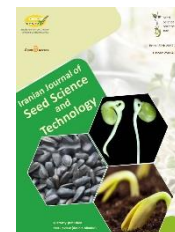




## Iranian Journal of Seed Science and Technology



ISSN: 2588-4638

### Research Article

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

Zeinab Chaghakaboodi<sup>1</sup>, Danial Kahrizi<sup>2</sup>, Abolfazl Mazandarani<sup>3</sup>, Jaber Nasiri<sup>4\*</sup>

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, Karaj, 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](mailto: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. (xxxx). An overview of cold plasma-assisted priming on seed germination of medicinal plants and metabolite alterations. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, XXXX, XX (X), XX-XX. <https://doi.org/10.22092/ijst.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,

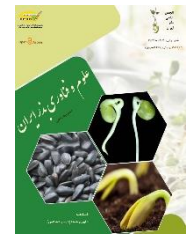
such as VOSviewer and R-Studio, further demonstrate the growth and development of seed priming with plasma over the years. The research indicates a steady annual growth rate of 15.41% from 2000 to 2023, resulting in a total of 501 scientific research articles and the contributions of 2,033 researchers. 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.



## 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<sup>۱</sup>، دانیال کهریزی<sup>۲</sup>، ابوالفضل مازندرانی<sup>۳</sup>، جابر نصیری<sup>۴\*</sup>

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 گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کرج، ایران.
۴. پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کرج، ایران.

## چکیده

## 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](mailto:jnasiri@aeoi.org.ir)

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 می‌کند 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 گسترده‌ای را در این زمینه انجام داده اند، اما تحلیل‌ها نشان می‌دهد 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 آنالیز داده‌ها 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.

## نحوه استناد به این مقاله:

Chaghakaboodi, Z., Kahrizi, D., Mazandarani, A., & Nasiri, J. (xxxx). An overview of cold plasma-assisted priming on seed germination of medicinal plants and metabolite alterations. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, xxxx, xx (X), xx-xx. <https://doi.org/10.22092/ijssst.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 می‌باشند (Khakdan et al., 2017; Khakdan et al., 2016; Nasiri et al., 2016; Nasiri et al., 2023)، و حتی می‌توانند 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 می‌نماید. 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

جهش‌زایی القایی نظیر پرتوتابی با گاما و یا استفاده از جهش‌زاهای شیمیایی نظیر اتیل متیل سولفانات (EMS) می‌توان 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 عمدتاً 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 بطور کلی تحت عنوان "پرایمینگ بذر" شناخته می‌شوند. از بین منابع مختلفی که از دیرباز تاکنون برای این مهم استفاده می‌گردد، اخیراً از "فناوری پلاسما 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، در ابتدا 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 پلاسما سرد شرح داده می‌شود. همچنین انواع پلاسما مناسب برای پرایمینگ بذور معرفی شده و نهایتاً 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 معمولاً تولید وسیع و پایدار ترکیبات دارویی موجود در گیاهان دارویی با چالش‌هایی چون مقادیر بسیار پایین 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., 2017; Nasiri et al., 2016). 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 بذر 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 گاه‌ها، بذر 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 بذر گیاه اولین و ضروری‌ترین 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 نهایتاً تولید در سطح تجاری) نیاز به بذر با قدرت جوانه‌زنی بالا و به موقع از اهمیت بالایی برخوردار است. درضمن، طول دوره جوانه‌زنی بذر، به عنوان یک عامل مهم در زراعت و اصلاح نباتات تلقی می‌شود، به طوری که ارقامی که سریعتر این دوره را پشت سر می‌گذارند، معمولاً از مطلوبیت بالایی برخوردار هستند و اقبال کشاورزان به سمت آنها می‌باشد. موضوع آخر و قابل اهمیت مبحث خواب بذر می‌باشد که خود بر اقسام مختلفی طبقه‌بندی می‌شود و معمولاً برای توسعه کشت و کار در سطح وسیع و ویژه برای گیاهان با طول دوره رشد کوتاه، از اهمیت بالایی برخوردار است.

### ۲- عوامل و موانع دخیل در جوانه‌زنی بذر گیاهان

بطور کلی، چرخه زندگی گیاهان اعم از یکساله، دوساله و چندساله، دستخوش تغییرات بسیاری است که معمولاً شروع آن با جوانه‌زنی بذر (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 حیاتی‌ترین و پیچیده‌ترین

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، بذر برخی گیاهان معمولاً فاقد خواب بوده و معمولاً جوانه‌زنی بذر 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 بذر برخی گیاهان حتی در صورت مساعد بودن شرایط محیطی، با تاخیر صورت می‌پذیرد، که تحت عنوان خواب بذر نامیده می‌شود. خواب بذر به بذر 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، بذر دارای خواب نیاز به یک فرایند زمانی خاص دارند تا شرایط بیرونی (نظیر گیاهان با سطوح بذر 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 کاملاً برای جوانه‌زنی فراهم گردد (Finch-Savage and Leubner-Metzger, 2006).

در رابطه به موارد فوق، بطور کلی، خواب بذر در گیاهان به چندین گروه تقسیم بندی می‌شود. ماریانا جی نیکولاوا (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).



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 بذور 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 بذور، 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، معمولاً برای بذور دارای خواب و همچنین با قدرت جوانه‌زنی پایین، از تیمارهای مختلفی نظیر پردازش فشار بالا<sup>۴</sup>، میدان الکتریکی پالسی<sup>۵</sup>، فراصوت<sup>۶</sup>، پردازش اُزن<sup>۷</sup>، اشعه ماوراء بنفش<sup>۸</sup>، میدان مغناطیسی<sup>۹</sup>، تابش مایکروویو<sup>۱۰</sup>، پلاسماهای غیر حرارتی<sup>۱۱</sup>، آب اکسید کننده الکترولیز شده<sup>۱۲</sup>، و آب فعال شده با پلاسما<sup>۱۳</sup> 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 پلاسماهای سرد

