

Effects of seed priming and foliar application with smoke-water on gas exchange and yield of chili pepper (*Capsicum annuum* L.)

Faride Noroozi Shahri¹, Saeid Jalali Honarmand^{*2,3}

1- Postdoctoral Researcher, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran.

2- Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran.

3- Member of Zagros Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Razi University, Kermanshah, Iran.

*Corresponding author: sjhonarmand@razi.ac.ir

(Received: 10 September 2025

Revised: 03 November 2025

Accepted: 10 November 2025)

Extended Abstract

- 1. Introduction:** Today, agriculture faces challenges such as an increasing global population, climate change, and heavy dependence on synthetic inputs that threaten sustainability. Eco-friendly biostimulants are gaining attention as alternative strategies to enhance crop productivity and resilience. Smoke-water (SW), derived from burning plant residues, is rich in bioactive compounds such as karrikins, which stimulate seed germination and influence physiological and biochemical processes. Previous studies have reported improvements in photosynthesis and yield traits in several species. Seed priming is also an efficient and low-cost technique to increase germination, seedlings' vigor, and establishment, as well as the productive capability of crops. Although various studies have evaluated the effect of SW on plant developmental characteristics over the last two decades, the physiological mechanisms and their relationship with increased crop yield, especially under different SW application methods, have not yet been investigated simultaneously. Therefore, the present study is a comparative study between two SW application methods, seed priming and foliar spraying, on some morphological, physiological, and yield traits of pepper (*Capsicum annuum* L.), a crop valued both as a spice and medicinal plant under field conditions.
- 2. Materials and Methods:** The study was conducted in 2024 at the Research Farm of the Faculty of Agriculture, Razi University, using a two-factor factorial design within a randomized complete block design with three replications. The factors included five levels of seed priming (control, hydropriming, and priming with SW at 0.01%, 0.1%, and 1% concentrations) and four levels of foliar application (control and SW sprays at 0.01%, 0.1%, and 1% concentrations). SW was prepared by transferring smoke from burning wheat straw through distilled water, filtering, and diluting to the desired concentrations. For seed priming, chili pepper seeds were soaked in distilled water (for hydropriming) and different concentrations of SW (for SW-priming) for 18 hours at 20°C in a germinator. Before radicle emergence, priming was stopped, and the seeds were rapidly dried using a blower. Untreated dry seeds were used as a control. Foliar applications with different concentrations of SW were applied three times during the growth period. Gas exchange parameters, including photosynthetic and transpiration rate, stomatal and mesophyll conductance, intercellular CO₂ concentration, and photosynthetic WUE, were measured using a portable photosynthesis system (LCi, BioScientific Ltd., UK). Measurements were performed three days after the second foliar application, under a photosynthetically active radiation (PAR) intensity of 1200–1400 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Fruits were harvested from each experimental unit throughout the growth period. After the final harvest, the total number of fruits and their fresh and dry weights per m⁻² were recorded and used to calculate the final fruit number and yield. At the end of the experiment, plant height, the number of primary and secondary branches, and total biomass yield were recorded from ten representative plants, and their mean values were included in the statistical analyses. Data analysis was conducted using SAS (ver. 9.1) software, and mean comparisons were performed using the LSD method.
- 3. Results and Discussion:** Both seed priming and foliar application with SW significantly enhanced physiological and yield traits compared with the control. Seed priming with SW at a concentration of 1% increased photosynthetic rate (15.82%), transpiration (13.69%), stomatal conductance (51.54%), mesophyll conductance (15.62%), plant height (19.73%), and fresh and dry fruit yield (32.90% and 30.58%, respectively). Foliar application with SW at a concentration of 1% led to improvement photosynthesis rate (19.62%), transpiration rate (20%), stomatal conductance (48.97%), plant height (16.07%), number of branches (34.24% primary, 46.12% secondary), number of fruits (39.31%), fresh and dry fruit yield (28.47% and 33.76%) and dry/fresh weight ratio (4%). The treatment of SW at 1% priming + foliar spray resulted in an increase of 164% in biomass yield over the control. Harvest index was reduced by 7-10% under 1% SW treatments. The overall increase in the gas exchange parameters,

photosynthesis efficiency, and accumulation of biomass validates the great potential of SW as a biostimulant. These results confirm earlier reports of karrikin-mediated improvements in photosynthetic activity and growth, while providing new evidence that foliar application may be more effective than seed priming in directing assimilate partitioning toward fruit dry matter.

4. **Conclusion:** Utilization of SW, particularly at 1% concentration, significantly improved gas exchange traits, morphological attributes, and yield of chili pepper. Foliar spraying was more effective than seed priming in increasing fruit biomass accumulation, reflecting greater assimilate allocation to fruits. Although a decrease in harvest index was observed, the overall improvement in yield quantity and quality suggests SW as a promising, eco-friendly, and cost-effective biostimulant for the sustainable growth of chili pepper.

Keywords: Biomass, Capsaicin, Karrikin, Photosynthesis, Transpiration.

Citation: Noroozi Shahri F. & Jalali Honarmand S. (2026). Effects of seed priming and foliar application with smoke-water on gas exchange and yield of chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Vegetables Sciences*, 19(1), 171-188. doi:10.22034/iuvs.2025.2071367.1423

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Vegetables Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





اثر پیش تیمار بذر و محلول پاشی برگ‌ی با دودآب بر تبادلات گازی و عملکرد فلفل چیلی (*Capsicum annuum* L.)

فریده نوروزی شهری^۱، سعید جلالی هنرمند^{۲*}

۱- پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۳- عضو پژوهشکده تحقیقاتی گیاهان دارویی و معطر زاگرس، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

*نویسنده مسئول: sjhonarmand@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹

چکیده

جهت ارزیابی اثرات پیش تیمار بذر و محلول پاشی برگ‌ی با دودآب روی سرعت تبادلات گازی و عملکرد فلفل چیلی (*Capsicum annuum* L.)، یک آزمایش فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۳ در دانشگاه رازی انجام شد. عامل‌های مورد بررسی شامل پیش تیمار بذر در پنج سطح (شاهد (بدون پیش تیمار کردن بذر)، پیش تیمار آبی و پیش تیمار بذر با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۱ و ۱ درصد دودآب) و محلول پاشی با دودآب در چهار سطح (شاهد و محلول پاشی با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۱ و ۱ درصد دودآب) بود. نتایج نشان داد که پیش تیمار بذر با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش معنی‌دار سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای، هدایت مزوفیلی، ارتفاع بوته و وزن تازه و خشک میوه شد. همچنین، محلول پاشی برگ‌ی با همان غلظت نیز باعث ارتقای فتوسنتز، تعرق، غلظت CO₂ بین سلولی، هدایت مزوفیلی، ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی، تعداد میوه و افزایش وزن تازه و خشک میوه نسبت به شاهد شد. پیش تیمار بذر همراه با محلول پاشی برگ‌ی با غلظت ۱ درصد موجب افزایش ۱۶۴ درصدی زیست توده کل نسبت به شاهد گردید. هرچند شاخص برداشت در این تیمارها به ترتیب ۱۰/۶۲ و ۷/۹۷ درصد کاهش یافت، اما افزایش ۳۰ درصدی عملکرد میوه و بهبود صفات مورفوفیزیولوژیک نشان دهنده نقش کلیدی دودآب در بهبود کارایی فتوسنتزی و عملکرد میوه بود. کاربرد دودآب به شکل محلول پاشی برگ‌ی نسبت به پیش تیمار بذر باعث تجمع ماده خشک بیشتری در میوه‌ها شد که نشان دهنده بهبود تخصیص مواد فتوسنتزی به سمت زیست توده خشک میوه و افزایش کیفیت محصول می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تعرق، زیست توده، فتوسنتز، کاریکین، کپسایسین.

استناد: نوروزی شهری، ف. و جلالی هنرمند، س. (۱۴۰۵). اثر پیش تیمار بذر و محلول پاشی برگ‌ی با دودآب بر تبادلات گازی و عملکرد فلفل چیلی (*Capsicum annuum* L.). علوم سبزی‌ها، ۱۹(۱)، ۱۷۱-۱۸۸.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این مجله به صورت آزاد در وب سایت مجله برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

امروزه سیستم‌های کشاورزی با چالش‌های متعددی از جمله افزایش جمعیت جهانی، تغییرات اقلیمی، محدودیت منابع آبی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از بیش‌مصرف نهاده‌های شیمیایی مواجه هستند (Robinson, 2024). در این شرایط، ارتقای رشد و عملکرد گیاهان بدون اتکا به مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی و نهاده‌های پرهزینه، یکی از راهبردهای کلیدی جهت دستیابی به امنیت غذایی پایدار می‌باشد. بنابراین استفاده از محرک‌های زیستی به عنوان جایگزین یا مکمل نهاده‌های شیمیایی، مورد توجه پژوهشگران و کشاورزان قرار گرفته است.

