت مشابهی برای دانه‌های تیمار شده با پلاسما در مرحله جوانه‌زنی و رشد گیاهچه مشاهده شد (Mazandarani, Abolfazl et al., 2020).

همچنین اثر پلاسما بر باکتری استافیلوکوکوس اورئوس مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مثبتی از عملکرد پلاسما گزارش شد. نمونه‌های آلوده در مدت زمان‌های ۵، ۷ و ۱۰ دقیقه تحت پلاسمای جت سرد مورد تیمار قرار گرفتند. با افزایش زمان تیمار، حجم زیادی از باکتری‌ها از بین رفت، بطوری که تیمار ۱۰ دقیقه بطور کامل باکتری‌ها را از بین برد (Mazandarani et al., 2022).

مطالعه‌ای با هدف اثر پلاسما در زمان‌های مختلف بر درصد جوانه‌زنی و پارامترهای رشد زیره سبز انجام شد (Shashikanthalu et al., 2020). پس از تیمار با پلاسما، جوانه‌زنی بذور تیمار شده با پلاسما حدود ۴۳/۲۴ درصد افزایش یافت، ضمن اینکه شاخص بنیه گیاهچه[1] و وزن خشک برای بذوری که سه دقیقه در معرض پلاسمای سرد (۲ کیلوولت پلاسما) قرار گرفته بودند، بهبود یافت. همچنین، شاخص‌هایی نظیر کلروفیل کل، طول ریشه و طول گیاهچه نیز با افزایش ۱۵/۵،

1 Vigor index

۴۱/۷۹ و ۳۴/۵ درصدی نسبت به کنترل همراه بود. همچنین، آنالیز طیف سنجی انتشار نور[1] (OES) مربوط به پلاسمای بدون بار، نقش مثبت ROSها را در ایجاد تغییرات فیزیولوژیک بذور زیره تایید کرد. این محققین، عنوان کردند که پلاسمای سرد می‌تواند یک روش امیدوار کننده برای افزایش جوانه‌زنی بذرهای دارویی و معطر باشد (Shashikanthalu et al., 2020). سینک و همکاران (۲۰۱۹)، اثر تحریکی قرار گرفتن بذور ریحان شیرین (*Ocimum basilicum* L.) در معرض پلاسما را مورد بررسی قرار دادند (Singh et al., 2019). بذور در معرض پلاسمای سرد با توان‌های RF متفاوتی مانند T2 (30 W)، T3 (90 W)، T4 (150 W)، T5 (210 W) و T6 (270 W) قرار گرفتند. تیمار T4 (150 W) با پلاسمای سرد، بیشترین اثر تحریک کنندگی را در جوانه‌زنی و شاخص بنیه گیاهچه در بین تمام دُزهای مورد مطالعه داشت. این محققین عنوان کردند که افزایش جوانه‌زنی و شاخص بنیه گیاهچه ریحان شیرین ممکن است نتیجه افزایش جذب آب، seed reserve mobilization و میزان تخلیه در تیمار T4 باشد (Singh et al., 2019). با هدف بررسی تغییرات ایجاد شده بواسطه پلاسما در رشد، آناتومی، بیان فاکتور رونویسی WRKY1 و نرخ رونویسی چهار ژن اصلی دخیل در مسیر بیوسنتزی کانابینوئیدها (متابولیت‌های ثانویه با ارزش دارویی) در گیاه شاهدانه (*Cannabis sativa* L.)، مطالعه کاملی انجام شد (Iranbakhsh et al., 2020). تیمار بذور با پلاسمای سرد در سه زمان صفر، ۴۰ و ۸۰ ثانیه صورت گرفت. تیمار ۴۰ ثانیه ای با پلاسما باعث افزایش زیست توده در هر دو اندام هوایی[2] و ریشه به طور متوسط ۵۷ درصد شد، در حالی که تیمار در ۸۰ ثانیه رشد را به تأخیر انداخت و آن را ۴۸ درصد کاهش داد. فرایند پرایمینگ بذر با پلاسما باعث بیش بیان فاکتور رونویسی *WRKY1* شد (میانگین ۱۱/۵۵ برابر). علاوه بر این، تیمارهای پلاسما باعث القاء بیان اولیوتیک سیکلاز اسید (olivetolic acid cyclase) تا حدود ۴۲ برابر شدند. همچنین، گیاهچه‌های تیمار شده با پلاسما میزان بیان بالاتر اولیوتول سینتاز (olivetol synthase) تا حدود ۱۹ برابر نشان دادند. مشابه با این امر، قرار گرفتن در معرض پلاسما باعث تحریک رونویسی کانابیدیولیک اسید سینتاز (cannabidiolic acid synthase) تا حدود ۱۲/۴ برابر شد. پس از تیمار بذور با پلاسما، میزان بیان دلتا ۹- تتراهیدرو کانابینولیک اسید سینتاز (Δ9-tetrahydrocannabinolic acid synthase) تا حدود ۲۵/۶ برابر شد. پرایمینگ بذور شاهدانه با پلاسما منجر به افزایش بیان ژن‌های دخیل در تولید متابولیت‌های ثانویه مانند کانابینوئیدها شد. این نتایج حاکی از آن است که دریافت پلاسما (plasma reception) و انتقال سیگنال می‌تواند بیان ژن‌ها را در سطح رونویسی تغییر دهد، که از طریق آن پرایمینگ با پلاسما ممکن است باعث بهبود محافظت گیاه و افزایش متابولیسم ثانویه گیاهی شود (Iranbakhsh et al., 2020). تغییرات در ترکیبات فیتوشیمیایی زیست-فعال شش رقم برنج قهوه ای جوانه زده تایلندی (GBR) و GBRهای تیمار شده با پلاسمای سرد (PGBR) مورد ارزیابی قرار گرفت (Yodpitak et al., 2019). بعد از تیمار با شرایط بهینه پلاسما، درصد جوانه‌زنی، طول ریشه و ارتفاع نهالِ حساس ترین رقم برنج به ترتیب ۸۴ درصد، ۵۷ درصد و ۶۹ درصد افزایش یافت. برای تمامی ارقام برنج، تفاوت معنی داری در فعالیت‌های آنتی اکسیدانی GBRها و PGBRها وجود نداشت. در مقابل، در طول دوره جوانه‌زنی دو روزه، محتوای بالاتری از γ-oryzanols در گروه PGBR نسبت به گروه GBR مشاهده شد. ارقام خاصی در گروه PGBR به حداکثر مقادیر خود برای ترکیبات فنلی کل، ویتامین E کل، برخی فنولیک‌های ساده، فیتواسترول‌ها، تری ترپنوئیدها و آنتوسیانین‌ها یک روز زودتر از همان مقادیر برای GBR رسیدند. در مقابل، غلظت ۲-استیل-۱-پیرولین در هر دو نمونه GBR و PGBR با افزایش زمان جوانه‌زنی به طور قابل توجهی کاهش یافت (Yodpitak et al., 2019). در مطالعه دیگری، اثرات تیمار بذر با پلاسمای سرد (۲-۷ دقیقه)، خلا (۷ دقیقه) و میدان الکترومغناطیسی (۵-۱۵ دقیقه) بر جوانه‌زنی و عملکرد گیاه دارویی سرخارگل (*Echinacea purpurea*) بررسی شد (Mildaziene et al., 2018). همه تیمارها باعث جوانه‌زنی سریع‌تر شدند، اما درصد جوانه‌زنی نهایی تغییر نکرد (باستثناء کاهش