#### ۱- تاریخچه و کاربردهای فناوری پلاسماهای 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

۳- راهکارهای رفع موانع دخیل در جوانه‌زنی بذور گیاهان جوانه‌زنی یک فرآیند پیچیده و در عین حال حیاتی بذور است که شامل سه مرحله جذب<sup>۱</sup>، فعال‌سازی یا آماده‌سازی<sup>۲</sup> و جوانه‌زنی<sup>۳</sup> 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 بازسازی کنند. مرحله فعال سازی یا آماده سازی، تاخیر در جوانه‌زنی بذور 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 بذور هستند. تا این مرحله، فرآیند جوانه‌زنی بذور یک پدیده برگشت پذیر باقی می‌ماند. طی مرحله سوم (یعنی مرحله جوانه‌زنی)، در نهایت جوانه‌زنی بذور از طریق بیرون زدگی ریشه چه و ساقه چه صورت می‌گیرد. این فاز همچنین با جذب سریع آب همراه است (Paul et al., 2022). بطور کلی، پرایمینگ بذور دو مرحله اولیه جوانه‌زنی بذور 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 بذورهای پرایم شده قبلاً دو مرحله اولیه را انجام داده‌اند و در زمان کاشت می‌توانند به راحتی جوانه بزنند.

پرایمینگ بذور (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

<sup>1</sup> Imbibition phase

<sup>2</sup> Activation or preparatory phase

<sup>3</sup> Germination

<sup>4</sup> High pressure processing

<sup>5</sup> Pulsed electric field

<sup>6</sup> Ultrasound

<sup>7</sup> Ozone processing

<sup>8</sup> Ultraviolet

<sup>9</sup> Magnetic field

<sup>10</sup> Microwave radiation

<sup>11</sup> Non-thermal plasma

<sup>12</sup> Electrolyzed oxidizing water

<sup>13</sup> Plasma activated water

۱۹۲۷، ایروینگ لانگمویر جایزه نوبل شیمی را برای ابداع اصطلاح "پلاسما" دریافت کرد. با توجه به اینکه لانگمویر پدیده غلاف پلاسما<sup>۱</sup> 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 پلاسما 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 پلاسما 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 گسترده‌ای 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 پلاسما سرد را برای بهبود مقاومت بذور به بیماری پژمردگی باکتریایی گوجه فرنگی را گزارش نمودند (Jiang et al., 2014b). اثر همزمان تیمار بذور با پلاسما 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 پلاسما سرد بر بذور فلفل قرمز (*Capsicum annuum*) مورد بررسی قرار گرفت (Iranbakhsh et al., 2018). اصطلاح "واکسیناسیون پلاسمایی"<sup>۲</sup>

موجود در پلاسما به عنوان گونه‌های "سنگین" تعریف می‌شوند (Moreau et al., 2008). امروزه، علم و فناوری پلاسما سرد بطور فزاینده‌ای برای استفاده در انبوهی از مسائل ارائه شده در بخش‌های کشاورزی و مواد غذایی مورد بررسی قرار می‌گیرد (Bourke et al., 2018)، به گونه‌ای 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 شگفت‌انگیز موجود در طبیعت که توسط بشر کشف شده است، فناوری پلاسما سرد در طی تاریخ پیدایش آن دارای نقاط عطفی بوده است.

پلاسماها بطور کلی براساس تعادل دمایی ترمودینامیک اجزای تشکیل دهنده به دو گروه اصلی پلاسما حرارتی و پلاسما غیر حرارتی (یا پلاسما سرد) طبقه‌بندی می‌شوند (Moreau et al., 2017; Neyts et al., 2015; Yan et al., 2008). نوع اول پلاسما (پلاسما 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 (پلاسما 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 پرانرژی 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., 2010; Bazaka et al., 2011).

شکل ۱ جدول زمانی برخی از نقاط عطف مهم فناوری پلاسما سرد در تیمار بذور 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 پلاسما 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

<sup>1</sup> Plasma sheath

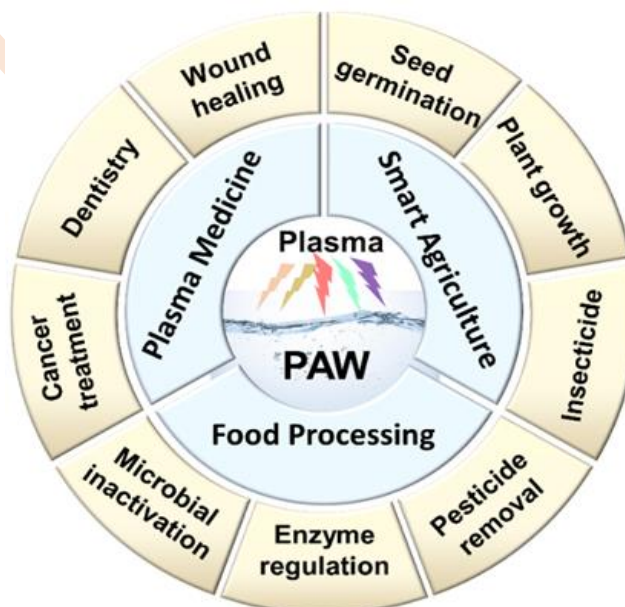
<sup>2</sup> Plasma vaccination

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



شکل ۱- جدول زمانی 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 کاربرد گسترده 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

پلاسمای سرد را می توان با قرار دادن یک گاز در معرض اشكال مختلف انرژی از جمله: میدان های حرارتی، الکتریکی یا مغناطیسی و فرکانس های رادیویی یا میکروویو، که انرژی جنبشی الکترون ها را افزایش می دهند و منجر به افزایش تعداد برخوردها در ذرات شکیل دهنده آن می شوند، ایجاد کرد. معمولاً منابع پلاسمای سرد اتمسفری شامل پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک (DBD)، پلاسمای فرکانس رادیویی (RF)، پلاسمای جت (PJ)، تخلیه کرونا (CD)، تخلیه گلاو یا گلاپدینک آرک (GA) می باشند (Bárdos and Baránková, 2010; Moreau et al., 2008). اجزای پلاسمای سرد اتمسفری هوا شامل الکترون ها، یون ها، ذرات خنثی، UV/VUV، میدان الکتریکی، و بسیاری از رادیکال های اکسیژن و نیتروژن است که در برخورد با آب گونه های فعال نیتروژن (RNS) و گونه های فعال اکسیژن (ROS) با عمر طولانی همچون آب اکسیژینه ( $H_2O_2$ )، آمونیم ( $NH_4^+$ )، نترات ( $NO_3^-$ )، نیتريت ( $NO_2^-$ )، ازن ( $O_3$ ) و گونه های واکنشی با عمر نسبتاً کوتاه همانند رادیکال های هیدروکسیل ( $OH^\bullet$ )، نیترو اکسید ( $NO^\bullet$ )، سوپراکسید ( $O_2^\bullet$ )، پیروکسی نترات ( $OONO_2^-$ ) و پیروکسی نیتريت ( $ONOO^-$ ) (Laroussi, 2020; Zhou et al., 2020). و ... را تولید می کند (Babajani et al., 2019; Rifna et al., 2019; Zhou et al., 2020).