آتش‌سوزی‌ها اثرات شدیدی بر اکوسیستم داشته و باعث تغییرات طولانی‌مدت در ترکیب جوامع گیاهی می‌شوند. یکی از مکانیسم‌های باززایی گیاهان پس از آتش، شکستن خواب بذرهای مدفون در خاک است. تحقیقات نشان داده‌اند که سیگنال‌های شیمیایی موجود در دود حاصل از سوختن گیاهان، عامل اصلی تحریک جوانه‌زنی بسیاری از گونه‌های وابسته به آتش هستند. کاربرد دود به شکل آئروسل یا محلول دود آب می‌تواند جوانه‌زنی و رشد این گونه‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. نکته قابل توجه این است که این واکنش‌ها تنها به فرآیند جوانه‌زنی و به گونه‌هایی که بومی اکوسیستم‌های مستعد آتش‌سوزی هستند، محدود نمی‌شوند. بیان می‌شود که حداقل ۱۲۰۰ گونه به دود حاصل از سوختن گیاهان، پاسخ مثبت جوانه‌زنی و رشد نشان می‌دهند (Waters & Nelson, 2023). از جمله این گونه‌ها می‌توان به خیار (*Cucumis sativus* cv. Ishrak)، گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* cv. V.385 F1)، گلایول (*Gladiolus hybrid*)، همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) (Elsadek & Yousef, 2019)، کرفس (*Apium graveolens* L.) (Gupta et al., 2024)، سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) (Khan et al., 2024) و فلفل چیلی (*Noroozi Shahri & Jalali Honarmand, 2025*) اشاره نمود.

در سال‌های اخیر دود حاصل از سوختن گیاهان در میان محرک‌های زیستی مختلف، به دلیل غنای بالا از ترکیبات فعال زیستی نظیر کاربکین‌ها (به‌طور عمده کاربکینولید یا 3-methyl-2H-furo[2,3-c]pyran-2-one)، سیانوهیدرین‌ها و اکسیدهای نیتروژن (Flematti et al., 2013) به گزینه‌ای قابل توجه تبدیل شده است که نه تنها موجب بهبود جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه، بلکه موجب بهبود فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیک پسا جوانه‌زنی گیاهان زراعی و باغی مختلف و افزایش مقاومت آن‌ها به شرایط تنش‌های غیرزیستی نیز می‌شود (Antala et al., 2020; Meng et al., 2022). علی‌رغم نتایج مثبت آگرو فیزیولوژیک گیاهان تحت کاربرد غلظت‌های بسیار کم دود آب، مشاهده شده است که در غلظت‌های بالاتر ترکیبات بازدارنده‌ای مانند 3,4,5-trimethyl furan-2(5H)-one، دی‌هیدروکسی تولوئن (کرزول‌ها)، دی‌هیدروکسی بنزن‌ها، ۲-فروئیک اسید و نفتالن از جوانه‌زنی و رشد گیاهان جلوگیری می‌کنند (Light et al., 2010). روش معمول برای به‌دست‌آوردن محرک‌های رشد از دود حاصل از سوختن گیاهان، استفاده از دود آب و رقیق کردن آن به مقدار ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر است (Nelson et al., 2012).

مطالعات متعددی گزارش کرده‌اند که دود آب و ترکیبات زیست‌فعال آن مانند کاربکین‌ها در غلظت‌های کم نانومولار می‌توانند موجب بهبود تبادلات گازی و کارایی فتوسنتزی، بهبود وضعیت بیوشیمیایی و افزایش عملکرد کیفی و کمی گیاهان شوند (Uddin et al., 2023; Liu et al., 2023). Liu و همکاران (۲۰۲۳) مشاهده کردند که کاربرد دود آب روی گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) موجب بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیک مانند سرعت فتوسنتز خالص، کارایی مصرف آب فتوسنتزی و هدایت روزنه‌ای شد. Uddin و همکاران (۲۰۲۳) مشاهده کردند که خیساندن ریزوم‌های نعناع وحشی (*Mentha arvensis* L.) با غلظت ۱:۵۰۰ (v/v) دود آب ویژگی‌های رشدی و برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیک

خانواده α/β -هیدرولازها است. سپس این مسیر از طریق برهم‌کنش KAI2 با پروتئینی به نام MAX2 (MORE AXILLARY GROWTH 2)، که یک پروتئین F-box در کمپلکس E3 ubiquitin ligase است، ادامه می‌یابد. این کمپلکس موجب یوبی‌کوئیتینه‌شدن و در پی آن، تخریب پروتئازومی پروتئین‌های مهارکننده SMAX1 و SMXLs می‌شود. با تخریب این پروتئین‌های مهارکننده، پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه به سیگنال کاریکین‌ها، از جمله رفع خواب بذر و جوانه‌زنی، تغییر در معماری ریشه، بهبود فرآیندهای فتومورفوننتیک، تنظیم متابولیسم آنتی‌اکسیدانی، افزایش بیان ژن‌های مرتبط با استرس و حفظ تعادل ردوکس، تنظیم می‌شوند که در مجموع موجب افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی و بهبود نمو آن می‌شوند (Guercio et al., 2024; Deng et al., 2025).

تکنولوژی پیش‌تیمار بذر یک راهبرد کلیدی موفق و قابل اجرا برای افزایش تولید محصولات زراعی و باغی در شرایط محیطی مختلف است. پیش‌تیمار بذر شامل هیدراتاسیون بذر است که به آن اجازه شروع فرآیندهای متابولیسمی می‌دهد، اما از خروج ریشه‌چه جلوگیری می‌کند. تاکنون، روش‌های مختلف پیش‌تیمار، مانند پیش‌تیمار هورمونی، پیش‌تیمار زیستی، پیش‌تیمار اسمزی و ...، که مسئول القای صفات مختلف فیزیولوژیک و بیوشیمیایی و بهبود قدرت بذر هستند، توسعه یافته‌اند (Esmailpour et al., 2020; Mahmoudi & Sheikhzadehmasadegh, 2025). پیش‌تیمار بذرها با دودآب تکنیکی مقرون‌به‌صرفه است که به‌سادگی می‌تواند در مقیاس گسترده مورد استفاده قرار گیرد (Kępczyński & Kępczyńska, 2023). در یک مطالعه، خیساندن بذرهاى علف باغ (*Dactylis glomerata* L. در دودآب و خشک کردن آن‌ها قبل از کاشت در مزرعه، جوانه‌زنی، ظهور گیاهچه و زیست‌توده را پس از ۱۰ هفته کشت محصول افزایش داد (Abu et al., 2016). در آزمایش دیگری،

شامل ارتفاع گیاه (۲۳/۰۳ درصد)، وزن تازه (۲۳/۳۰ درصد)، وزن خشک (۴۴/۴۰ درصد)، سطح برگ (۲۶/۷۲ درصد)، عملکرد برگ در هر بوته (۲۸/۳۷ درصد)، فلورسانس کلروفیل (۱۰ درصد)، فعالیت فتوسیستم دو (PSII) (۲۳ درصد) و محتوای کل کلروفیل (۳۰ درصد) و کاروتنوئیدها (۲۲ درصد) را در مقایسه با شاهد افزایش داد.

کاربرد دود حاصل از سوختن گیاهان به‌صورت دود آئروسول روی گیاه *Chrysanthemoides monilifera* Norl. (L.) موجب کاهش معنی‌دار هدایت روزنه‌ای، سرعت جذب CO_2 و سطح CO_2 بین سلولی شد و این کاهش‌ها به مدت پنج ساعت ادامه داشتند. پس از آن هر سه صفت طی ۲۴ ساعت بعدی به سطوح شاهد رسیدند. کاهش این صفات در نتیجه اثرات روزنه‌ای و مزوفیلی، کاهش در راندمان کربوکسیلاسیون و ظرفیت بازسازی روبیسکو بود (Gilbert & Ripley, 2002). این در حالی بود که مطالعه‌ای دیگر نشان داد دود آئروسول بعد از آتش‌سوزی موجب افزایش سرعت فتوسنتز و تعرق در کنوپی یک جنگل سوزنی‌برگ معتدله در غرب ایالات متحده شد (Rastogi et al., 2022). Zhou و همکاران (۲۰۱۳) نیز در مطالعه خود روی گیاه *Isatis tinctoria* L. مشاهده کردند که دودآب در غلظت‌های ۱:۵۰۰، ۱:۱۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰ (v/v) با روندی وابسته به غلظت موجب افزایش سرعت فتوسنتز خالص، سرعت تعرق و هدایت روزنه‌ای و کاهش غلظت CO_2 بین سلولی شد. Kulkarni و همکاران (۲۰۰۸) بیان کردند که دودآب به شکل خاک‌کاربرد و در غلظت ۱:۵۰۰ (v/v) موجب افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه، تعداد برگ، قطر ساقه، تعداد میوه، وزن میوه، قطر میوه، تجمع زیست‌توده و شاخص برداشت گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای شد.