1 Optical emission spectroscopy
2 Shoot

ناشی از تیمار با خلا). گیاهان حاصل از بذور تیمار شده با سه تیمار فوق، دارای ارتفاع بیشتری بودند، برگ بیشتری ایجاد کردند، و برخی از تیمارها وزن ریشه را نیز افزایش دادند. محتوای ویتامین C و اسیدهای فنلی در عصاره برگ‌های گیاهان حاصل از تیمارهای فوق در مقایسه با گروه شاهد بسیار بیشتر بود، بطوری که میزان اسید سیکوریک (Cichoric acid) در هر گیاه تا ۳/۸ برابر و مقدار ویتامین C در هر گیاه تا ۱/۹ برابر افزایش یافت. درنهایت، تیمارهای بذری فوق باعث افزایش زیادی در فعالیت مهار رادیکال تا حدود ۱۱۴ درصد در عصاره‌های برگی گیاه شد (Mildaziene et al., 2018). در مطالعه دیگری، تغییرات مرتبط با پلاسما در متابولیسم ثانویه گیاهی در سطح مولکولی مورد مطالعه قرار گرفت (Ghasempour et al., 2020). بذور گیاه پریوش (*Catharanthus roseus*) با پلاسما در محیط کشت بدون هورمون تحت شرایط استریل کشت داده شدند. در بذور تیمار شده با پلاسما در هر دو مدت زمان ۳۰ و ۶۰ ثانیه، طول ریشه (میانگین = ۴۱/۴ درصد) و زیست توده (میانگین = ۴۷ درصد) نسبت به کنترل بهبود یافت، در حالی که پلاسمای ۹۰ ثانیه رشد گیاه را به تاخیر انداخت. تیمارهای پلاسما غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی و فنولهای محلول را افزایش دادند، ضمن اینکه پلاسمای ۹۰ ثانیه سطح پرولین را افزایش داد. پرایمینگ پلاسما باعث فعالیت آنزیم‌های فنیل آلانین آمونیاک لیاز، کاتالاز (حدود دو برابر) و پراکسیداز (۳۱ درصد) شد. پلاسما همچنین بیان ژن *deacetylvindoline O-acetyltransferase*را بطور متوسط ۷/۸ برابر افزایش داد. نهایتا گیاهچه‌های تیمار شده با پلاسما حاوی غلظت‌های بالاتری از آلکالوئیدها بودند (میانگین ۷۲ درصد) (Ghasempour et al., 2020). برای بررسی اثرات آب فعال شده با پلاسما (PAW) بر بیان ژن، تیمار ترکیبی PAW و پلاسما بر روی بذور گیاه گون (*Astragalus adsurgens* Pall) انجام شد و سپس بیان ژن گیاهچه‌ها پس از تیمار در سطح مولکولی آنالیز شد (Li et al., 2022). پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک با صفحه آرایه سوزنی برای تیمار بذرهای این گیاه به مدت یک، دو و سه ساعت استفاده شد و PAW بطور همزمان برای کشت بذرها تهیه شد. در تیمار سه ساعت، میزان بقای گیاهچه‌های تیمار شده با PAW و پلاسما تنها ۹/۲ درصد از CK بود. سپس گیاهچه‌های *Astragalus adsurgens* Pallبا استفاده از گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) و RNA-Seq آنالیز شدند. محتوای ROS گیاهچه‌ها در گروه تیمار به‌طور معنی‌داری بیشتر از CK پس از سه روز کشت بود، که این امر نشان می‌دهد PAW می‌تواند باعث آسیب استرس اکسیداتیو به این گونه گیاهی شود. فعالیت آنزیمی گیاهان تیمار شده با پلاسما افزایش یافت و سرعت متابولیسم آنها تسریع یافت، ضمن اینکه تیمار با پلاسما به تنظیم روند رشد گیاهان و بهبود عملکرد و کیفیت محصولات نیز کمک کرد (Li et al., 2022). در مطالعه ای به بررسی اثرات تیمار غیر حرارتی پلاسمایی (NTP) بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) پرداخته شد (Guragain et al., 2024). عوامل مختلف جوانه‌زنی، سرعت جذب آب و تغییرات وزن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدت زمان مناسب تیمار NTP (۱۸۰ ثانیه و ۳۰۰ ثانیه) ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر را افزایش می‌دهد، در حالی که قرار گرفتن در معرض طولانی مدت (۴۲۰ ثانیه) منجر به اثرات نامطلوب می‌شود. علاوه بر این، قرار گرفتن در معرض کوتاه‌تر NTP (۱۸۰ ثانیه) جذب آب و خواص سطحی دانه‌ها را بهبود بخشید، در حالی که قرار گرفتن در معرض طولانی‌تر (۴۲۰ ثانیه) باعث از دست دادن جرم و به خطر افتادن بنیه بذر شد. بطورکلی، یافته‌های این تحقیق، اهمیت بهینه سازی شرایط تیمار NTP را برای افزایش ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر نشان داد (Guragain et al., 2024). دانه‌های جینسنگ جدا شده (*Panax ginseng*) در معرض پلاسمای دی الکتریک (DBD) قرار گرفتند که در آرگون (Ar) یا مخلوط آرگون/اکسیژن (Ar/O2) کار می‌کرد، و جوانه‌زنی و استریل سازی سطحی حاصل با نمونه‌های شاهد تیمار نشده مقایسه شد. گروه سنجش‌های تشخیص باکتری و قارچ برای دانه‌های جینسنگ تیمار شده با پلاسما پس از رقت‌سازی سوسپانسیون‌های شسته شده با سطح انجام شد. بذور تیمار شده با پلاسما در Ar یا Ar/O_2 نرخ جوانه‌زنی بالاتری (درصد) در مقایسه با گروه شاهد تیمار نشده نشان دادند. علاوه بر این، تیمار پلاسما اثرات باکتری‌کشی و قارچ‌کشی را روی سطح دانه نشان داد و اثر دوم قوی‌تر از اولی بود. علاوه بر این، درمان پلاسما فعالیت ضدقارچی در شرایط آزمایشگاهی را علیه *Cylindrocarpon destructans*

نشـان داد و شـدت بیماری (درصـد) پوسـیدگی ریشـه را در دیسک‌های ریشه جینسنگ چهار ساله کاهش داد. نتایج نشان‌دهنده اثر محرک تیمار پلاسـما بر جوانه‌زنی بذر، عقیم‌سـازی سـطحی و سـرکوب بیمـاری پوسـیدگی ریشـه در جینسـینگ بود (Lee et al., 2021). در تحقیقی که اخیرا انجام شده است، مزیت بالقوه پلاسمای سرد آرگون (ACP)، به عنوان یک رویکرد سازگار با محیط زیست، و قدرتمند برای فناوری پرایمینگ بذر، در فرآیند جوانه‌زنی بذر گیاه آنغوزه (*Ferula assa-foetida*) ارزیابی شـد (Nasiri et al., 2025). بین بذرهای تیمار شـده با ACP و تیمار نشـده (شـاهد) از نظر درصـد جوانه‌زنی نهایی (FGP)، شـاخص تیمسـون (TI)، شـاخص جوانه‌زنی (GI) و میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT) تفاوت معنی داری وجود داشـت. در مقایسـه با شـاهد، مقادیر بالاتر ثبت شـده برای هر یک از سـه معیار جوانه‌زنی FGP، TI، و GI می‌تواند نشـان دهنده برتری ACP برای بهبود جوانه‌زنی بذر در *F. assa-foetida* باشـد. در عوض، MGT محاسـبه شـده برای دانه‌های تیمار شـده با ACP کمتر از شـاهد بود. از آنجایی که هرچه MGT کمتر باشد، مجموعه ای از بذرها سریعتر به جوانه‌زنی می‌رسند، بنابراین، بطورکلی می‌توان نتیجه گرفت که ACP احتمالاً می‌تواند به عنوان یک روش پرایمینگ امیدوارکننده برای بهبود فرآیند جوانه‌زنی *F. assa-foetida* و احتمالاً سـایر گونه‌های گیاهی دارویی در نظر گرفته شود (Nasiri et al., 2025).

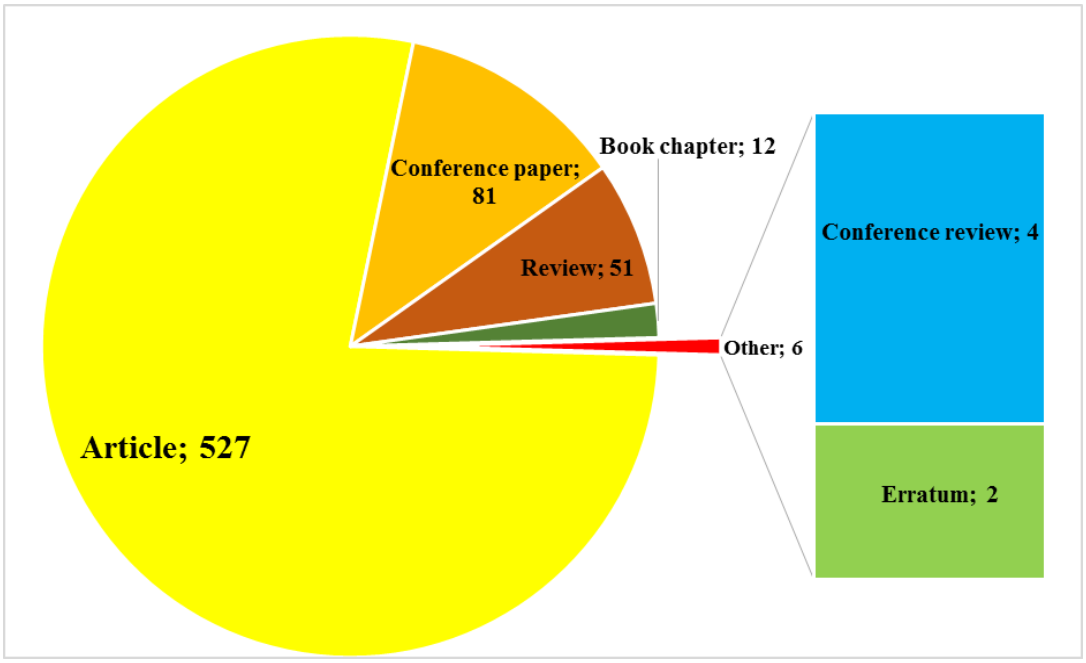
آنالیز آماری از روند پژوهش و تحقیقات در پرایمینگ بذر با پلاسما