## بهبود جوانه زنی بذور با پرایمینگ مبتنی بر پلاسمای

### ۱- روش مستقیم و روش غیرمستقیم

در روش پرایمینگ بذور مبتنی بر پلاسمای، معمولاً دو رویکرد عمده استفاده می شود. در حالت اول، بذور بطور مستقیم تحت تاثیر پلاسمای قرار می گیرند، درحالی که در حالت دوم (روش غیرمستقیم) از "آب فعال شده با پلاسمای (PAW)" استفاده می شود (Zhou et al., 2020). آب پلاسمایی نیز خود به دو صورت مستقیم (قرار دادن مستقیم پلاسمای در معرض آب) و غیرمستقیم (با پاشیدن قطرات کوچک آب و هوا بین دو الکترود) ایجاد می شود (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 گونه های فعال در نمونه های PAW نشان داده اند. هنگامی که PAW تولید می شود، گونه های گازی از گاز در حال کار یا گاز اتمسفر وارد فصل مشترک گاز-مایع می شوند و در نتیجه واکنش های پیچیده ی فیزیکوشیمیایی وجود دارد که منجر به عدم تعادل و افزایش چگالی بخش های یونی مثل گونه های فعال اکسیژن و نیتروژن مانند واکنش های زیر می شود (Soni et al., 2021; Wang et al., 2023; Zhou et al., 2020). البته این مواد فعال ناپایدار هستند و می توانند به سرعت تجزیه شوند. بنابراین، هیچ ترکیب خطرناکی بر روی بذور تیمار شده با PAW باقی نمی ماند (Yang et al., 2023). پلاسمای منجر به شکستگی در کلاسترهای مولکول های آب و تولید آب تک مولکولی می شود. مقدار مولکول کلاستر آب کاهش می یابد و تعداد آب تک مولکولی افزایش می یابد. بنابراین فعالیت بدست آمده توسط آب افزایش می یابد. آب فعال/تک مولکولی دارای اندازه ای بسیار کوچک است که به آن اجازه می دهد به راحتی از غشاء، منافذ گیاهان، حیوانات و غذاهای فراوری شده عبور کند.

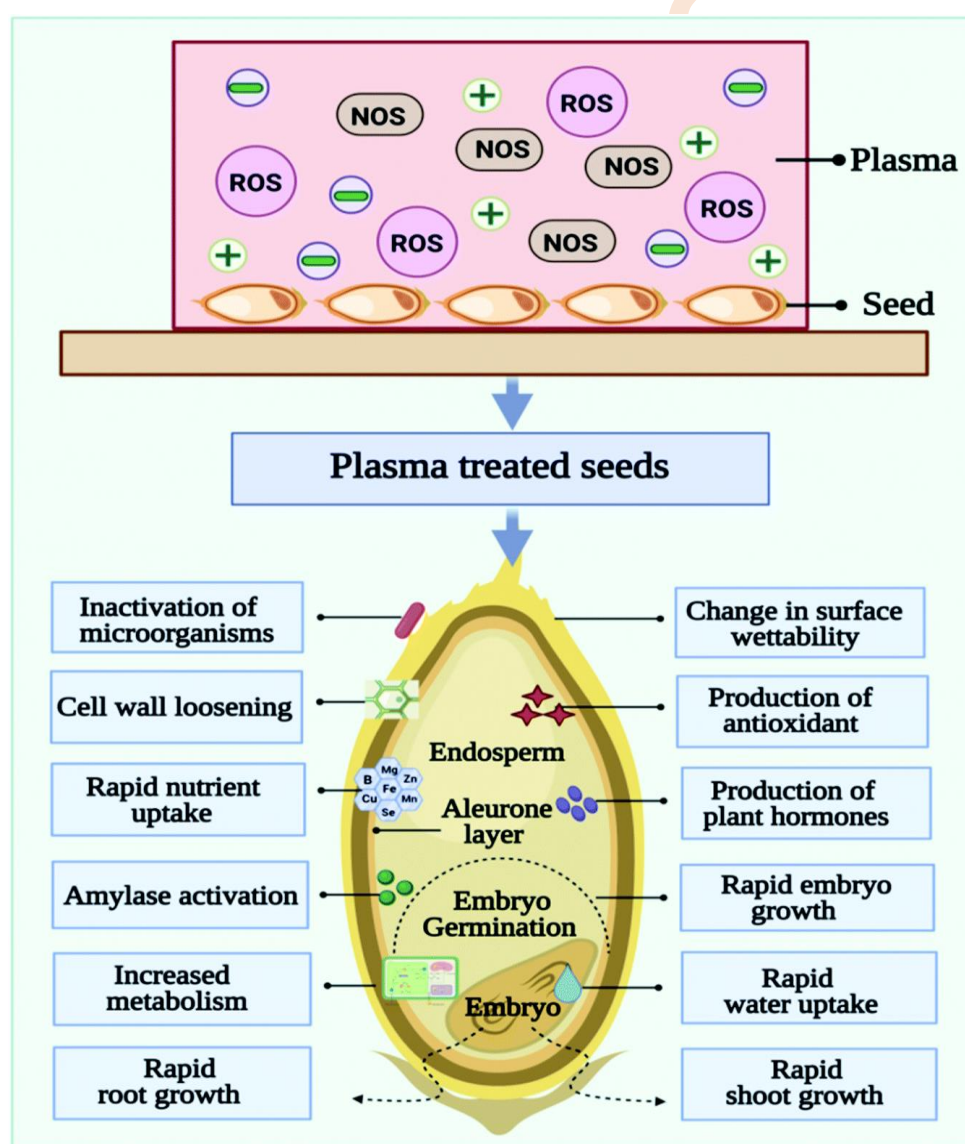
## ۲- نقش گونه های فعال اکسیژن و نیتروژن در پرایمینگ مبتنی بر پلاسمای