پس از جذب کاریکین‌های موجود در دود حاصل از سوختن گیاهان، انتقال سیگنال آن‌ها در گیاه ابتدا از طریق گیرنده‌ای به نام KAI2 (*KARRIKIN INSENSITIVE 2*) انجام می‌شود. KAI2 آنزیمی از

خیساندن بذرهای ذرت (*Zea mays* L.) در دودآب موجب افزایش سرعت جوانه زنی بذر، وزن تازه ساقه و ریشه و محتوای کلروفیل ها و کاروتنوئیدها در گیاهچه های هشت روزه شد (Aslam et al., 2017). Lohitha و همکاران (۲۰۲۳) مشاهده کردند که پیش تیمار بذرهای کتان (*Linum usitatissimum* L.) با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش گلدهی، شاخه دهی، محتوای کلروفیل، عملکرد دانه و محتوای روغن شد. آن ها دودآب را به عنوان یک مداخله کشاورزی پایدار و مؤثر از نظر زیست محیطی برای افزایش بهره وری و کیفیت محصول در کشت کتان معرفی نمودند.

فلفل چیلی یکی از قدیمی ترین محصولات اهلی شده کشاورزی است که میوه های آن از دیرباز مصرف ادویه ای و دارویی گسترده ای داشته اند (Duranova et al., 2022). فلفل چیلی به واسطه دارا بودن سطح بالایی از ترکیبات مؤثر بر سلامتی، یکی از مهم ترین گیاهان دارویی و ادویه ای جهت مطالعه و ارتقای عملکرد از طریق روش های به زراعی است. این گیاه حاوی کپسایسینوئیدها^۱، کپسایسین^۲، دی هیدروکپسایسین^۳، کاروتنوئیدها (لوتئین^۴، زآگزانتین^۵، کپسوروبین^۶، بتاکاروتن)، فلاونوئیدها (کوئرستین^۷، کامپفرول^۸، کاتچین^۹، اپیکاتچین^{۱۰}، روتین^{۱۱}، لوتئولین^{۱۲}) و ساپونین های استروئیدی (کپسیدین^{۱۳}، کپسیکوزید E، F و G^{۱۴}) است. کپسایمید^{۱۵} و اسید استیک اصلی ترین ترکیبات موجود در اسانس این گیاه هستند. ترکیبات مذکور مسئول فعالیت های متنوع آنتی اکسیدانی، ضدباکتریایی، ضدویروسی و ... در این گیاه می باشند (Yuca, 2022). با وجود انجام مطالعات متعدد در دو دهه اخیر درباره تأثیر دودآب بر ویژگی های رشدی گیاهان، هنوز

مکانیسم های فیزیولوژیک مرتبط با افزایش عملکرد محصولات، به ویژه در شرایط کاربرد همزمان آن به صورت پیش تیمار بذر و محلول پاشی برگ، بررسی نشده اند. بنابراین پژوهش حاضر یک مطالعه مقایسه ای بین دو روش کاربرد دودآب به صورت پیش تیمار بذر و محلول پاشی برگ روی برخی صفات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و عملکردی فلفل چیلی در شرایط مزرعه می باشد.

مواد و روش ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۳ در مزرعه تحقیقاتی و آموزشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی انجام شد. این مزرعه در مختصات ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی در ارتفاع ۱۳۱۹ متری از سطح دریا واقع شده است. میانگین دمای سالانه ۱۳/۳ درجه سانتی گراد و میانگین بارندگی سالانه بین ۴۵۰ تا ۴۸۰ میلی متر است. خصوصیات هواشناسی منطقه در طول دوره رشد و ویژگی های فیزیکی شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

عامل های مورد بررسی شامل پیش تیمار بذر فلفل چیلی در پنج سطح (شاهد (بدون پیش تیمار کردن بذر)، پیش تیمار آبی و پیش تیمار با غلظت های ۰/۱، ۰/۱ و ۱ درصد دودآب) و محلول پاشی با دودآب در چهار سطح (شاهد و محلول پاشی با غلظت های ۰/۱، ۰/۱ و ۱ درصد دودآب) بود. جهت تهیه محلول پایه دودآب، دود ناشی از سوختن کاه گندم با کمک یک ژنراتور، مبرد و پمپ مکنده از یک مخزن حاوی آب مقطر تا زمان سوختن کامل و اشباع آب مقطر عبور داده شد. محلول حاصل پس از عبور از کاغذ صافی نمره یک واتمن به عنوان محلول پایه در نظر گرفته شد و سپس در

⁹ Catechin

¹⁰ Epicatechin

¹¹ Rutin

¹² Luteolin

¹³ Capsicidine

¹⁴ Capsicoside E, F and G

¹⁵ Capsiamide

¹ Capsaicinoids

² Capsaicin

³ Dihydrocapsaicin

⁴ Lutein

⁵ Zeaxanthin

⁶ Capsorubin

⁷ Quercetin

⁸ Kaempferol

گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی در بستری از خاک مزرعه، ماسه بادی و کود دامی پوسیده (به نسبت ۱:۱:۱) کشت شدند. در اردیبهشت و پیش از انتقال نشاها، آماده‌سازی زمین اصلی کاشت گیاهان در مزرعه به وسیله عملیات شخم و تسطیح انجام شد. فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و تراکم کاشت ۱۰ بوته در متر مربع بود. در تاریخ ۲۰ اردیبهشت و هنگامی که نشاها دارای چهار تا شش برگ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر بودند، به زمین اصلی منتقل شدند. در طول فصل کشت آبیاری به‌صورت هفتگی، وجین علف‌های هرز و خاک‌دهی پای بوته‌ها انجام شد.

غلظت‌های ۰/۱، ۰/۱ و ۱ درصد با آب مقطر رقیق و جهت اعمال تیمارها به کار برده شد (Noroozi Shahri *et al.*, 2018). بذرها جهت پیش‌تیمار تا قبل از مرحله خروج ریشه‌چه به مدت ۱۸ ساعت در ژرمیناتور با دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد در آب مقطر و غلظت‌های مختلف دودآب قرار گرفتند. سپس به سرعت در محیط آزمایشگاه و با کمک جریان هوا (دمنده) خشک شدند. تیمارهای محلول‌پاشی یک بار در زمان شروع گلدهی و دو بار در فواصل زمانی مساوی یک ماه در طی دوره رشد (مجموعاً سه بار) با استفاده از سمپاش دستی اعمال شدند. به‌منظور تهیه نشا، بذرها شاهد و پیش‌تیمار شده به‌صورت مجزا از یکدیگر در

جدول ۱- ویژگی‌های هواشناسی منطقه در طول دوره رشد گیاه (۱۴۰۳)

Table 1- Monthly meteorological parameters of the study area during the plant growth period (2024)

ویژگی‌های هواشناسی Meteorological parameters	اردیبهشت April 21 – May 21	خرداد May 22 – June 21	تیر June 22 – July 22	مرداد July 23 – August 22	شهریور August 23 – September 22
میانگین دمای بیشینه Mean maximum temperature (°C)	23.78	34.25	38.68	39.98	36.89
میانگین دمای کمینه Mean minimum temperature (°C)	8.81	13.43	18.30	18.82	15.74
بارش Precipitation (mm)	113.9	7	0	0	2.3

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2- Physicochemical parameters of the soil of the study area

بافت Texture	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	کربن آلی OC	نیترژن N	فسفر P	پتاسیم K ⁺	مس Cu ²⁺	آهن Fe ²⁺	روی Zn ²⁺	منگنز Mn ²⁺	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (ds m ⁻¹)
رس سیلتی Silty clay	10.7	43.9	45.4	1.35	0.135	5.80	520	1.34	3.90	0.48	4.60	7.9	0.62

در ثانیه اندازه‌گیری شدند و قسمت میانی جوان‌ترین برگ کاملاً توسعه یافته گیاه درون محفظه شیشه‌ای دستگاه قرار گرفت. هدایت مزوفیلی از تقسیم سرعت فتوسنتز به غلظت دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ها به‌دست آمد (Fischer *et al.*, 1998). همچنین به‌منظور تعیین کارایی مصرف آب فتوسنتزی، سرعت فتوسنتز به سرعت تعرق تقسیم شد (Ratnayaka & Kincaid, 2005).