به منظور ارائه درک روشن و دقیق از تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسـما ما یک جسـتجو از پایگاه داده Scopus به عنوان وسـیع ترین پایگاه مقالات علمی در این زمینه بر اسـاس عنوان مقاله، کلمات کلیدی و چکیده برای به دسـت آوردن داده‌ها انجام دادیم. مدت زمان انتشـار بین ۲۰۰۰- ۲۰۲۳ تعیین شـده اسـت. عبارات جسـتجوی ما برای یافتن مقالات موجود در این حوزه به شـرح زیر اسـت: کلمه "پلاسـمای سـرد" و کلمات "بذر" و "جوانه‌زنی" و بجز کلمه "غشای پلاسمایی" در عنوان، چکیده و کلمات کلیـدی مورد جسـتجو قرار گرفـت (TITLE-ABS-KEY[1] (plasma) AND TITLE-ABS-KEY ("seed" AND "germination") AND NOT TITLE-ABS-KEY ("plasma membrane")). با اعمال این عبارات و محدودیت‌ها ۶۷۷ سـند علمی در جستجوی اولیه به تفکیک شکل ۵ بدست آمده است. با اعمال معیارهای حذف، سندها به مقالات پژوهشی منتشر شده در زبان انگلیسی برای تحلیل و بررسی دقیق تر محدود شده‌اند و ۵۰۱ مقاله پژوهشی به زبان انگلیسی شناسایی شدند که در قالب فایل با پسوند CSV استخراج شدند.

داده‌های اسـتخراج شـده با اسـتفاده از نرم افزارها و ابزارهای تحلیلی چون Scopus Analyze Result، VOSviewer 1.6.19، و Bliblioshiny برای تجسـم و تجزیه و تحلیل روندهای تحقیق در موضـوع پرایمینگ بذر با پلاسـما با اسـتفاده از ۵۰۱ مقاله به دست آمده بکار گرفته شد (Barrot, 2024; Cosh et al., 2024; Kumar et al., 2024). VOSviewer و Biblioshiny ابزارهای نرم افزاری برای سـاختن یک شـبکه بصـری و تجسـم آماری از وضعیت مجلات، روند انتشارات، پژوهشگران، نشریات مبتنی بر استناد، استناد مشترک، شناسایی اصطلاحات کلیدی و تجسم روابط آنها، سازمان‌های مرتبط، کشورهای فعال و روابط بین آنها هستند (Arsad et al., 2024; Gandasari et al., 2024; Kumar et al., 2024). داده‌های استخراج شده با استفاده از نرم افزارهای VOS viewer و RStudio و استفاده از Bibliometrix package و ابزار biblioshiny مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مرحله اول آنالیز آماری برای به دسـت آوردن توزیع انتشـار، مجلات تاثیرگذار، مقالات پر اسـتناد، کشـورهای فعال ونویسـندگان برتر می باشـد. مرحله دوم، تولید نقشـه‌های bibliometric از طریق نرم‌افزارهـای VOS viewerوR-Studio جهـت یـافتن روابط و شـبکه‌های بصـری از اسـتناد نویسـندگان، تجسـم تراکم، شـبکه همکاری کشـورها، هم نویسـندگی و شـبکه کلمات کلیدی پر تکرار بود. خلاصه ای از مقالات علمی استخراج شده را می توانید در شـکل ۶ مشـاهده کنید. شـکل ۶ نشـان می دهد که حوزه پرایمینگ بذر با پلاسـما با یک رشـد خوب سـالیانه (۱۵.۴۱ ٪) از سـال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در حال توسـعه بود و برای خلق ۵۰۱ مقاله علمی پژوهشـی به زبان انگلیسـی، ۲۰۳۳ محقق تلاش کردند. نکته

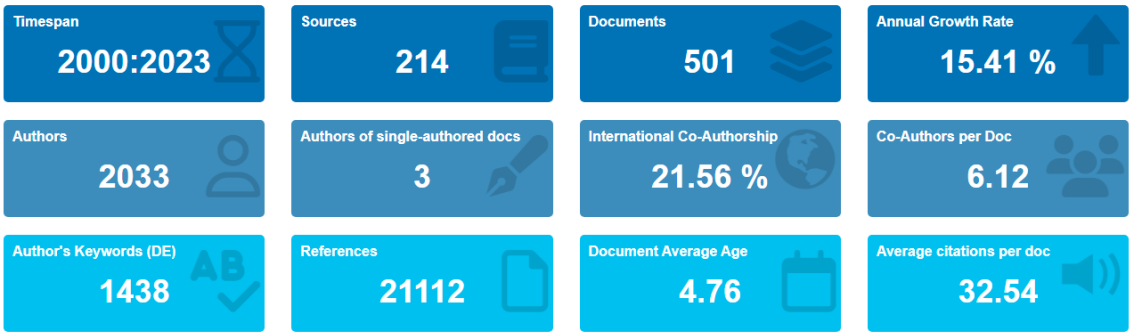
1 Article title, Abstract, Keywords

خیلی قابل تامل این اســـت در این حوزه تحقیق تعداد مطالعات تک نویسنده بسیار کم (۳ مطالعه یا ۰.۶٪ کل مطالعات) بوده است که خود نشان دهنده بین رشته ای بودن پرایمینگ بذر با پلاسما و مبتنی بر کار گروهی بودن این حوزه است.



شکل ۵- داده‌های اولیه بدست آمده در پایگاه اسکوپوس برای موضوع پرایمینگ بذر با پلاسمای سرد

Figure 5- Primary data obtained in the Scopus database for the subject of seed priming with cold plasma



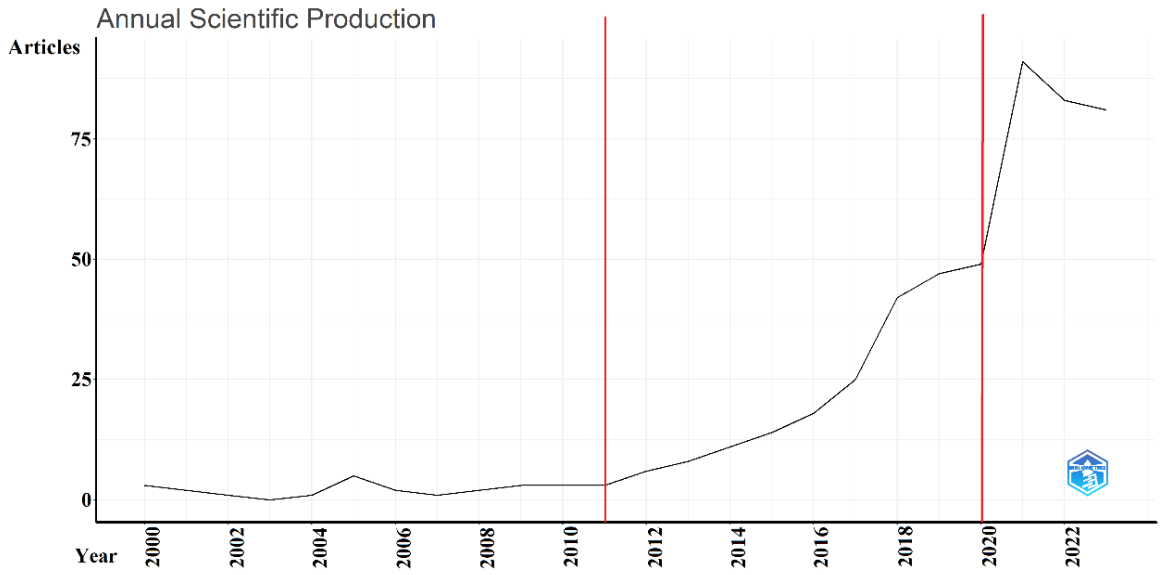
شکل ۶- نمای کلی مجموعه مورد مطالعه در حوزه پرایمینگ بذر با پلاسمای سرد