همانگونه که در بالا ذکر شد، طیفی از گونه های فعال نیتروژن (RNS) و اکسیژن (ROS) با عمر طولانی مدت در اثر پلاسمای ایجاد می گردد که نقش تنظیم کننده عمده ای در طول فرآیندهای رشد و نمو بذور از جمله جوانه زنی، متابولیسم، انتقال سیگنال، جذب مواد مغذی، پیری، و توانایی تحمل تنش های زیستی و غیر زنده دارا می باشند (شكل ۳) (Shelar et al., 2022). گونه های فعال اکسیژن (ROS) و گونه های نیتروژن فعال (RNS) نقشی محوری در سیستم های پیام رسانی سلولی پویا در گیاهان، حتی در شرایط تنش زیستی و غیر زنده، ایفا می کنند (Khan et al., 2023). در طول دو دهه گذشته، مطالعات مختلف این ایده را تایید کرده اند که این مولکول ها می توانند به عنوان مولکول های پیام رسان درون سلولی و بین سلولی در غلظت بسیار کم برای

<sup>1</sup> Plasma Activated Water

هیپوپراکسیدها (ROOH) و اسید هیپوکلرو (HOCl) است RNS. بطور مشابه، (Khan et al., 2023; Sarkar et al., 2022) نیز به دو دسته تقسیم می‌شود: رادیکال‌های آزاد و غیر رادیکال‌ها. RNS رادیکال‌های آزاد شامل اکسید نیتریک (NO)، دی اکسید نیتریک (NO<sub>2</sub>) و اکسید نیتریک (NO<sub>3</sub>) است. RNS غیر رادیکال شامل اسید نیتروژن (HNO<sub>2</sub>)، آنیون نیتروکسیل (NO<sup>-</sup>)، کاتیون نیتروزیوم (NO<sup>+</sup>)، پراکسی نیتريت (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، تتروکسید دی نیتروژن (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) و تری اکسید دی نیتروژن (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) می باشد (Khan et al., 2023; Kwon et al., 2021).

کنترل رشد و نمو گیاه، ارتباط همزیستی و مکانیسم‌های دفاعی در پاسخ به شرایط تنش زنده و غیرزیست عمل کنند (Khan et al., 2023). بطور کلی، ROS به دو دسته تقسیم می‌شود: رادیکال‌ها و غیر رادیکال‌ها. رادیکال ROS شامل آنیون‌های سوپراکسید (O<sub>2</sub><sup>-</sup>)، رادیکال‌های هیدروکسیل (OH<sup>-</sup>)، آلکوکسیل (RO<sup>-</sup>)، هیدروپروکسیل (HO<sub>2</sub><sup>-</sup>)، پراکسیل (ROO<sup>-</sup>)، کربنات (CO<sub>3</sub><sup>-</sup>) و semiquinone (SQ<sup>-</sup>) است. ROS غیر رادیکال شامل اسید هیپوبروم (HOBr)، اکسیژن منفرد (O<sub>2</sub><sup>-</sup>)، ازن (O<sub>3</sub>)، پراکسید هیدروژن (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)، اسید هیپویدوز (HOI)،



شکل ۳- نقش تنظیمی گونه‌های فعال نیتروژن (RNS) و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) حاصل از پلاسما در بذور تیمار شده با پلاسما 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 آنگوزه (Nasiri et al., 2025) را بررسی کرده‌اند. در کلیه بذور نام برده عملکرد مثبت معناداری از اثر پلاسما سرد در پرایمینگ مشاهده

شده است. اثرات زمان پرایمینگ، توان پلاسما، انبارمانی و نوع پلاسما در مطالعات مختلف بررسی و گزارش شده است. همچنین دستگاه‌های مختلفی از مولد پلاسما سرد تاکنون توسط نویسندگان طراحی، شبیه‌سازی 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 پلاسما 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).

بررسی قرار گرفت و نتایج مثبتی از عملکرد پلاسما گزارش شد. نمونه‌های آلوده در مدت زمان‌های ۵، ۷ و ۱۰ دقیقه تحت پلاسما 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<sup>۱</sup> و وزن خشک برای بذوری که سه دقیقه در معرض پلاسما سرد (۲ کیلوولت پلاسما) قرار گرفته بودند، بهبود یافت. همچنین، شاخص‌هایی نظیر کلروفیل کل، طول ریشه و طول گیاهچه نیز با افزایش ۱۵/۵،

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 پلاسما 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

<sup>1</sup> Vigor index

۴۱/۷۹ و ۳۴/۵ درصدی نسبت به کنترل همراه بود. همچنین، آنالیز طیف سنجی انتشار نور<sup>۱</sup> (OES) مربوط به پلاسما بدون بار، نقش مثبت ROSها را در ایجاد تغییرات فیزیولوژیک بذور زیره تایید کرد. این محققین، عنوان کردند که پلاسما 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 پلاسما 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 پلاسما سرد، بیشترین اثر تحریک کنندگی را در جوانه‌زنی و شاخص بنبه گیاهچه در بین تمام دُزهای مورد مطالعه داشت. این محققین عنوان کردند که افزایش جوانه‌زنی و شاخص بنبه 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 شاهدهانه (*Cannabis sativa* L.)، مطالعه کاملی انجام شد (Iranbakhsh et al., 2020). تیمار بذور با پلاسما سرد در سه زمان صفر، ۴۰ و ۸۰ ثانیه صورت گرفت. تیمار ۴۰ ثانیه‌ای با پلاسما باعث افزایش زیست توده در هر دو اندام هوایی<sup>۲</sup> 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 کانابینوئولیک اسید سینتاز (cannabidiolic acid synthase) تا حدود ۱۲/۴ برابر شد. پس از تیمار بذور با پلاسما، میزان بیان دلتا ۹-تتراهدرو کانابینوئولیک اسید سینتاز ( $\Delta^9$ -tetrahydrocannabinolic acid synthase) تا حدود ۲۵/۶ برابر شد. پرایمینگ بذور شاهدهانه 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 قهوه‌ای جوانه زده تایلندی (GBR) و GBRهای تیمار شده با پلاسما سرد (PGBR) مورد ارزیابی قرار گرفت (Yodpitak et al., 2019). بعد از تیمار با شرایط بهینه پلاسما، درصد جوانه‌زنی، طول ریشه و ارتفاع نهال حساس‌ترین 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  $\gamma$ -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، فیتواستروئول‌ها، 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 پلاسما 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