جهت اندازه‌گیری متغیرهای مربوط به تبادلات گازی شامل سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای، دمای برگ و ... از دستگاه فتوسنتز متر (Bio scientific Ltd ساخت شرکت Portable Lci) استفاده شد. متغیرهای مربوط به تبادلات گازی سه روز بعد از محلول‌پاشی دوم در ساعت ۱۲-۱۰ صبح و در شدت نور ۱۴۰۰-۱۲۰۰ میکرومول فوتون در متر مربع

میوه‌های فلفل از اواخر تیر تا اواخر شهریور از هر واحد آزمایشی در طول دوره رشد و با در نظر گرفتن حاشیه برداشت شد. پس از برداشت نهایی مجموع تعداد و وزن تازه و خشک میوه در هر متر مربع به عنوان تعداد میوه و عملکرد نهایی ثبت شد. در انتهای آزمایش، ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی اولیه و ثانویه و عملکرد زیست‌توده در ۱۰ بوته اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها در محاسبات لحاظ شد.

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (ver. 9.1) انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD انجام شد و جهت رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

نتایج و بحث

صفات فیزیولوژیک

مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیک مورد مطالعه نشان داد بین سطوح پیش تیمار بذر، بیشترین سرعت فتوسنتز مربوط به غلظت ۱ درصد دودآب (۱۱/۰۵ میکرومول CO₂ در متر مربع در ثانیه) و کمترین مقدار این صفت مربوط به تیمار شاهد (۹/۵۴ میکرومول CO₂ در متر مربع در ثانیه) بود. بین سطوح محلول پاشی برگ، بیشترین سرعت فتوسنتز مربوط به غلظت ۱ درصد دودآب (۱۱/۴۶ میکرومول CO₂ در متر مربع در ثانیه) و کمترین سرعت فتوسنتز مربوط به تیمار شاهد (۹/۵۸ میکرومول CO₂ در متر مربع در ثانیه) بود. بیشترین سرعت تعرق در سطوح مختلف هر دو عامل در گیاهانی مشاهده شد که بذر آن‌ها با غلظت ۱ درصد دودآب پیش تیمار یا بوته آن‌ها با این غلظت از دودآب محلول پاشی (به ترتیب ۶/۵۶ و ۶/۹۰ میلی مول H₂O در متر مربع در ثانیه) شده بود. در حالی که کمترین سرعت تعرق در تیمارهای شاهد (به ترتیب ۵/۷۷ و ۵/۷۵ میلی مول H₂O در متر مربع در ثانیه) مشاهده شد.

گیاهانی که با غلظت ۱ درصد دودآب محلول پاشی شده بودند، دارای بیشترین غلظت CO₂ بین سلولی (۲۹۶/۶۶ میکرومول CO₂ در هر مول هوا) و گیاهان تیمار شاهد دارای کمترین غلظت CO₂ بین سلولی

(۲۸۹/۸۶ میکرومول CO₂ در هر مول هوا) بودند. بیشترین مقدار هدایت روزنه‌ای مربوط به گیاهانی بود که بذر آن‌ها با غلظت ۱ درصد دودآب پیش تیمار یا بوته آن‌ها با این غلظت از دودآب محلول پاشی (به ترتیب ۰/۱۴۷ و ۰/۱۴۶ مول H₂O در متر مربع در ثانیه) و کمترین مقدار این صفت در هر دو عامل مربوط به تیمار شاهد (به ترتیب ۰/۰۹۷ و ۰/۰۹۸ مول H₂O در متر مربع در ثانیه) بود. بیشترین مقدار هدایت مزوفیلی در گیاهانی مشاهده شد که بذر آن‌ها با غلظت ۱ درصد دودآب پیش تیمار یا بوته آن‌ها با این غلظت از دودآب محلول پاشی (به ترتیب ۰/۰۳۷ و ۰/۰۳۸ مول CO₂ در متر مربع در ثانیه) شده بود. بوته‌های شاهد در هر دو عامل دارای کمترین مقدار هدایت مزوفیلی (به ترتیب ۰/۰۳۲ و ۰/۰۳۳ مول CO₂ در متر مربع در ثانیه) بودند (جدول‌های ۳ و ۴).

در این مطالعه پیش تیمار بذرهای فلفل چیلی با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش سرعت فتوسنتز (۱۵/۸۲ درصد)، سرعت تعرق (۱۳/۶۹ درصد)، هدایت روزنه‌ای (۵۱/۵۴ درصد) و هدایت مزوفیلی (۱۵/۶۲ درصد) شد. محلول پاشی بوته‌ها با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش سرعت فتوسنتز (۱۹/۶۲ درصد)، سرعت تعرق (۲۰ درصد)، غلظت CO₂ بین سلولی (۲/۳۴ درصد)، هدایت روزنه‌ای (۴۸/۹۷ درصد) و هدایت مزوفیلی (۱۵/۱۵ درصد) شد. سرعت فتوسنتز و تعرق تحت کاربرد دودآب به صورت محلول پاشی نسبت به پیش تیمار بذر افزایش بیشتری داشتند. اثرات مثبت دودآب در پیش تیمار بذر بیشتر روی افزایش ویگور گیاهچه‌ها و استقرار بوته‌هایی با زیست توده بیشتر متمرکز بود، در حالی که محلول پاشی با دودآب اثرات محرک بیشتری بر فرآیندهای فیزیولوژیک طی دوره رشد داشت.

افزایش سرعت فتوسنتز و تعرق همراه با افزایش هدایت مزوفیلی و روزنه‌ای نشان دهنده این است که دودآب هم از طریق بهبود بازشدگی روزنه‌ها و هم با کاهش مقاومت مزوفیلی در انتقال CO₂، کارایی فتوسنتزی را ارتقا داده است. همچنین، افزایش غلظت

CO₂ بین سلولی و هدایت مزوفیلی بیانگر بهبود کارایی انتقال CO₂ در سطح مزوفیل و کلروپلاست می‌باشد. همبستگی مثبت و معنی‌دار سرعت فتوسنتز با سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای و هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب فتوسنتزی در جدول ۵ نشان داده شده است. افزایش سرعت فتوسنتز فلفل چیلی تحت پیش‌ تیمار بذر به‌ویژه با ترکیبات بیواکتیو و محرک رشد به دلیل شروع سریع‌تر فعالیت‌های متابولیک، افزایش محتوای کلروفیل و به تبع آن سرعت فتوسنتز در سایر مطالعات گزارش شده است (Maphalaphathwa & Nciizah, 2025). Komatsu و همکاران (۲۰۲۲) در یک مطالعه پروتئومیک روی گندم (*Triticum aestivum* L.) مشاهده کردند که دودآب موجب افزایش بیوسنتز زیرواحدهای بزرگ و کوچک آنزیم روبیسکو و تنظیم فتوسنتز به‌ویژه در شرایط تنش‌های غیرزیستی می‌شود. Zhou و همکاران (۲۰۱۳) بیان کردند که افزایش القای باز شدن روزنه‌ها، افزایش هدایت روزنه‌ای و تبادلات گازی، فعالیت‌های فتوشیمیایی و تثبیت CO₂ مکانیسم‌های دودآب جهت افزایش سرعت فتوسنتز می‌باشند. افزایش ویژگی‌های فتوسنتزی در ریحان (Noroozi Shahri et al., 2021) و بادرنجبویه (Noroozi Shahri et al., 2023) تحت تیمار با غلظت‌های ۱:۱۰۰ تا ۱:۵۰۰ (v/v) دودآب به اثرات شبه سایتوکینینی دودآب نسبت داده شده است. به‌طور کلی، افزایش سرعت فتوسنتز و تعرق تحت تیمار دودآب ناشی از افزایش هدایت روزنه‌ای، ارتقای هدایت مزوفیلی و بهبود تبادل CO₂ در سطح مزوفیل می‌باشد. به نظر می‌رسد ترکیبات فعال موجود در دودآب با تحریک مسیرهای تنظیمی مشابه فیتوهورمون‌ها، تعادل ردوکس و کارایی فتوشیمیایی را بهبود داده‌اند. این مکانیسم‌ها در نهایت موجب افزایش ظرفیت تثبیت کربن و بهبود کارایی مصرف آب فتوسنتزی شدند.