Figure 6- Overview of the studied collection in the field of seed priming with cold plasma

۱- چشم انداز کلی و روند انتشارات در تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما

روند انتشار مقاله در حوزه پرایمینگ بذر با پلاسما به شرح شکل ۷ اســـت. نتایج نشـــان می دهد که تولیدات علمی در طول زمان ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ روند افزایشی داشته است و می توان این روند را به ۳ دوره تقسیم کرد. دوره اول بین سال‌های ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۱ است که تعداد بسیار محدودی در این دوره مقاله منتشر شـده اسـت به طوریکه در بعضی سال‌ها انتشاری دیده نمی‌شود. ۲۶ مقاله (۵/۲ درصـد از کل مقالات) در این دوره منتشر شـده اسـت. دوره دوم بین ســـال‌های ۲۰۱۲ الی ۲۰۲۰ در نظر گرفته شـــد که یک روند افزایشی با شیب متوسط مشاهده می‌شود. این شیب نشان دهنده شـروع پژوهش در این زمینه بوده و حجم مقالات منتشر شـده در

این سال‌ها ۴۳.۹٪ از کل مقالات بوده که به طور میانگین در این بازه، سالانه ۴/۸۸ درصد از حجم کل مقالات در حوزه تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما منتشر شده است. دوره سوم بین سالهای ۲۰۲۱ الی ۲۰۲۳ بوده که یک رشد بسیار خوبی در تولید مقالات علمی مشاهده می‌شود. ۵۰.۹٪ کل مقالات در این دوره ۳ ساله منتشر شد که رشد بیش از ۳.۵ برابری نسبت به دوره قبل در میانگین تولیدات سالیانه (حدود ۱۶/۹۷ درصد) را نشان می دهد. روند افزایشی در این دوره نشان دهنده اهمیت موضوع و علاقمندی بیشتر محققان به این زمینه در سال‌های اخیر است.



شکل ۷- روند انتشار مقاله در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در حوزه پرایمینگ بذر با پلاسمای سرد

Figure 7- The publication trend of articles in the years 2000 to 2023 in the field of seed priming with cold plasma

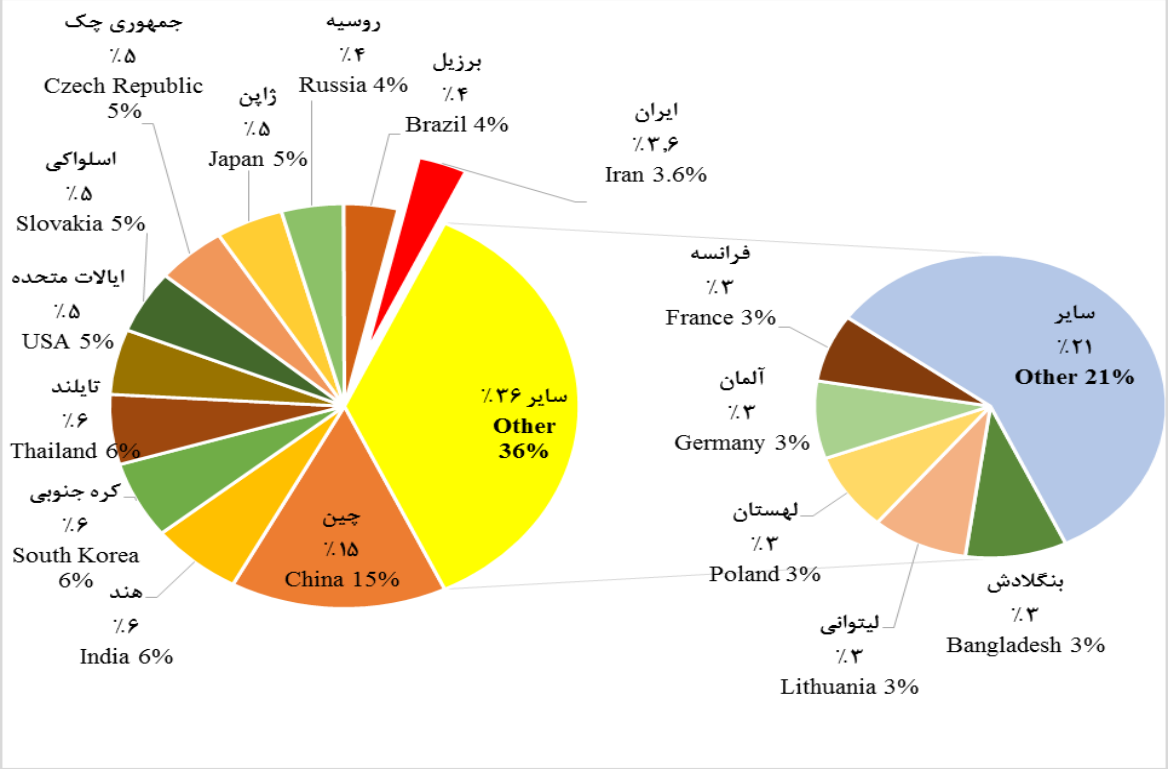
۲- کشورهای فعال در انتشارات پرایمینگ بذر با پلاسما

کشورهای فعال توسط نویسنده‌ها و وابستگی آنها در پایگاه داده مشخص شده است. در مطالعه حاضر، درصد مشارکت کشورها بر اساس رویکرد تعداد اسناد منتشر شده پژوهشی و به زبان انگلیسی در حوزه تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما بررسی شد. مطابق شکل ۸، بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۳، چین اکثر مطالعات را در این حوزه با ۸۰ مقاله (۱۵٪ کل مطالعات) انجام داده است. ایران با بیش از ۳/۶ درصد حجم مطالعات منتشر شده در این حوزه جایگاه یازدهم را کسب کرده است. باتوجه به نتایج تحلیل می توان بیان کرد که علاقمندان به حوزه پرایمینگ بذر با پلاسما در کشور، زمینه‌های مختلفی برای جای کار دارند و این حوزه تحقیقات با توجه به تنوع بذور مخصوصا تنوع بذور گیاهان دارویی نیاز به توسعه بیشتری در کشور دارد.

۳- تأثیرگذارترین انتشارات در تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما

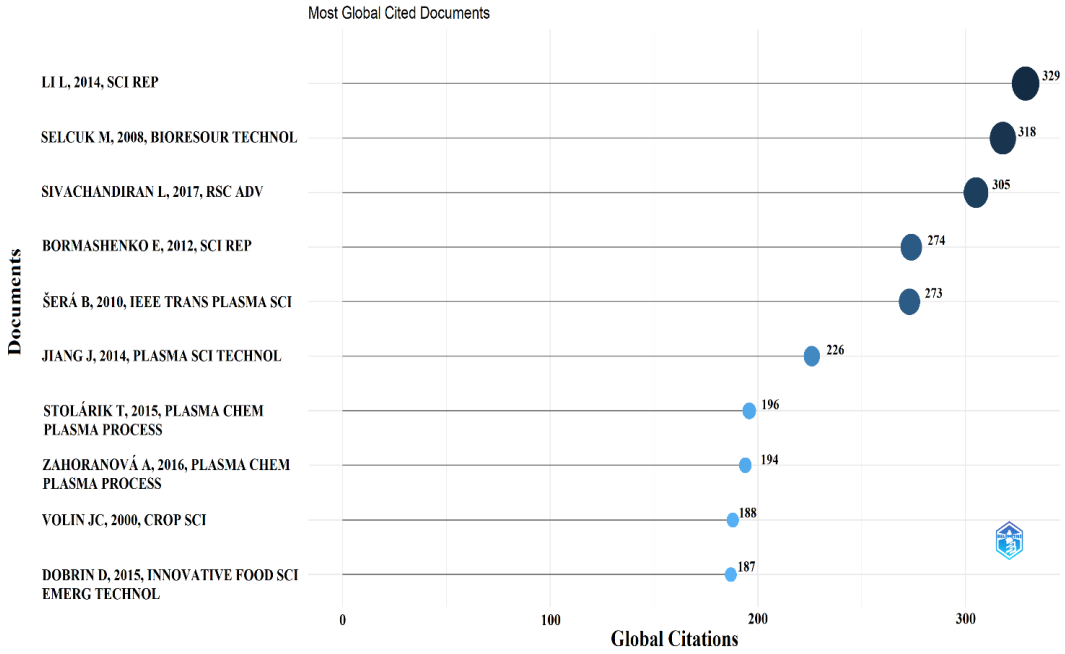
تحلیل استنادی شامل مطالعه الگوهای استناد بین تحقیقات برای درک روابط و تأثیر بین آثار تحقیقاتی مختلف است. ۱۰ مقاله پر استناد با توجه به خروجی پایگاه داده اسکوپوس در تاریخ مرداد ۱۴۰۳ در حوزه پرایمینگ بذر با پلاسما بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در شکل ۹ نشان داده شده است. (Bormashenko et al., 2012; Dobrin et al., 2015; Jiang et al., 2014a; Ling et al., 2014; Selcuk et al., 2008; Sera et al., 2010; Sivachandiran and Khacef, 2017; Stolárik et al., 2015; Volin et al., 2000; Zahoranová et al., 2016). از بین ۱۰ مقاله برتر پر استناد در این حوزه ۶ مقاله در بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰ (دوره دوم الگوی رشد) منتشر شدند. این مسئله نشان دهنده کیفیت مقالات این دوره است. بررسی نشان می دهد در بین ۵۰ مقاله پر استناد در این حوزه ۷۴ ٪ مقالات مربوط به دوره دوم الگوی رشد (بین سال‌های