<sup>1</sup> Optical emission spectroscopy

<sup>2</sup> Shoot

*Astragalus adsurgens* Pall با 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 مطالعه‌ای 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 بیه بذر شد. بطور کلی، یافته‌های این تحقیق، اهمیت بهینه‌سازی شرایط تیمار NTP را برای افزایش ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر نشان داد (Guragain et al., 2024). دانه‌های جینسنگ جدا شده (*Panax ginseng*) در معرض پلاسما دی الکتریک (DBD) قرار گرفتند که در آرگون (Ar) یا مخلوط آرگون/اکسیژن (Ar/O<sub>2</sub>) 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. بذر تیمار شده با پلاسما در Ar یا Ar/O<sub>2</sub> 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*

ناشی از تیمار با خلا). گیاهان حاصل از بذر 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. در نهایت، تیمارهای بذری فوق باعث افزایش زیادی در فعالیت مهار رادیکال تا حدود ۱۱۴ درصد در عصاره‌های برگ 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). بذر گیاه پریوش (*Catharanthus roseus*) با پلاسما در محیط کشت بدون هورمون تحت شرایط استریل کشت داده شدند. در بذر 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 پلاسما ۹۰ ثانیه رشد گیاه را به تاخیر انداخت. تیمارهای پلاسما غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی و فنولهای محلول را افزایش دادند، ضمن اینکه پلاسما ۹۰ ثانیه سطح پرولین را افزایش داد. پرایمینگ پلاسما باعث فعالیت آنزیم‌های فینیل آلانین آمونیاک لیاز، کاتالاز (حدود دو برابر) و پراکسیداز (۳۱ درصد) شد. پلاسما همچنین بیان ژن *deacetylindoline O-acetyltransferase* را بطور متوسط ۷/۸ برابر افزایش داد. نهایتاً 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 بذر گیاه گون (*Astragalus adsurgens* Pall) انجام شد و سپس بیان ژن گیاهچه‌ها پس از تیمار در سطح مولکولی آنالیز شد (Li et al., 2022). پلاسما 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 بذرهای تهیه شد. در تیمار سه ساعت، میزان بقای گیاهچه‌های تیمار شده با PAW و پلاسما تنها ۹/۲ درصد از CK بود. سپس گیاهچه‌های



KEY<sup>1</sup> (plasma) AND TITLE-ABS-KEY ("seed" AND "germination") AND NOT TITLE-ABS-KEY ("plasma membrane"). با اعمال این عبارات و محدودیت‌ها ۶۷۷ سند 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 استخراج شده با استفاده از نرم افزارها و ابزارهای تحلیلی چون VOSviewer 1.6.19, Scopus Analyze Result و Biblioshiny برای تجسم و تجزیه و تحلیل روندهای تحقیق در موضوع پرایمینگ بذور با پلاسما با استفاده 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 ساختن یک شبکه بصری و تجسم آماری از وضعیت مجلات، روند انتشارات، پژوهشگران، نشریات مبتنی بر استاندارد، استاندارد 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 دست آوردن توزیع انتشار، مجلات تاثیرگذار، مقالات پر استناد، کشورهای فعال و نویسندگان برتر می باشد. مرحله دوم، تولید نقشه‌های bibliometric از طریق نرم‌افزارهای VOS viewer و R-Studio جهت یافتن روابط و شبکه‌های بصری از استناد نویسندگان، تجسم تراکم، شبکه همکاری کشورها، هم نویسندگی و شبکه کلمات کلیدی پر تکرار بود. خلاصه ای از مقالات علمی استخراج شده را می توانید در شکل ۶ مشاهده کنید. شکل ۶ نشان می دهد که حوزه پرایمینگ بذور 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، ۲۰۲۳ محقق تلاش کردند. نکته

نشان داد و شدت بیماری (درصد) پوسیدگی ریشه را در دیسک‌های ریشه جینسنگ چهار ساله کاهش داد. نتایج نشان‌دهنده اثر محرک تیمار پلاسما بر جوانه‌زنی بذور، عقیم‌سازی سطحی و سرکوب بیماری پوسیدگی ریشه در جینسینگ بود (Lee et al., 2021). در تحقیقی که اخیراً انجام شده است، مزیت بالقوه پلاسما سرد آرگون (ACP)، به عنوان یک رویکرد سازگار با محیط زیست، و قدرتمند برای فناوری پرایمینگ بذور، در فرآیند جوانه‌زنی بذور گیاه آنگوزه (*Ferula assa-foetida*) ارزیابی شد (Nasiri et al., 2025). بین بذورهای تیمار شده با ACP و تیمار نشده (شاهد) از نظر درصد جوانه‌زنی نهایی (FGP)، شاخص تیمسون (TI)، شاخص جوانه‌زنی (GI) و میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT) تفاوت معنی داری وجود داشت. در مقایسه با شاهد، مقادیر بالاتر ثبت شده برای هر یک از سه معیار جوانه‌زنی FGP، TI و GI می تواند نشان دهنده برتری ACP برای بهبود جوانه‌زنی بذور در *F. assa-foetida* باشد. در عوض، MGT محاسبه شده برای دانه‌های تیمار شده با ACP کمتر از شاهد بود. از آنجایی که هرچه MGT کمتر باشد، مجموعه ای از بذرها سریعتر به جوانه‌زنی می‌رسند، بنابراین، بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که ACP احتمالاً می‌تواند به عنوان یک روش پرایمینگ امیدوارکننده برای بهبود فرآیند جوانه‌زنی *F. assa-foetida* و احتمالاً سایر گونه‌های گیاهی دارویی در نظر گرفته شود (Nasiri et al., 2025).