صفات مورفولوژیک

مقایسه میانگین صفات مورفولوژیک مورد مطالعه نشان داد گیاهانی که بذر آن‌ها با غلظت ۱ درصد دودآب

پیش‌ تیمار یا بوته آن‌ها با این غلظت از دودآب محلول‌پاشی شده بود، دارای بیشترین ارتفاع بوته (به ترتیب ۴۷/۸۷ و ۴۷/۱۴ سانتی‌متر) بودند. کمترین ارتفاع متعلق به گیاهان شاهد (به ترتیب ۳۹/۹۸ و ۴۰/۶۱ سانتی‌متر) بود. بیشترین تعداد شاخه‌های جانبی اولیه و ثانویه (به ترتیب ۱۰/۳۵ و ۹/۰۶) مربوط به تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۱ درصد دودآب و کمترین مقدار این صفات (به ترتیب ۷/۷۱ و ۶/۲۰) مربوط به شاهد بود (جدول‌های ۳ و ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل دو عامل نشان داد که بیشترین عملکرد زیست‌توده (۲۱۹ گرم در متر مربع) مربوط به کرت‌هایی بود که بذر آن‌ها با غلظت‌های ۱ درصد دودآب پیش‌ تیمار و بوته‌های آن‌ها با همین غلظت دودآب محلول‌پاشی شده بود. افزایش عملکرد زیست‌توده تحت این تیمار تفاوت معنی‌داری با پیش‌ تیمار بذر با غلظت ۰/۱ درصد و محلول‌پاشی برگی با غلظت ۱ درصد دودآب نداشت. کمترین مقدار عملکرد زیست‌توده (۸۲/۹۵ گرم در متر مربع) مربوط به تیمار شاهد بود (شکل ۱).

در این مطالعه پیش‌ تیمار بذر با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش ارتفاع بوته (۱۹/۷۳ درصد) نسبت به تیمار شاهد شد. محلول‌پاشی بوته‌ها با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش ارتفاع بوته (۱۶/۰۷ درصد)، تعداد شاخه‌های جانبی اولیه (۳۴/۲۴ درصد) و ثانویه (۴۶/۱۲ درصد) نسبت به تیمار شاهد شد. پیش‌ تیمار بذر با غلظت ۱ درصد دودآب و محلول‌پاشی با همین غلظت از دودآب به‌طور همزمان موجب افزایش ۱۶۴ درصدی عملکرد زیست‌توده نسبت به تیمار شاهد شد. اگرچه درصد افزایش ارتفاع بوته و عملکرد زیست‌توده در کاربرد دودآب به‌صورت پیش‌ تیمار بذر بیشتر بود، ولی کاربرد آن به‌صورت محلول‌پاشی برگی موجب افزایش معنی‌دار تعداد شاخه‌های جانبی اولیه و ثانویه شد. به نظر می‌رسد که کاربرد دودآب به‌صورت پیش‌ تیمار بذر، اگرچه ارتفاع بوته و تجمع زیست‌توده را افزایش داده است، اما بخش بیشتری از آسمیلات‌های فتوسنتزی به افزایش ارتفاع و قطر ساقه اصلی اختصاص یافته است. افزایش انشعابات

پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد (Kulkarni *et al.*, 2007, 2008; Noroozi Shahri *et al.*, 2020).

صفات عملکردی

مقایسه میانگین صفات عملکردی مورد مطالعه نشان داد که بیشترین تعداد میوه در متر مربع (۱۱۵/۸۸) مربوط به بوته‌هایی بود که با غلظت ۱ درصد دودآب محلول پاشی شده بودند و کمترین تعداد این صفت در متر مربع (۸۳/۱۸) مربوط به تیمار شاهد بود. بیشترین عملکرد میوه تازه و خشک (به ترتیب ۸۲۲/۵۲ و ۸۴/۱۹ گرم در متر مربع) در پیش تیمار بذر مربوط به غلظت ۱ درصد دودآب بود. در این عامل بین عملکرد میوه تازه و خشک در تیمارهای شاهد، پیش تیمار آبی و پیش تیمار با غلظت ۰/۰۱ درصد دودآب تفاوت معنی داری وجود نداشت. در محلول پاشی برگی بیشترین عملکرد میوه تازه و خشک (به ترتیب ۷۵۳/۶۳ و ۷۹/۱۱ گرم در متر مربع) مربوط به غلظت ۱ درصد دودآب و کمترین مقدار این صفات (به ترتیب ۵۸۶/۶۱ و ۵۹/۱۴ گرم در متر مربع) مربوط به تیمار شاهد بود. محلول پاشی با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش ۴ درصدی نسبت وزن میوه خشک به وزن میوه تازه شد. بیشترین شاخص برداشت در بین سطوح مختلف پیش تیمار بذر مربوط به تیمار شاهد (۳۷/۱۶ درصد) و در بین سطوح مختلف محلول پاشی برگی مربوط به غلظت ۰/۰۱ درصد (۳۴/۲۵ درصد) بدون تفاوت معنی دار با تیمارهای شاهد و غلظت ۰/۱ درصد دودآب بود. تمام سطوح مختلف پیش تیمار بذر بدون تفاوت معنی دار با هم موجب کاهش شاخص برداشت نسبت به تیمار شاهد شدند. در بین سطوح مختلف محلول پاشی برگی کمترین شاخص برداشت (۳۱/۴۰ درصد) مربوط به دودآب ۱ درصد بود (جدول‌های ۳ و ۴).

در این مطالعه پیش تیمار بذر با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش عملکرد میوه تازه (۳۲/۹۰ درصد)، عملکرد میوه خشک (۳۰/۵۸ درصد) و کاهش شاخص برداشت (۱۰/۶۲ درصد) نسبت به تیمار شاهد شد. محلول پاشی بوته‌ها با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش تعداد میوه (۳۹/۳۱ درصد)، وزن تازه

ساقه در اغلب موارد موجب افزایش تعداد برگ و منابع تولید آسمیلات می‌شود. ایجاد منابع فیزیولوژیک بیشتر موجب افزایش تولید آسمیلات فتوسنتزی و تجمع زیست توده در گیاه می‌شود. در این مطالعه همبستگی مثبت و معنی داری بین سرعت فتوسنتز با ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی اولیه، تعداد شاخه جانبی ثانویه و زیست توده وجود داشت. همچنین همبستگی مثبت و معنی داری بین زیست توده با سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای، هدایت مزوفیلی، ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی اولیه و تعداد شاخه جانبی ثانویه وجود داشت (جدول ۵).

با توجه به اینکه انشعاب بیشتر ساقه پتانسیل تمایز تعداد گل و متعاقباً تعداد میوه را افزایش می‌دهد، بنابراین محلول پاشی با دودآب گزینه برتری نسبت به پیش تیمار بذر با آن به نظر می‌رسد. همبستگی مثبت صفات مورفولوژیک با شاخص‌های فتوفیزیولوژیک در این مطالعه نشان می‌دهد که ارتقای تبادلات گازی و فتوسنتز تحت تیمار دودآب، به طور مستقیم موجب افزایش انشعاب، زیست توده و ظرفیت تولیدی گیاه شده است.

Jain و همکاران (۲۰۰۸) مشاهده کردند که ترکیب بوتنولیدی مشتق از دود حاصل از سوختن گیاهان می‌تواند بسته به غلظت مورد استفاده، هم فعالیت شبه سایتوکینینی و هم فعالیت شبه اکسینی داشته باشد. بوتنولید در غلظت 10^{-18} تا 10^{-10} مولار دارای فعالیت شبه سایتوکینینی معادل با غلظت $2/5 \times 10^{-10}$ مولار کینتین و در غلظت 10^{-6} مولار دارای فعالیت شبه اکسینی معادل با غلظت 10^{-7} تا 10^{-6} مولار ایندول-۳-بوتیریک اسید بود (Jain *et al.*, 2008). Aremu و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند که ترکیب بوتنولیدی عمده در دودآب به نام کاریکینولید (کاریکین I) نه تنها می‌تواند فعالیت شبه سایتوکینینی داشته باشد، بلکه برهمکنش آن با فیتوهورمون‌های درونی گیاه موجب تغییر پروفیل و افزایش ذخایر سایتوکینین در گیاه می‌شود. افزایش ارتفاع، انشعاب شاخساره و زیست توده تحت کاربرد دودآب در این مطالعه با نتایج حاصل از

(۲۸/۴۷ درصد) و خشک میوه (۳۳/۷۶ درصد)، نسبت وزن خشک به وزن تازه میوه (۴ درصد) و کاهش شاخص برداشت (۷/۹۷ درصد) شد. عدم تغییر تعداد میوه تحت پیش تیمار بذر با دودآب و افزایش معنی دار تعداد میوه توأم با افزایش معنی دار نسبت وزن خشک به وزن تازه میوه تحت محلول پاشی برگ با دودآب نشان می دهد که محلول پاشی موجب تولید تعداد میوه بیشتر و با درصد ماده خشک بالاتری نسبت به پیش تیمار بذر و شاهد شده است.