۲۰۱۲ الی ۲۰۲۰) بوده و ۲۶٪ مقالات مربوط به دوره اول الگوی رشد (بین سال‌های ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۱) می‌شود.



شکل ۸- درصد مشارکت کشورها در انتشار مقاله در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در حوزه پرایمینگ بذر با پلاسمای سرد

Figure 8- The percentage of countries' participation in the publication of articles in the years 2000 to 2023 in the field of seed priming with cold plasma

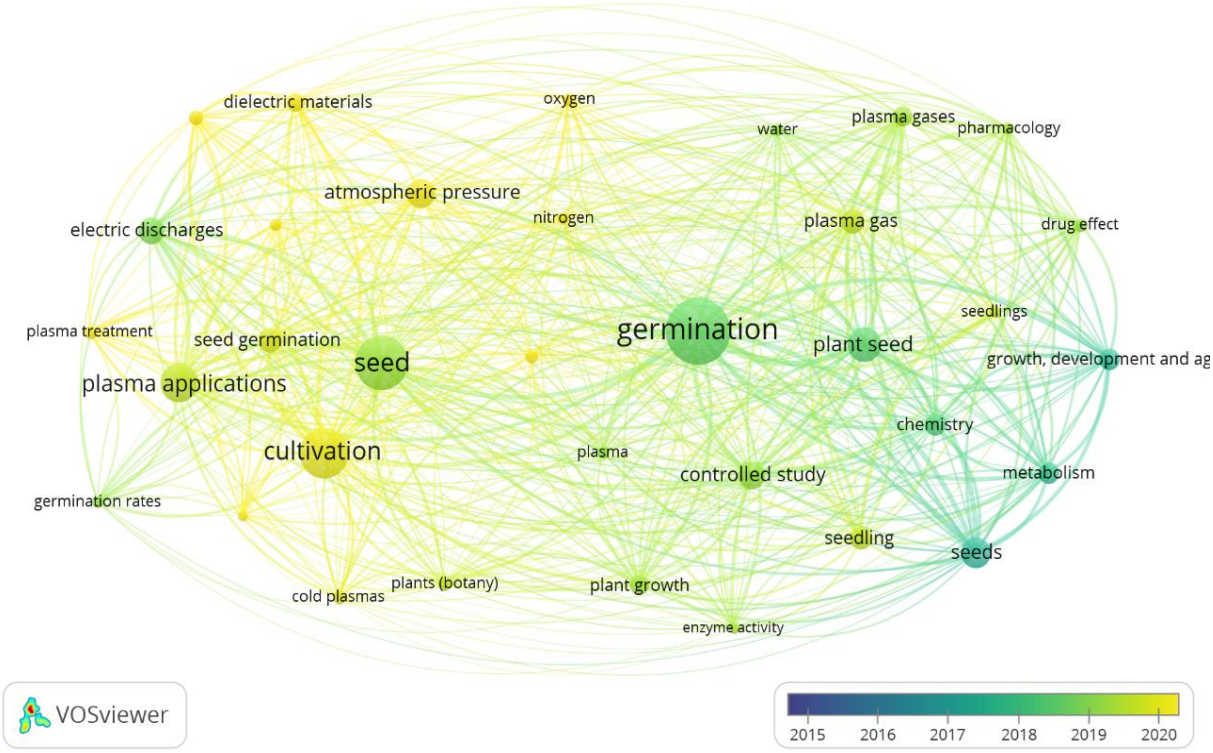


شکل ۹- مقالات پر استناد در حوزه تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسمای سرد در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

Figure 9- Highly cited articles in the field of seed priming research with cold plasma in the years 2000 to 2023

۴- تجزیه و تحلیل کلمات کلیدی در تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما

با تجزیه و تحلیل کلمات کلیدی انتشارات، پیشرفت‌های روند، کانون‌های تحقیقاتی و جهت‌های تحقیقاتی آینده پرایمینگ بذر با پلاسما را می توان شناسایی کرد. کلمات کلیدی در نشریات ابزارهای مهمی برای پالایش مقالات و به تصویر کشیدن مضامین اصلی آنها هستند و این کمک را به موتورهای جست و جو می کند تا مقالات مورد نظر مخاطب به راحتی پیدا شوند. با تجزیه و تحلیل فراوانی کلمات کلیدی در حوزه تحقیق، می‌توان نقاط داغ تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما را به طور مؤثر شناسایی کرد. در شکل ۱۰ کلمات کلیدی شاخص و پرتکرار در این حوزه تحقیقات آورده شده است. هر دایره یک کلید واژه را نشان می دهد و بزرگی دایره‌ها نشان دهنده حجم تکرار این کلمات کلیدی است. ضخامت خطوط اتصال بین کلمات نشان از استفاده هم زمانی آن کلمات با هم در مقالات این حوزه می باشد. رنگ دایره‌های کلمات کلیدی قدمت زمانی آن کلمه را در این تحقیقات نشان می دهد. به طور مثال کلمه کلیدی germination بیشترین تکرار و از زمان‌های دورتر وجود دارد. و کلمه کلیدی atmospheric pressure و cultivation به عنوان دو کلمه کلیدی پرتکرار در سال‌های اخیر بوده است و توجه محققان را در سال‌های گذشته توانسته است به خودش جلب کند.



شکل ۱۰- کلمات کلیدی شاخص و پرتکرار در تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسمای سرد

Figure 10- Index and frequent keywords in seed priming research with cold plasma

نتیجه‌گیری کلی

با روند رو به رشد جمعیت در جهان از یکسو و پیدایش گرمایش جهانی از سوی دیگر، حفظ امنیت غذایی یک چالش عمده و اجتناب ناپذیر برای دولت‌های مختلف محسوب می‌شود. در این راستا، معمولا محصولات کشاورزی و صنایع مرتبط با آن در درجه اول اهمیت قرار دارند که مستقیم یا غیرمستقیم با کشت و کار گیاهان مرتبط می باشد. با توجه به اینکه کشت و کار طیف عمده ای از گیاهان در سرتاسر جهان، اعم از زراعی و یا دارویی، با بذر همراه می باشد، بنابراین، یک نقطه عطف در امنیت غذایی محسوب می‌شود. در این راستا، پرایمنگ بذور، بویژه برای