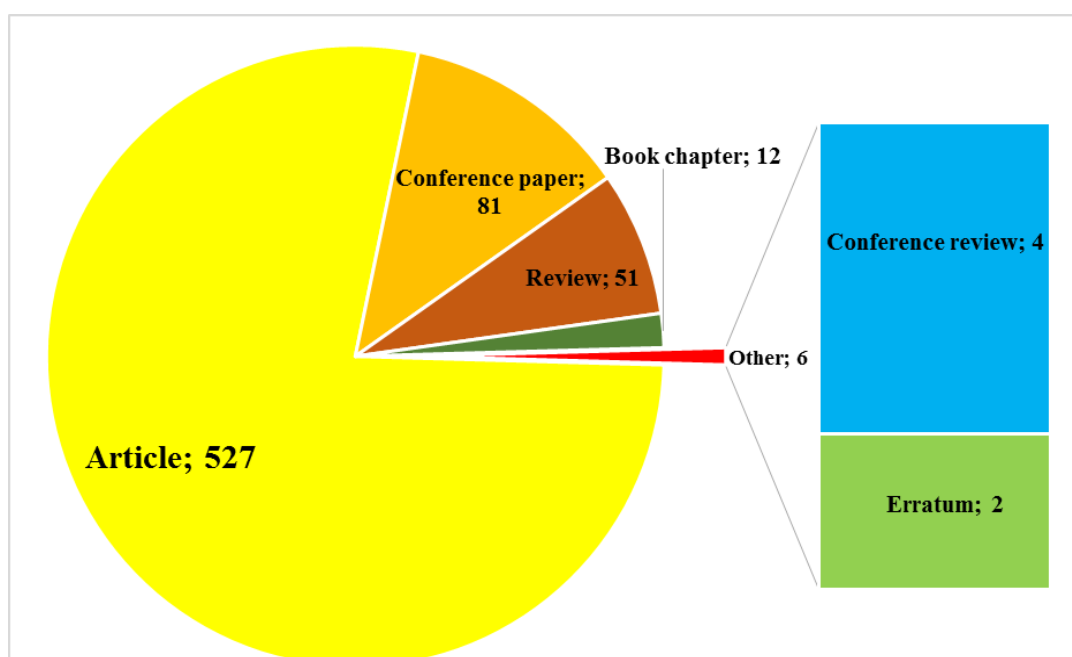
## آنالیز آماری از روند پژوهش و تحقیقات در پرایمینگ بذور با پلاسما

به منظور ارائه درک روشن و دقیق از تحقیقات پرایمینگ بذور با پلاسما ما 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 دادیم. مدت زمان انتشار بین ۲۰۰۰-۲۰۲۳ تعیین شده است. عبارات جستجوی ما برای یافتن مقالات موجود در این حوزه به شرح زیر است: کلمه "پلاسما سرد" و کلمات "بذر" و "جوانه‌زنی" و بجز کلمه "غشای پلاسمایی" در عنوان، چکیده و کلمات کلیدی مورد جستجو قرار گرفت (TITLE-ABS-)

<sup>1</sup> Article title, Abstract, Keywords

كه خود نشان دهنده بين رشته ای بودن پرايمنيگ بذر با پلاسما و مبتنی بر كار گروهی بودن اين حوزه است.

خیلی قابل تامل این است در این حوزه تحقیق تعداد مطالعات تك نویسنده بسیار كم (۳ مطالعه یا ۰.۶٪ كل مطالعات) بوده است



شكل ۵- داده‌های اولیه بدست آمده در پایگاه اسکوپوس برای موضوع پرايمنيگ بذر با پلاسماي سرد

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



شكل ۶- نمای کلی مجموعه مورد مطالعه در حوزه پرايمنيگ بذر با پلاسماي سرد

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

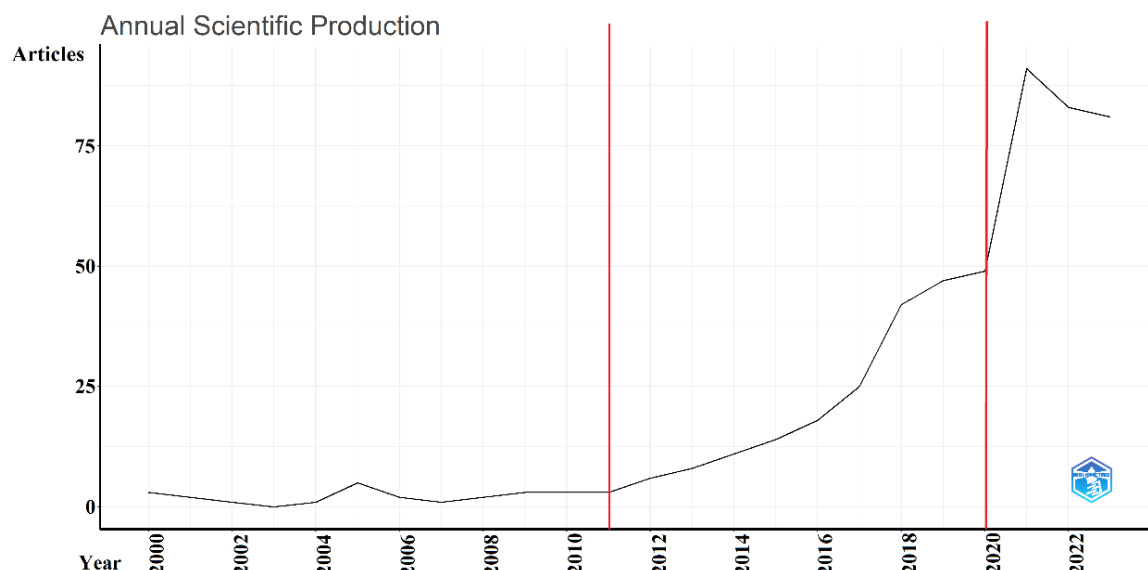
كه تعداد بسیار محدودی در این دوره مقاله منتشر شده است به طوریکه در بعضی سال‌ها انتشاری دیده نمی‌شود. ۲۶ مقاله (۵/۲ درصد از كل مقالات) در این دوره منتشر شده است. دوره دوم بین سال‌های ۲۰۱۲ الی ۲۰۲۰ در نظر گرفته شد كه يك روند افزایشی با شیب متوسط مشاهده می‌شود. این شیب نشان دهنده شروع پژوهش در این زمینه بوده و حجم مقالات منتشر شده در

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

روند انتشار مقاله در حوزه پرايمنيگ بذر با پلاسما به شرح شكل ۷ است. نتایج نشان می‌دهد كه تولیدات علمی در طول زمان ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ روند افزایشی داشته است و می‌توان این روند را به ۳ دوره تقسیم كرد. دوره اول بین سال‌های ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۱ است

منتشر شد که رشد بیش از ۳.۵ برابری نسبت به دوره قبل در میانگین تولیدات سالیانه (حدود ۱۶/۹۷ درصد) را نشان می‌دهد. روند افزایشی در این دوره نشان دهنده اهمیت موضوع و علاقمندی بیشتر محققان به این زمینه در سال‌های اخیر است.