همبستگی مثبت و معنی داری بین تعداد میوه با ارتفاع، تعداد شاخه جانبی اولیه، تعداد شاخه جانبی ثانویه، زیست توده، سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق و هدایت مزوفیلی وجود داشت. همبستگی مثبت و معنی داری بین وزن تازه و خشک میوه با ارتفاع، تعداد شاخه جانبی اولیه، تعداد شاخه جانبی ثانویه، زیست توده، تعداد میوه، سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، غلظت CO_2 بین سلولی، هدایت روزنه ای و هدایت مزوفیلی وجود داشت. نسبت وزن تازه به خشک میوه همبستگی مثبت و معنی داری با تعداد شاخه جانبی اولیه، زیست توده، سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق و هدایت مزوفیلی داشت. همبستگی منفی و معنی داری بین شاخص برداشت با سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت مزوفیلی، ارتفاع بوته، شاخه های جانبی اولیه و عملکرد زیست توده وجود داشت (جدول ۵). به طور کلی با بهبود شرایط بیوشیمیایی و افزایش ویژگی های فتوسنتزی انشعاب گیاه، تعداد میوه و درصد ماده خشک میوه افزایش یافته است.

افزایش تعداد و عملکرد میوه تحت تیمار دودآب با مطالعات پیشین مطابقت دارد (Kulkarni et al., 2008; Lohitha et al., 2023). Light و همکاران (۲۰۰۷) گزارش نمودند که خیساندن کورم های *Watsonia borbonica* در غلظت ۱:۵۰۰ (v/v) دودآب موجب افزایش معنی دار گلدهی این گیاه شد، به طوری که از هر ۱۰ گیاه شاهد تنها دو گیاه و از هر

۱۰ گیاه تیمار شده ۹ گیاه خوشه های گلدار تولید کردند. گلدهی بسیاری از گیاهان بومی مانند *Cyrtanthus ventricosus* Willd. نیز پس از آتش سوزی های جنگلی گزارش شده است (Kulkarni et al., 2011). در این مطالعه نیز احتمالاً دودآب با تأثیر مثبت بر گلدهی فلفل، پتانسیل تولید تعداد میوه بیشتر را ایجاد نموده است. به نظر می رسد که دودآب با اثرات شبه سایتوکینینی خود موجب افزایش تقسیم سلولی در گیاهان تحت تیمار شده است (Jain et al., 2008) و با ایجاد مخازن فیزیولوژیک قوی تر موجب جذب بیشتر آسمیلات های فتوسنتزی به سمت میوه ها و تجمع در آنها شده است (Noroozi Shahri et al., 2018).

Wei و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه خود روی مسیرهای متابولیک و مکانیسم های تنظیمی مولکولی تغییر رنگ میوه فلفل و بررسی داده های ترنسکرپتومیک، ۵ ژن مرتبط با مسیر فتوسنتز و ۶ ژن مرتبط با مسیر پروتئین های آنتن فتوسنتز را گزارش کردند. بنابراین می توان گفت که میوه های فلفل تا زمانی که سبز می باشند، نه تنها به عنوان مخازن فیزیولوژیک، بلکه به عنوان منابع فیزیولوژیک دارای فتوسنتز فعال هستند و همان طور که محلول پاشی با دودآب موجب افزایش سرعت فتوسنتز در برگ ها شد، سرعت فتوسنتز و آسمیلاسیون را در میوه های سبز نیز افزایش می دهد و موجب تجمع بیشتر آسمیلات ها در میوه ها می شود. در نتیجه نسبت وزن خشک به وزن تازه در گیاهان تحت محلول پاشی با غلظت ۱ درصد دودآب به طور معنی داری بیشتر از گیاهان سایر تیمارهای مورد بررسی و شاهد بود. در فلفل چیلی (*C. annuum*)، به طور متوسط، ۱۷ درصد وزن خشک میوه مربوط به جفت (پلاستا^۱)، ۲۲ درصد مربوط به دیواره میوه (پریکارپ^۲) و ۶۱ درصد مربوط به بذرها می باشد (Zamljen et al., 2021). بنابراین، نسبت بیشتر وزن خشک به وزن تازه می تواند

² Pericarp¹ Placenta

با افزایش ضخامت دیواره میوه مرتبط باشد که یکی از ویژگی‌های مهم کیفی میوه است.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند دود آب موجب توسعه توأم منابع و مخازن فیزیولوژیک شده است. اثر متقابل پیش تیمار بذر و محلول پاشی برگ با دود آب موجب افزایش ۱۶۴ درصدی عملکرد زیست توده و اثر ساده هر یک از این عامل‌ها موجب افزایش ۳۰ درصدی عملکرد میوه شده است. بنابراین توسعه بیشتر شاخساره گیاه نسبت به میوه موجب کاهش نسبی شاخص برداشت (۷-۱۰ درصد) شده است. صفات تلفیقی مانند شاخص برداشت به پژوهشگران این امکان می‌دهند که اهداف و اولویت‌های تحقیقاتی جهت افزایش عملکرد یک گیاه را سریع شناسایی کنند. با این حال، ماهیت تلفیقی شاخص برداشت، اهداف ملموسی را برای پژوهش در زمینه بهبود عملکرد بر اساس فرآیندهای شیمیایی یا فیزیولوژیک ارائه نمی‌دهد و پیامدهای بالقوه

مربوطه را برای رشد و بقای گیاه مشخص نمی‌کند (Smith *et al.*, 2018). مغایرت نتایج این پژوهش با نتایج گزارش شده توسط Kulkarni و همکاران (۲۰۰۸) مبنی بر افزایش ۱۰ درصدی شاخص برداشت گوجه‌فرنگی تحت تیمار خاک کاربرد دود آب می‌تواند به دلیل تفاوت در روش کاربرد دود آب، گونه گیاهی، شرایط گلخانه نسبت به مزرعه و ... باشد. مغایرت این نتیجه با گزارش افزایش شاخص برداشت گندم تحت تیمار محلول پاشی با دود آب توسط Gholami و همکاران (۲۰۱۸) در شرایط مزرعه، می‌تواند ناشی از تفاوت در ماهیت رشد محدود گندم و رشد نامحدود فلفل و همچنین تفاوت در محدودیت منابع و مخازن فیزیولوژیک این دو گیاه باشد؛ به‌طوری‌که در فلفل، تا زمانی که شرایط محیطی امکان تداوم رشد را فراهم کنند، توسعه شاخه‌های جانبی و گلدهی می‌تواند ادامه یابد.

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات مورد ارزیابی در فلفل چیلی تحت پیش تیمار بذر با سطوح مختلف دود آب

Table 3- Comparison of means for the evaluated characteristics in chili pepper under seed priming of different levels of smoke-water (SW)

تیمارها Treatments	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	سرعت تعرق Transpiration rate ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	هدایت مزوفیلی Mesophyll conductance ($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	ارتفاع بوته Height (cm)	عملکرد زیست توده Biomass yield (g m^{-2})	عملکرد میوه تازه Fresh fruit yield (g m^{-2})	عملکرد میوه خشک Dry fruit yield (g m^{-2})	شاخص برداشت Harvest index (%)
شاهد Control	9.54	5.77	0.097	0.032	39.98	111.05	618.89	64.47	37.16
پیش تیمار آبی Hydropriming	9.85	6.14	0.109	0.033	41.68	132.96	586.86	60.78	31.43
دود آب ۰/۰۱ درصد SW 0.01%	10.32	6.33	0.126	0.035	46.06	136.70	616.11	63.54	32.08
دود آب ۰/۱ درصد SW 0.1%	10.54	6.55	0.138	0.035	46.49	164.20	752.95	77.60	32.44
دود آب ۱ درصد SW 1%	11.05	6.56	0.147	0.037	47.87	171.64	822.52	84.19	33.21
LSD 0.05	0.52	0.42	0.03	0.002	4.90	9.70	41.35	4.65	1.67

در هر ستون، تفاوت‌های معنی‌داری بین میانگین‌های با اختلاف بیشتر از عدد LSD در سطح احتمال پنج درصد وجود دارد.

Within each column, means differing by more than the LSD value are significantly different at the 5% probability level.