گیاهان دارویی از درجه اهمیت بالایی برخوردار می باشد، و از بین روش‌های مختلف بکار گرفته شده در این زمینه، استفاده از پلاسمای سرد و آب تیمار شده با پلاسما بعنوان یک روش مناسب برای پرایمینگ بذور به کرات توصیه و گزارش شده است. بنابراین، باتوجه به موارد ذکر شده در بالا، می توان از این فناوریِ دوستدار محیط زیست در کشت و کار گیاهان دارویی در سطح وسیع استفاده نمود و نهایتا بهره وری را در زمینه صنعت گیاهان دارویی بهبود بخشید. به منظور ارائه درک روشن و دقیق از تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما، یک جستجو از پایگاه داده Scopus به عنوان وسیع ترین پایگاه مقالات علمی در این زمینه بر اساس عنوان مقاله، کلمات کلیدی و چکیده برای به دست آوردن داده‌ها انجام شد. عبارات جستجوی برای یافتن مقالات موجود در حوزه تیمار و پرایمینگ بذر با پلاسما، به شرح زیر بود: کلمه "پلاسمای سرد" و کلمات "بذر" و "جوانه‌زنی" و بجز کلمه "غشای پلاسمایی" در عنوان، چکیده و کلمات کلیدی مورد جستجو قرار گرفت. با در نظر گرفتن محدودیت زمانی در سال انتشار بین ۲۰۰۰ الی ۲۰۲۳، ۶۷۷ سند علمی در جستجوی اولیه بدست آمد که با اعمال معیارهای حذف، سندها به مقالات پژوهشی منتشر شده در زبان انگلیسی برای تحلیل و بررسی دقیق تر محدود شده اند و ۵۰۱ مقاله پژوهشی به زبان انگلیسی شناسایی شدند که در قالب فایل با پسوند CSV استخراج شدند. نتایج نشان داد حوزه پرایمینگ بذر با پلاسما با یک رشد خوب سالیانه (۱۵/۴۱ ٪) از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در حال توسعه بود و برای خلق ۵۰۱ مقاله علمی پژوهشی به زبان انگلیسی، ۲۰۳۳ محقق تلاش کردند که از این بین فقط تعداد ۳ مطالعه و ۳ نویسنده به صورت تک نویسنده نتایج خود را منتشر کردند که خود نشان دهنده بین رشته ای و مبتنی بر کار گروهی بودن این حوزه است. در این مطالعه ۱۰ مقاله برتر و پر استناد معرفی شدند. همچنین کلمات کلیدی پر تکرار و شاخص تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما از دید نویسندگان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد کلمه کلیدی germination بیشترین تکرار و از زمان‌های دورتر مورد توجه محققان این حوزه قرار داشت. در حالی که کلمه کلیدی atmospheric pressure و cultivation بعنوان دو کلمه کلیدی پرتکرار در سال‌های اخیر بوده است و توانسته است توجه محققان این حوزه را طی سالهای گذشته به خود جلب کند. همچنین در بخشی از این تجزیه و تحلیل، کشورهای فعال و پیشرو مورد تحقیق قرار گرفت که نتایج نشان می دهد چین پیشروترین کشور در انتشار تحقیقات این حوزه به شمار می آید. این در حالی است که ایران با بیش از ۳/۶٪ حجم مطالعات منتشر شده در این حوزه جایگاه یازدهم را کسب کرده است. با توجه به فاصله جایگاهی و حجم مطالعات منتشر شده در ایران به نسبت سایر کشورهای پیشرو و فعال، می توان بیان کرد که علاقمندان به حوزه پرایمینگ بذر با پلاسما در کشور، زمینه‌های مختلفی برای جای کار دارند و این حوزه تحقیقات با توجه به تنوع بذور مخصوصا تنوع بذور گیاهان دارویی نیاز به توسعه بیشتری در کشور دارد. از این رو این مطالعه با هدف ارائه یک درک جامع در قالب یک تحلیل آماری از بینش‌های ارزشمند و شناسایی روندهای پژوهش و توسعه پرایمینگ بذر با پلاسما، این امکان را برای محققان علاقمند ایجاد می کند تا جهت‌های تحقیقاتی آینده در این حوزه را شناسایی و استفاده کنند.

قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۰۰۰۷۵ انجام شده است.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچگونه تعارض منافعی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

Reference

Adhikari, B., Pangomm, K., Veerana, M., Mitra, S., & Park, G. (2020). Plant disease control by non-thermal atmospheric-pressure plasma. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 504001. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00077

Arsad, S., Arsad, A., Ker, P. J., Hannan, M., Tang, S. G., Goh, S., & Mahlia, T. (2024). Recent advancement in water electrolysis for hydrogen production: A comprehensive bibliometric analysis and technology updates. *International Journal of Hydrogen Energy*, *60*, 780-801. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.184

Babajani, A., Iranbakhsh, A., Oraghi Ardebili, Z., & Eslami, B. (2019). Seed priming with non-thermal plasma modified plant reactions to selenium or zinc oxide nanoparticles: cold plasma as a novel emerging tool for plant science. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, *39*, 21-34. https://doi.org/10.1007/s11090-018-9934-y

Bárdos, L., & Baránková, H. (2010). Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications. *Thin Solid Films*, *518*(23), 6705-6713. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.07.044

Barrot, J. S. (2024). Trends in automated writing evaluation systems research for teaching, learning, and assessment: A bibliometric analysis. *Education and Information Technologies*, *29*(6), 7155-7179. https://doi.org/10.1007/s10639-023-12083-y

Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (1998). *Seeds: ecology, biogeography, and, evolution of dormancy and germination*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2013-0-00597-X

Baskin, J. M., & Baskin, C. C. (2004). A classification system for seed dormancy. *Seed Science Research*, *14*(1), 1-16. https://doi.org/10.1079/SSR2003150

B**azaka, K., Jacob, M. V., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2011).** Plasma-assisted surface modification of organic biopolymers to prevent bacterial attachment. *Acta Biomaterialia*, *7*(5), 2015-2028. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.12.024

Bazaka, K., Jacob, M. V., Truong, V. K., Wang, F., Pushpamali, W. A. A., Wang, J. Y., Ellis, A. V., Berndt, C. C., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2010). Plasma-enhanced synthesis of bioactive polymeric coatings from monoterpene alcohols: A combined experimental and theoretical study. *Biomacromolecules*, *11*(8), 2016-2026. https://doi.org/10.1021/bm100369n

Benstaali, B., Boubert, P., Cheron, B., Addou, A., & Brisset, J. (2002). Density and rotational temperature measurements of the OH and NO radicals produced by a gliding arc in humid air. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, *22*, 553-571. https://doi.org/10.1023/A:1021371529955

Bentsink, L., & Koornneef, M. (2008). Seed dormancy and germination. *The Arabidopsis Book/American Society of Plant Biologists*, *6*. https://doi.org/10.1199/tab.0119

Bewley, J. D. (1997). Seed germination and dormancy. *The plant cell*, *9*(7), 1055. https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1055

Bormashenko, E., Grynyov, R., Bormashenko, Y., & Drori, E. (2012). Cold radiofrequency plasma treatment modifies wettability and germination speed of plant seeds. *Scientific Reports*, *2*(1), 741. https://doi.org/10.1038/srep00741

Bourke, P., Ziuzina, D., Boehm, D., Cullen, P. J., & Keener, K. (2018). The potential of cold plasma for safe and sustainable food production. *Trends in Biotechnology*, *36*(6), 615-626. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.11.001

Chaghakaboodi, Z., Nasiri, J., & Farahani, S. (2022). Fumigation Toxicity of the Essential Oils of Ferula persica against *Tribolium castaneum* and *Ephestia kuehniella*. *Agrotechniques in Industrial Crops*, *2*(3), 123-130. https://doi.org/10.22126/atic.2022.8344.1068

Cosh, K., Ramingwong, S., & Ramingwong, L. (2024). A bibliometric analysis of library review trends. *Global Knowledge, Memory and Communication*, *73*(4/5), 650-661. https://doi.org/10.1108/GKMC-06-2022-0149

Crookes, W. (1879). On radiant matter; a lecture delivered to the British Association for the Advancement of Science, at Sheffield, Friday, August 22, 1879. *American Journal of Science*, *3*(106), 241-262. https://doi.org/10.5962/bhl.title.32913

Dobrin, D., Magureanu, M., Mandache, N. B., & Ionita, M.-D. (2015). The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *29*, 255-260. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.02.006

Ebadi, A. G., Kahrizi, D., & Rostami, H. (2024). Production and Biochemical Evaluation of Camelina [*Camelina sativa* (L.) Crantz] Doubled Haploid Lines. *Journal of Medicinal Plants and By-Products*, *13*(2), 361-368. https://doi.org/10.22034/jmpb.2023.359588.1489

Feizollahi, E., Misra, N., & Roopesh, M. (2021). Factors influencing the antimicrobial efficacy of dielectric barrier discharge (DBD) atmospheric cold plasma (ACP) in food processing applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *61*(4), 666-689. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1743967

Finch-Savage, W. E., & Leubner-Metzger, G. (2006). Seed dormancy and the control of germination. *New Phytologist*, *171*(3), 501-5. 23. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01787.x