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



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

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

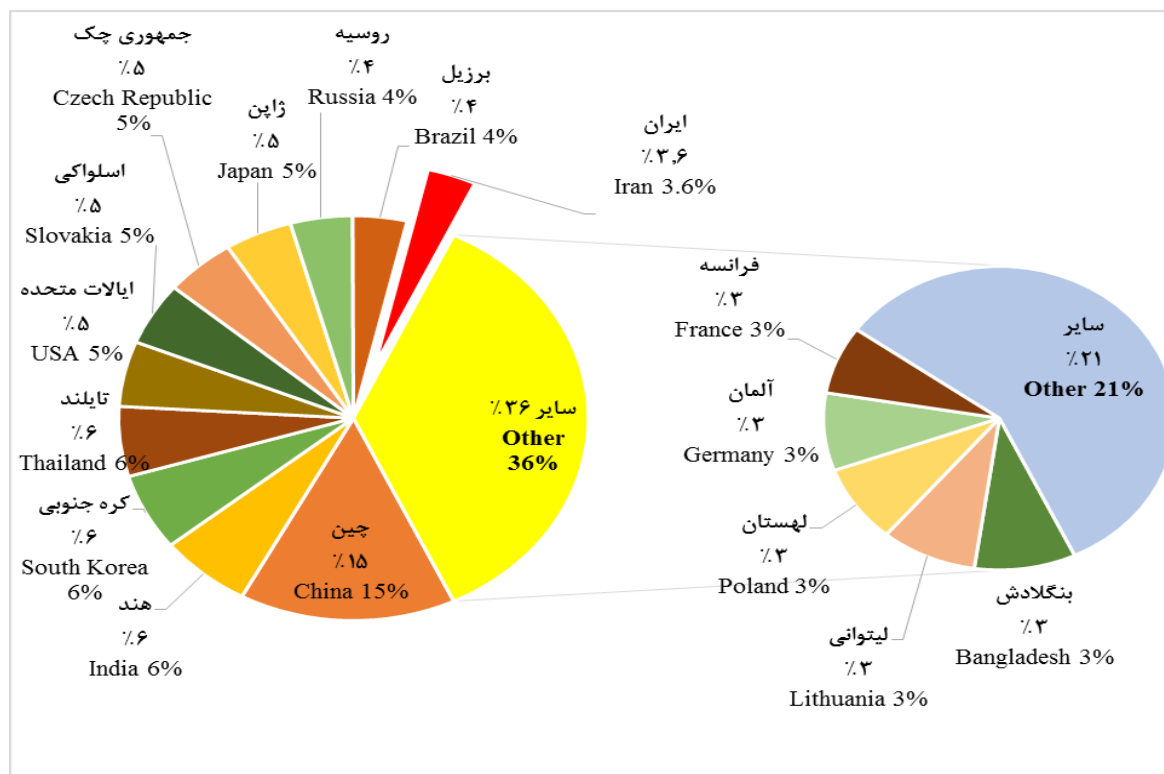
### ۳- تأثیرگذارترین انتشارات در تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما

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 می‌دهد در بین ۵۰ مقاله پر استناد در این حوزه ۷۴٪ مقالات مربوط به دوره دوم الگوی رشد (بین سال‌های

### ۲- کشورهای فعال در انتشارات پرایمینگ بذر با پلاسما

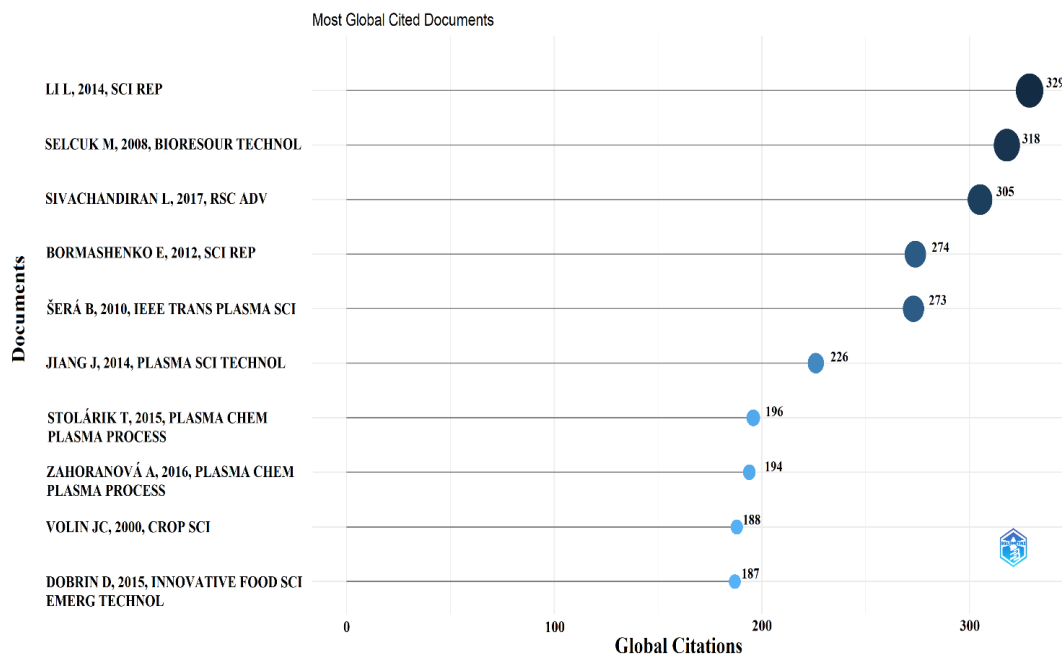
کشورهای فعال توسط نویسنده‌ها و وابستگی آنها در پایگاه داده مشخص شده است. در مطالعه حاضر، درصد مشارکت کشورها بر اساس رویکرد تعداد اسناد منتشر شده پژوهشی و به زبان انگلیسی در حوزه تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما بررسی شد. مطابق شکل ۸، بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۳، چین اکثر مطالعات را در این حوزه با ۸۰ مقاله (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. با توجه به نتایج تحلیل می‌توان 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 مخصوصاً تنوع بذور گیاهان دارویی نیاز به توسعه بیشتری در کشور دارد.