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات مورد ارزیابی در فلفل چیلی تحت محلول‌پاشی برگ‌ها با سطوح مختلف دودآب
Table 4- Comparison of means for the evaluated characteristics in chili pepper under foliar application of different levels of smoke-water (SW)

تیمارها Treatments	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	سرعت تعرق Transpiration rate ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	غلظت CO_2 بین سلولی Inter-cellular CO_2 concentration ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol air}^{-1}$)	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	هدایت مزوفیلی Mesophyll conductance ($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	ارتفاع بوته Height (cm)	شاخه‌های جانبی اولیه Primary branches (no. plant ⁻¹)
شاهد Control	9.58	5.75	289.86	0.098	0.033	40.61	7.71
دودآب ۰/۰۱ درصد SW 0.01%	9.94	6.14	292.80	0.118	0.033	44.56	9.28
دودآب ۰/۱ درصد SW 0.1%	10.07	6.29	294.26	0.132	0.034	45.36	9.31
دودآب ۱ درصد SW 1%	11.46	6.90	296.66	0.146	0.038	47.14	10.35
LSD 0.05	0.47	0.37	3.82	0.032	0.001	4.38	1.47
تیمارها Treatments	شاخه‌های جانبی ثانویه Secondary branches (no. plant ⁻¹)	عملکرد زیست‌توده Biomass yield (g m^{-2})	تعداد میوه Number of fruits (num. m^{-2})	عملکرد میوه تازه Fresh fruit yield (g m^{-2})	عملکرد میوه خشک Dry fruit yield (g m^{-2})	نسبت وزن خشک به وزن تازه میوه Dry/Fresh fruit weight ratio	شاخص برداشت Harvest index (%)
شاهد Control	6.20	115.62	83.18	586.61	59.14	0.100	34.12
دودآب ۰/۰۱ درصد SW 0.01%	7.02	134.00	103.14	671.19	69.01	0.102	34.25
دودآب ۰/۱ درصد SW 0.1%	7.40	148.57	106.62	706.43	73.23	0.103	33.29
دودآب ۱ درصد SW 1%	9.06	175.04	115.88	753.63	79.11	0.104	31.40
LSD 0.05	1.28	8.68	18.13	36.99	4.16	0.002	1.50

در هر ستون، تفاوت‌های معنی‌داری بین میانگین‌های با اختلاف بیشتر از عدد LSD در سطح احتمال پنج درصد وجود دارد.
Within each column, means differing by more than the LSD value are significantly different at the 5% probability level.

جدول ۵- مقادیر ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات مورد ارزیابی در فلفل چیلی تحت پیش تیمار بذر و محلول پاشی برگ‌ی با سطوح مختلف دودآب

Table 5- Pearson correlation coefficients among the evaluated characteristics in chili pepper under seed priming and foliar application of different levels of smoke-water (SW)

صفات Traits	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1														
2	0.67**	1													
3	0.17 ^{ns}	0.13 ^{ns}	1												
4	0.52**	0.55**	0.20 ^{ns}	1											
5	0.96**	0.64**	-0.07 ^{ns}	0.48**	1										
6	0.34**	-0.45**	0.05 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	0.33**	1									
7	0.26*	0.41**	-0.14 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.30*	-0.18 ^{ns}	1								
8	0.35**	0.46**	-0.08 ^{ns}	0.24 ^{ns}	0.38**	-0.15 ^{ns}	0.54**	1							
9	0.56**	0.35**	0.11 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.54**	0.21 ^{ns}	0.29*	0.38**	1						
10	0.42**	0.26*	-0.13 ^{ns}	0.22 ^{ns}	0.46**	0.14 ^{ns}	0.62**	0.46**	0.28*	1					
11	0.63**	0.49**	0.30*	0.39**	0.56**	0.13 ^{ns}	0.42**	0.47**	0.53**	0.57**	1				
12	0.65**	0.52**	0.28*	0.40**	0.59**	0.13 ^{ns}	0.41**	0.50**	0.55**	0.56**	0.98**	1			
13	0.29*	0.26*	-0.02 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.30**	0.03 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.25*	0.25 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.27*	1		
14	0.68**	0.62**	0.06 ^{ns}	0.42**	0.68**	0.01 ^{ns}	0.53**	0.64**	0.56**	0.61**	0.80**	0.82**	0.26*	1	
15	-0.32*	-0.45**	0.22 ^{ns}	-0.24 ^{ns}	-0.38**	0.21 ^{ns}	-0.35**	-0.43**	-0.21 ^{ns}	-0.03 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	-0.13 ^{ns}	-0.13 ^{ns}	-0.65**	1

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد. ns: غیرمعنی‌دار.

* and **: Significant at 5 and 1% probability levels, respectively. ns: non-significant.

۱: سرعت فتوسنتز (1: Photosynthesis rate)، ۲: سرعت تعرق (2: Transpiration rate)، ۳: غلظت CO₂ بین سلولی (3: Intercellular CO₂ concentration)، ۴: هدایت روزنه‌ای (4: Stomatal conductance)، ۵: هدایت مزوفیلی (5: Mesophyll conductance)، ۶: کارایی مصرف آب فتوسنتزی (6: Photosynthetic WUE)، ۷: ارتفاع (7: Height)، ۸: شاخه‌های جانبی اولیه (8: Primary branches)، ۹: شاخه‌های جانبی ثانویه (9: Secondary branches)، ۱۰: تعداد میوه (10: Number of fruits)، ۱۱: عملکرد میوه تازه (11: Fresh fruit yield)، ۱۲: عملکرد میوه خشک (12: Dry fruit yield)، ۱۳: نسبت وزن خشک به وزن تازه میوه (13: Dry/Fresh fruit weight ratio)، ۱۴: عملکرد زیست‌توده (14: Biomass yield)، ۱۵: شاخص برداشت (15: Harvest index).

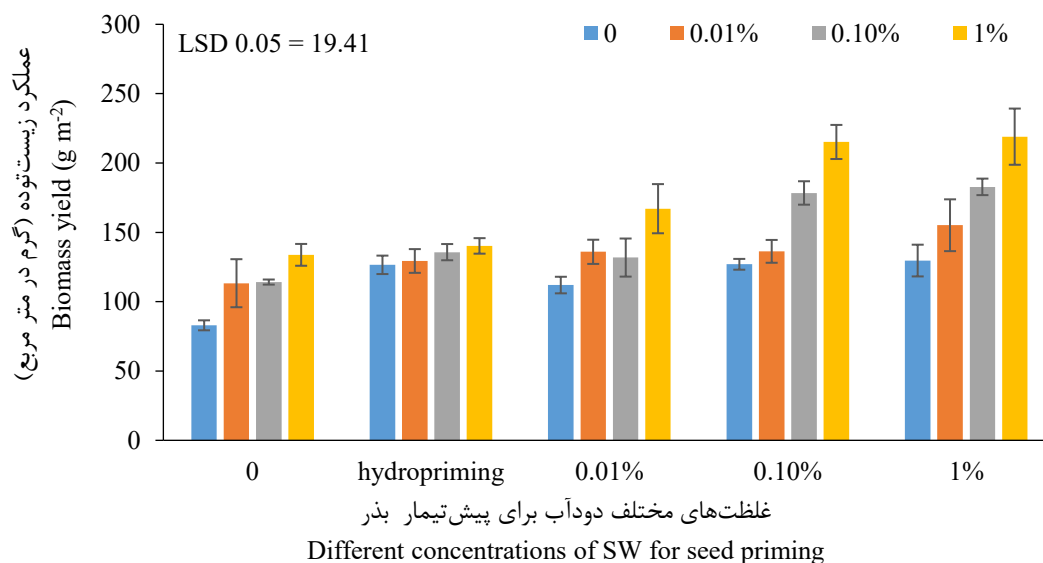
نتیجه‌گیری کلی

درصد موجب افزایش ۱۶۴ درصد عملکرد زیست‌توده نسبت به تیمار شاهد شد. پیش تیمار بذر و محلول پاشی برگ‌ی با غلظت ۱ درصد دودآب به ترتیب موجب کاهش ۱۰/۶۲ و ۷/۹۷ درصدی شاخص برداشت نسبت به تیمار شاهد شد. بهبود سطح تبادلات گازی و ویژگی‌های فتوسنتزی و عملکردی تحت تیمار با دودآب نشان می‌دهد که این نهاده ارگانیک می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد پایدار و سازگار با محیط زیست برای افزایش عملکرد کمی و کیفی فلفل چیلی مطرح باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش با استفاده از مواد و تجهیزات گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه رازی انجام شد. بدین‌وسیله، نویسندگان از همکاری و حمایت این گروه صمیمانه قدردانی می‌کنند.

به‌طور کلی در این مطالعه مشاهده شد که دودآب در هر دو شکل کاربرد به‌صورت پیش تیمار بذر و محلول پاشی بوته‌های فلفل چیلی روندی افزایشی و وابسته به غلظت نشان داد. پیش تیمار بذر فلفل چیلی با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای، هدایت مزوفیلی، ارتفاع بوته و وزن تازه و خشک میوه نسبت به تیمار شاهد شد. محلول پاشی برگ‌ی با غلظت ۱ درصد دودآب موجب افزایش سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، غلظت CO₂ بین سلولی، هدایت روزنه‌ای، هدایت مزوفیلی، ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی اولیه و ثانویه، تعداد میوه، وزن تازه و خشک میوه و نسبت وزن خشک به تازه میوه نسبت به شاهد شد. پیش تیمار بذر همراه با محلول پاشی برگ‌ی با غلظت ۱



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل پیش تیمار بذر و محلول پاشی برگ با غلظت‌های مختلف دودآب بر عملکرد زیست‌توده فلفل چیلی. در هر ستون، تفاوت‌های معنی‌داری بین میانگین‌های با اختلاف بیشتر از عدد LSD در سطح احتمال پنج درصد وجود دارد.