Gandasari, D., Tjahjana, D., Dwidienawati, D., & Sugiarto, M. (2024). Bibliometric and visualized analysis of social network analysis research on Scopus databases and VOSviewer. *Cogent Business & Management*, *11*(1), 2376899.https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2376899

Ghasempour, M., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., & Oraghi Ardebili, Z. (2020). Seed priming with cold plasma improved seedling performance, secondary metabolism, and expression of deacetylvindoline O-acetyltransferase gene in *Catharanthus roseus*. *Contributions to Plasma Physics*, *60* (4)e201900159. https://doi.org/10.1002/ctpp.201900159

Guragain, R. P., Baniya, H. B., Guragain, D. P., & Subedi, D. P. (2024). Exploring the effects of non-thermal plasma pre-treatment on coriander (*Coriander sativum* L.) seed germination efficiency. *Heliyon*, *10*.(7). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28763

Hatami, S., Hatami-B, M., & Kahrizi, D. (2024). Data Mining Approach in the Agricultural Industry, Medicinal Plants (case study); A Review. *Journal of Medicinal Plants and By-product*. https://doi.org/10.22034/jmpb.2024.364419.1636

Hussain, S., Khan, F., Hussain, H. A., & Nie, L. (2016). Physiological and biochemical mechanisms of seed priming-induced chilling tolerance in rice cultivars. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 178194. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00116

Iranbakhsh, A., Oraghi Ardebili, Z., Molaei, H., Oraghi Ardebili, N., & Amini, M. (2020). Cold plasma up-regulated expressions of WRKY1 transcription factor and genes involved in biosynthesis of cannabinoids in Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, *40*, 527-537. https://doi.org/10.1007/s11090-020-10058-2

Iranbakhsh, A., Oraghi Ardebili, Z., Oraghi Ardebili, N., Ghoranneviss, M., & Safari, N. (2018). Cold plasma relieved toxicity signs of nano zinc oxide in *Capsicum annuum* cayenne via modifying growth, differentiation, and physiology. *Acta Physiologiae Plantarum*, *40*, 1-11. https://doi.org/10.1007/s11738-018-2730-8

Jiang, J., He, X., Li, L., Li, J., Shao, H., Xu, Q., Ye, R., & Dong, Y. (2014). Effect of cold plasma treatment on seed germination and growth of wheat. *Plasma Science and Technology*, *16*(1), 54. https://doi.org/10.1088/1009-0630/16/1/12

Jiang, J., Lu, Y., Li, J., Li, L., He, X., Shao, H., & Dong, Y. (2014). Effect of seed treatment by cold plasma on the resistance of tomato to *Ralstonia solanacearum* (bacterial wilt). *Plos One*, *9*(5), e97753. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097753

Jisha, K., Vijayakumari, K., & Puthur, J. T. (2013). Seed priming for abiotic stress tolerance: an overview. *Acta Physiologiae Plantarum*, *35*, 1381-1396. https://doi.org/10.1007/s11738-012-1186-5

Khakdan, F., Nasiri, J., Ranjbar, M., & Alizadeh, H. (2017). Water deficit stress fluctuates expression profiles of 4Cl, C3H, COMT, CVOMT and EOMT genes involved in the biosynthetic pathway of volatile phenylpropanoids alongside accumulation of methylchavicol and methyleugenol in different Iranian cultivars of basil. *Journal of Plant Physiology*, *218*, 74-83. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.07.012

Khakdan, F., Ranjbar, M., Nasiri, J., Ahmadi, F. S., Bagheri, A., & Alizadeh, H. (2016). The relationship between antioxidant compounds contents and antioxidant enzymes under water-deficit stress in the three Iranian cultivars of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, *38*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s11738-016-2241-4

Khan, M., Ali, S., Al Azzawi, T. N. I., Saqib, S., Ullah, F., Ayaz, A., & Zaman, W. (2023). The key roles of ROS and RNS as a signaling molecule in plant-microbe interactions. *Antioxidants*, *12*(2), 268. https://doi.org/10.3390/antiox12020268

Kiani, S., Kahrizi, D., Varmira, K., & Kassaee, S. M. (2023). The Effect of Ethyl Methylsulfonate on Germination and Morphological Traits of Camelina as a Medicinal Plant. *Journal of Medicinal Plants and By-product*, *12*(3), 225-231. https://doi.org/10.22092/jmpb.2022.355966.1398

Krapivina, S. A., Filippov, A. K., Levitskaya, T. N., & Bakhvalov, A. (1994). Gas plasma treatment of plant seeds. In: Google Patents.

Kumar, R., Saxena, S., Kumar, V., Prabha, V., Kumar, R., & Kukreti, A. (2024). Service innovation research: a bibliometric analysis using VOSviewer. *Competitiveness Review: An International Business Journal*, *34*(4), 736-760. https://doi.org/10.1108/CR-01-2023-0010

Kwon, N., Kim, D., Swamy, K., & Yoon, J. (2021). Metal-coordinated fluorescent and luminescent probes for reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS). *Coordination Chemistry Reviews*, *427*, 213581. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213581

Langmuir, I. (1928). Oscillations in ionized gases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *14*(8), 627-637. https://doi.org/10.1073/pnas.14.8.627

Laroussi, M. (2020). Cold plasma in medicine and healthcare: The new frontier in low temperature plasma applications. *Frontiers in Physics*, *8*, 74 https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00074.

Lee, Y., Lee, Y. Y., Kim, Y. S., Balaraju, K., Mok, Y. S., Yoo, S. J., & Jeon, Y. (2021). Enhancement of seed germination and microbial disinfection on ginseng by cold plasma treatment. *Journal of Ginseng Research*, *45*(4), 519-526. https://doi.org/10.1016/j.jgr.2020.12.002

Li, H.-P., Ostrikov, K. K., & Sun, W. (2018). The energy tree: Non-equilibrium energy transfer in collision-dominated plasmas. *Physics Reports*, *770*, 1-45. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.08.002

Li, Y., Song, Z., Zhang, T., Ding, C., & Chen, H. (2022). Gene expression variation of Astragalus adsurgens Pall. through discharge plasma and its activated water. *Free Radical Biology and Medicine*, *182*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2022.02.016

Ling, L., Jiafeng, J., Jiangang, L., Minchong, S., Xin, H., Hanliang, S., & Yuanhua, D. (2014). Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. *Scientific Reports*, *4*(1), 5859. https://doi.org/10.1038/srep05859

Lu, X., Naidis, G., Laroussi, M. a., & Ostrikov, K. (2014). Guided ionization waves: Theory and experiments. *Physics Reports*, *540*(3), 123-166. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2014.02.006

Lu, X., Naidis, G. V., Laroussi, M., Reuter, S., Graves, D. B., & Ostrikov, K. (2016). Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. *Physics Reports*, *630*, 1-84. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.03.003

Mazandarani, A., Goudarzi, S., Ghafoorifard, H., & Eskandari, A. (2020). Evaluation of DBD plasma effects on barley seed germination and seedling growth. *IEEE Transactions on Plasma Science*, *48*(9), 3115-3121. https://doi.org/10.1109/TPS.2020.3012909

Mazandarani, A., Goudarzi, S., Ghafoorifard, H., Eskandari, A., & Shahshenas, S. (2020). Calculation of temperature and density for dielectric-barrier discharge (DBD) plasma using COMSOL. *Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology (JONSAT)*, *40*(4), 99-108. https://doi.org/10.24200/nst.2020.1076

Mazandarani, A., Goudarzi, S., Jafarabadi, M., & Nekoo, E. A. (2022). Effects of cold plasma on *Staphylococcus aureus*. *Journal of Family & Reproductive Health*, *16*(3), 212. https://doi.org/10.18502/jfrh.v16i3.10583

Mildaziene, V., Pauzaite, G., Naucienė, Z., Malakauskiene, A., Zukiene, R., Januskaitiene, I., Jakstas, V., Ivanauskas, L., Filatova, I., & Lyushkevich, V. (2018). Pre-sowing seed treatment with cold plasma and electromagnetic field increases secondary metabolite content in purple coneflower (*Echinacea purpurea*) leaves. *Plasma Processes and Polymers*, *15*(2), 1700059. https://doi.org/10.1002/ppap.201700059

Moreau, M., Orange, N., & Feuilloley, M. (2008). Non-thermal plasma technologies: new tools for bio-decontamination. *Biotechnology advances*, *26*(6), 610-617. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.08.001