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



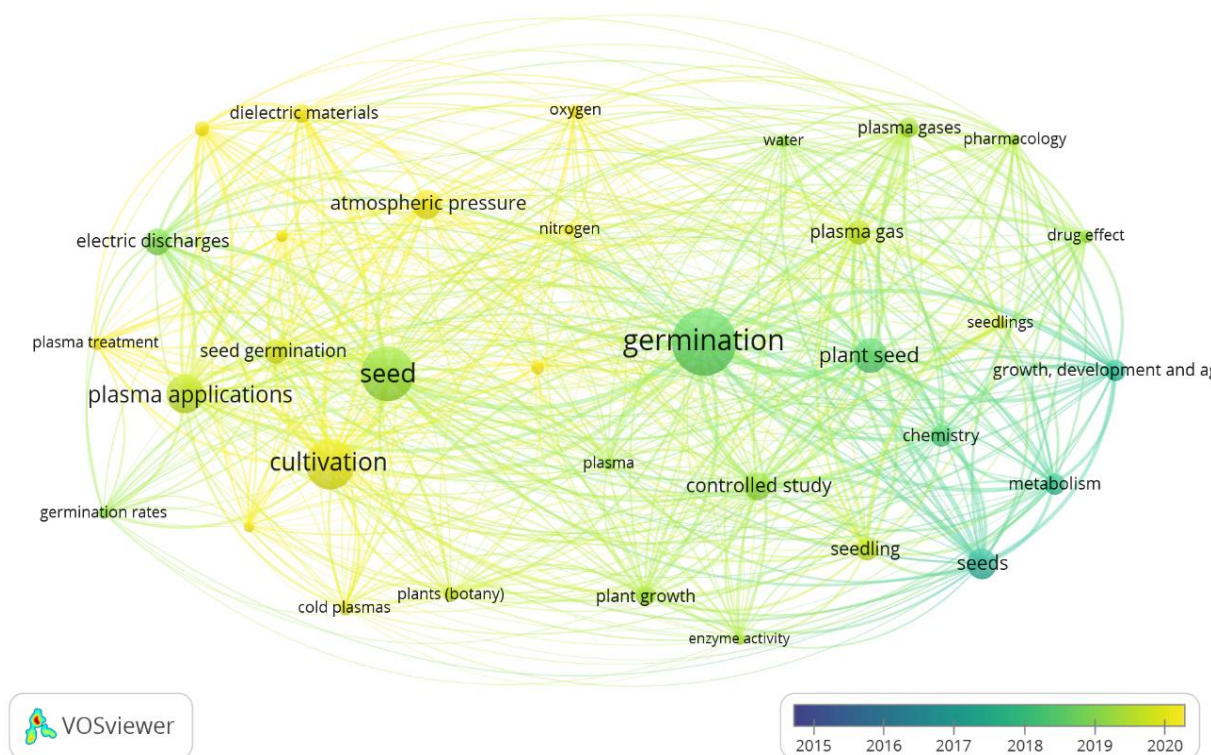
شکل ۹- مقالات پر استناد در حوزه تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسمای سرد در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

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 می‌توان 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 می‌کند 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



شکل ۱۰- کلمات کلیدی شاخص و پرتکرار در تحقیقات پرایمینگ بذر با پلاسما 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، معمولاً محصولات کشاورزی و صنایع مرتبط با آن در

درجه اول اهمیت قرار دارند که مستقیم یا غیرمستقیم با کشت و کار گیاهان مرتبط می‌باشد. با توجه به اینکه کشت و کار طیف عمده‌ای از گیاهان در سرتاسر جهان، اعم از زراعی و یا دارویی، با بذر همراه می‌باشد، بنابراین، یک نقطه عطف در امنیت غذایی محسوب می‌شود. در این راستا، پرایمینگ بذور، بویژه برای



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 می‌دهد چین پیشروترین کشور در انتشار تحقیقات این حوزه به شمار می‌آید. 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، می‌توان 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 مخصوصاً 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 می‌کند تا جهت‌های تحقیقاتی آینده در این حوزه را شناسایی و استفاده کنند.

### قردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۰۰۷۵ انجام شده است.

### تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تعارض منافی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

### References

- 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>

گیاهان دارویی از درجه اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند، 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، با توجه به موارد ذکر شده در بالا، می‌توان از این فناوریِ دوستدار محیط زیست در کشت و کار گیاهان دارویی در سطح وسیع استفاده نمود و نهایتاً بهره‌وری 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 وسیع‌ترین پایگاه مقالات علمی در این زمینه بر اساس عنوان مقاله، کلمات کلیدی و چکیده برای به دست آوردن داده‌ها انجام شد. عبارات جستجویی 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 شده‌اند 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 رشته‌ای و مبتنی بر کار گروهی بودن این حوزه است. در این مطالعه ۱۰ مقاله برتر و پر استناد معرفی شدند. همچنین کلمات کلیدی پرتکرار 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

- 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 *Ephesia 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), 501-523. <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 deacetylvinoline O-acetyltransferase gene in *Catharanthus roseus*. *Contributions to Plasma Physics*, 60 (4)e201900159. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201900159>
- 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>
- Bazaka, 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>

- 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., & Kassaei, 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>
- 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>



- 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.
- 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>
- Namdarani 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>

- 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>
- 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 *Penicillium* 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>