Namdaran Gooran, M., Jalali Honarmand, S., & Kahrizi, D. (2022). The Effect of Different Light Spectrum Ratios and Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) on Some Agronomic and Physiological Traits in *Artemisia annua* L. *Journal of Medicinal Plants and By-product*, *11*(2), 139-147. https://doi.org/10.22092/jmpb.2021.354106.1348

Nasiri, J., Jamali, A., Mazandarani, A., & Chaghakaboodi, Z. (2025). Cold argon plasma (CAP)-assisted seed priming to improve germination metrics of Ferula assa-foetida, an endangered medicinal plant. *Results in Engineering*, *25*, 104332. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104332

Nasiri, A., Fallah, S., Sadeghpour, A., & Barani-Beiranvand, H. (2023). Essential Oil Profile in Different Parts of *Echinophora cinerea* (Boiss.). *Agrotechniques in Industrial Crops*. https://doi.org/10.22126/atic.2023.9492.1108

Nasiri, J., Naghavi, M. R., Alizadeh, H., & Moghadam, M. R. F. (2016). Seasonal-based temporal changes fluctuate expression patterns of TXS, DBAT, BAPT and DBTNBT genes alongside production of associated taxanes in *Taxus baccata*. *Plant Cell Reports*, *35*, 1103-1119. https://doi.org/10.1007/s00299-016-1941-y

Nasiri, J., Naghavi, M. R., Motamedi, E., Alizadeh, H., Moghadam, M. R. F., Nabizadeh, M., & Mashouf, A. (2017). Carbonaceous sorbents alongside an optimized magnetic solid phase extraction (MSPE) towards enrichment of crude Paclitaxel extracts from callus cultures of *Taxus baccata*. *Journal of Chromatography B*, *1043*, 96-106. https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2016.10.029

Neyts, E. C., Ostrikov, K., Sunkara, M. K., & Bogaerts, A. (2015). Plasma catalysis: synergistic effects at the nanoscale. *Chemical reviews*, *115*(24), 13408-13446. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00362

Nikolaeva, M. (2004). On criteria to use in studies of seed evolution. *Seed Science Research*, *14*(4), 315-320. https://doi.org/10.1079/SSR2004185

Paparella, S., Araújo, S., Rossi, G., Wijayasinghe, M., Carbonera, D., & Balestrazzi, A. (2015). Seed priming: state of the art and new perspectives. *Plant Cell Reports*, *34*, 1281-1293. https://doi.org/10.1007/s00299-015-1784-y

Pashaei, M., Fayçal, Z., Kahrizi, D., & Ercisli, S. (2024). Medicinal Plants and Natural Substances for Poultry Health: A Review. *Journal of Poultry Sciences and Avian Diseases*, *2*(2), 36-49. https://doi.org/10.61838/kman.jpsad.2.2.5

Paul, S., Dey, S., & Kundu, R. (2022). Seed priming: an emerging tool towards sustainable agriculture. *Plant Growth Regulation*, *97*(2), 215-234. https://doi.org/10.1007/s10725-021-00761-1

Pipliya, S., Kumar, S., Babar, N., & Srivastav, P. P. (2023). Recent trends in non-thermal plasma and plasma activated water: Effect on quality attributes, mechanism of interaction and potential application in food & agriculture. *Food Chemistry Advances*, 100.249. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100249

Rifna, E., Ramanan, K. R., & Mahendran, R. (2019). Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*, *86*, 95-108. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029

Robinson, M. M., & Zhang, X. (2011). The world medicines situation 2011, traditional medicines: Global situation, issues and challenges. *World Health Organization, Geneva*, *31*, 1-2.

Sarkar, B., Savita, S., Varalaxmi, Y., Vanaja, M., Kumar, N. R., Sathish, P., Lakshmi, N. J., Prabhakar, M., Shanker, A., & Yadav, S. (2022). Stress Reactions of Maize Genotypes to Drought Stress at Different Phenophases and Recovery. *Russian Journal of Plant Physiology*, *69*(3), 54. https://doi.org/10.1134/S1021443722030128

Selcuk, M., Oksuz, L., & Basaran, P. (2008). Decontamination of grains and legumes infected with *Aspergillus* spp. and *Penicillum* spp. by cold plasma treatment. *Bioresource Technology*, *99*(11), 5104-5109. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.076

Sera, B., Spatenka, P., Šerý, M., Vrchotova, N., & Hruskova, I. (2010). Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth. *IEEE Transactions on Plasma Science*, *38*(10), 2963-2968. https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2060728

Shashikanthalu, S. P., Ramireddy, L., & Radhakrishnan, M. (2020). Stimulation of the germination and seedling growth of *Cuminum cyminum* L. seeds by cold plasma. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, *18*, 100259. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100259

Shelar, A., Singh, A. V., Dietrich, P., Maharjan, R. S., Thissen, A., Didwal, P. N., Shinde, M., Laux, P., Luch, A., & Mathe, V. (2022). Emerging cold plasma treatment and machine learning prospects for seed priming: a step towards sustainable food production. *RSC Advances*, *12*(17), 1046. 10488-7. https://doi.org/10.1039/d2ra00809b

Sheteiwy, M. S., An, J., Yin, M., Jia, X., Guan, Y., He, F., & Hu, J. (2019). Cold plasma treatment and exogenous salicylic acid priming enhances salinity tolerance of *Oryza sativa* seedlings. *Protoplasma*, *256*, 79-99. https://doi.org/10.1007/s00709-018-1279-0

Šimek, M., & Homola, T. (2021). Plasma-assisted agriculture: history, presence, and prospects—a review. *The European Physical Journal D*, *75*, 1-31. https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00206-4

Singh, R., Prasad, P., Mohan, R., Verma, M. K., & Kumar, B. (2019). Radiofrequency cold plasma treatment enhances seed germination and seedling growth in variety CIM-Saumya of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, *12*, 78-81. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.11.005

Sivachandiran, L., & Khacef, A. (2017). Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment. *RSC Advances*, *7*(4), 1822-1832. https://doi.org/10.1039/C6RA24762H

Soni, A., Choi, J., & Brightwell, G. (2021). Plasma-activated water (PAW) as a disinfection technology for bacterial inactivation with a focus on fruit and vegetables. *Foods*, *10*(1), 166. https://doi.org/10.3390/foods10010166

Stolárik, T., Henselová, M., Martinka, M., Novák, O., Zahoranová, A., & Černák, M. (2015). Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, *35*, 659-676. https://doi.org/10.1007/s11090-015-9627-8

Varier, A., Vari, A. K., & Dadlani, M. (2010). The subcellular basis of seed priming. *Current Science*, 450-456. https://www.jstor.org/stable/24109568

Volin, J. C., Denes, F. S., Young, R. A., & Park, S. M. (2000). Modification of seed germination performance through cold plasma chemistry technology. *Crop Science*, *40*(6), 1706-1718. https://doi.org/10.2135/cropsci2000.4061706x

Wang, H., Han, R., Yuan, M., Li, Y., Yu, Z., Cullen, P. J., Qijing, D., Yang, Y., & Wang, J. (2023). Evaluation of plasma-activated water: Efficacy, stability, physicochemical properties, and mechanism of inactivation against *Escherichia coli*. *LWT*, *184*, 114969. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114969

Yan, D., Sherman, J. H., & Keidar, M. (2017). Cold atmospheric plasma, a novel promising anti-cancer treatment modality. *Oncotarget*, *8*(9), 15977. https://doi.org/10.18632/oncotarget.13304

Yang, X., Zhang, C., Li, Q., & Cheng, J.-H. (2023). Physicochemical properties of plasma-activated water and its control effects on the quality of strawberries. *Molecules*, *28*(6), 2677. https://doi.org/10.3390/molecules28062677

Yodpitak, S., Mahatheeranont, S., Boonyawan, D., Sookwong, P., Roytrakul, S., & Norkaew, O. (2019). Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice. *Food Chemistry*, *289*, 328-339. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.061

Zahoranová, A., Henselová, M., Hudecová, D., Kaliňáková, B., Kováčik, D., Medvecká, V., & Černák, M. (2016). Effect of cold atmospheric pressure plasma on the wheat seedlings vigor and on the inactivation of microorganisms on the seeds surface. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, *36*, 397-414. https://doi.org/10.1007/s11090-015-9684-z

Zhou, R., Zhou, R., Wang, P., Xian, Y., Mai-Prochnow, A., Lu, X., Cullen, P., Ostrikov, K. K., & Bazaka, K. (2020). Plasma-activated water: Generation, origin of reactive species and biological applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *53*(30), 303001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab81cf