Figure 1- Means comparison of the interaction of seed priming and foliar application with different concentrations of smoke-water (SW) on chili pepper biomass yield. Within each column, means differing by more than the LSD value are significantly different at the 5% probability level.

References

- Abu, Y., Romo, J.T., Bai, Y. & Coulman, B. (2016). Priming seeds in aqueous smoke solutions to improve seed germination and biomass production of perennial forage species. *Canadian Journal of Plant Science*, 96(4), 551-563. <https://doi.org/10.1139/cjps-2015-0229>
- Antala, M., Sytar, O., Rastogi, A. & Brestic, M. (2020). Potential of karrikins as novel plant growth regulators in agriculture. *Plants*, 9(1), 43. <https://doi.org/10.3390/plants9010043>
- Aremu, A.O., Plačková, L., Novák, O., Stirk, W.A., Doležal, K. & Van Staden, J. (2016). Cytokinin profiles in ex vitro acclimatized *Eucomis autumnalis* plants pre-treated with smoke-derived karrikinolide. *Plant Cell Reports*, 35(1), 227-238. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1881-y>
- Aslam, M.M., Jamil, M., Khatoon, A., Hendawy, S.E., Al-Suhaibani, N.A., Malook, I. & Rehman, S.U. (2017). Physiological and biochemical responses of maize (*Zea mays* L.) to plant-derived smoke solution. *Pakistan Journal of Botany*, 49(2), 435-443.
- Deng, Q., Wang, H., Qiu, Y., Wang, D., Xia, Y., Zhang, Y., Pei, M., Zhao, Y., Xu, X. & Zhang, H. (2025). The multifaceted impact of karrikin signaling in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(6), 2775. <https://doi.org/10.3390/ijms26062775>
- Duranova, H., Valkova, V. & Gabriny, L. (2022). Chili peppers (*Capsicum* spp.): The spice not only for cuisine purposes: An update on current knowledge. *Phytochemistry Reviews*, 21(4), 1379-1413. <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09789-7>
- Elsadek, M.A. & Yousef, E.A. (2019). Smoke-water enhances germination and seedling growth of four horticultural crops. *Plants*, 8(4), 104. <https://doi.org/10.3390/plants8040104>
- Esmailpour, B., Bahadori, S. & Khoramdel, S. (2020). Effects of polyamines on seed germination characteristics of okra

- (*Abelmoschus esculentus* L. Basanti) under different times and temperatures. *Journal of Vegetables Sciences*, 3(6), 135-146. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2020.72727.1019>
- Fischer, R.A., Rees, D., Sayre, K.D., Lu, Z.M., Condon, A.G. & Saavedra, A.L. (1998). Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Crop Science*, 38(6), 1467-1475. <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800060011x>
- Flematti, G.R., Waters, M.T., Scaffidi, A., Merritt, D.J., Ghisalberti, E.L., Dixon, K.W. & Smith, S.M. (2013). Karrikin and cyanohydrin smoke signals provide clues to new endogenous plant signaling compounds. *Molecular Plant*, 6(1), 29-37. <https://doi.org/10.1093/mp/sss132>
- Gholami, B., Noroozi Shahri, F., Mondani, F., Jalali Honarmand, S. & Saeidi, M. (2018). Evaluating some growth indices and grain yield in wheat in response to urea fertilizer and smoke-water. *Journal of Crops Improvement*, 20(3), 609-626. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2018.250390.1929>
- Gilbert, M.E. & Ripley, B.S. (2002). The effect of smoke on the photosynthetic gas exchange of *Chrysanthemoides monilifera*. *South African Journal of Botany*, 68(4), 525-531. [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)30380-X](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)30380-X)
- Guercio, A.M., Gilio, A.K., Pawlak, J. & Shabek, N. (2024). Structural insights into rice KAI2 receptor provide functional implications for perception and signal transduction. *Journal of Biological Chemistry*, 300(8), 107593. <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2024.107593>
- Gupta, S., Hrdlička, J., Kulkarni, M., Doležalová, I., Pěňčík, A., Van Staden, J., Novák, O. & Doležal, K. (2024). Karrikinolide1 (KAR1), a bioactive compound from smoke, improves the germination of morphologically dormant *Apium graveolens* L. seeds by reducing Indole-3-Acetic Acid (IAA) Levels. *Plants*, 13(15), 2096. <https://doi.org/10.3390/plants13152096>
- Jain, N., Stirk, W.A. & Van Staden, J. (2008). Cytokinin- and auxin-like activity of a butenolide isolated from plant-derived smoke. *South African Journal of Botany*, 74(2), 327-331. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2007.10.008>
- Kępczyński, J. & Kępczyńska, E. (2023). Plant-derived smoke and karrikin 1 in seed priming and seed biotechnology. *Plants*, 12(12), 2378. <https://doi.org/10.3390/plants12122378>
- Khan, R.U., Ullah, I., Khurshid, G., Suboktagin, S., Khan, A.R., Zeb, I., Khan, Z.A., Jamil, M., Rha, E.S., Ali, H. & Ahmad, R. (2024). Stimulatory effects of smoke solution and biogas digestate slurry application on photosynthesis, growth, and methylation profiling of *Solanum tuberosum*. *Plant Signaling & Behavior*, 19(1), 2336724. <https://doi.org/10.1080/15592324.2024.2336724>
- Komatsu, S., Yamaguchi, H., Hitachi, K., Tsuchida, K., Rehman, S.U. & Ohno, T. (2022). Morphological, biochemical, and proteomic analyses to understand the promotive effects of plant-derived smoke solution on wheat growth under flooding stress. *Plants*, 11(11), 1508. <https://doi.org/10.3390/plants11111508>
- Kulkarni, M.G., Ascough, G.D. & Van Staden, J. (2007). Effects of foliar applications of smoke-water and a smoke-isolated butenolide on seedling growth of okra and tomato. *HortScience*, 42(1), 179-182. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.1.179>
- Kulkarni, M.G., Ascough, G.D. & Van Staden, J. (2008). Smoke-water and a smoke-isolated butenolide improve growth and yield of tomatoes under greenhouse conditions. *HortTechnology*, 18(3), 449-454.

- <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.18.3.449>
- Kulkarni, M.G., Light, M.E. & Van Staden, J. (2011). Plant-derived smoke: old technology with possibilities for economic applications in agriculture and horticulture. *South African Journal of Botany*, 77(4), 972-979. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2011.08.006>
- Light, M.E., Burger, B.V., Staerk, D., Kohout, L. & Van Staden, J. (2010). Butenolides from plant-derived smoke: natural plant-growth regulators with antagonistic actions on seed germination. *Journal of Natural Products*, 73(2), 267-269. <https://doi.org/10.1021/np900630w>
- Light, M.E., Kulkarni, M.G., Ascough, G.D. & Van Staden, J. (2007). Improved flowering of a South African *Watsonia* with smoke treatments. *South African Journal of Botany*, 73(2), 298. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2007.02.074>
- Liu, M., Shan, Q., Ding, E., Gu, T. & Gong, B. (2023). Karrikin increases tomato cold tolerance via strigolactone and the abscisic acid signaling network. *Plant Science*, 332, 111720. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111720>
- Lohitha, B., Rai, P.K. & Rai, S.K. (2023). Standardization of different doses and duration of plant-derived smoke water on growth, yield and yield-attributing traits of linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Journal of Oilseeds Research*, 40(4), 212-217. <https://doi.org/10.56739/eds8bf65>
- Mahmoudi, F. & Sheikhzadehmasadegh, P. (2025). The effect of hydropriming, biopriming (*Trichoderma fungus*) and seed coating with nano-chelate on germination indices and antioxidant properties of quinoa leaf extract (*Chenopodium quinoa* Willd.) under cadmium stress. *Journal of Vegetables Sciences*, 9(18), 15-36. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2024.2023232.1356>
- Maphalaphathwa, M. & Nciizah, A.D. (2025). Nutrient seed priming effects on water stress tolerance and nutrient uptake of chilies (*Capsicum annum* L.). *Agronomy*, 15(4), 930. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040930>
- Meng, Y., Varshney, K., Incze, N., Badics, E., Kamran, M., Davies, S.F., Oppermann, L.M., Magne, K., Dalmais, M., Bendahmane, A. & Sibout, R. (2022). KARRIKIN INSENSITIVE2 regulates leaf development, root system architecture and arbuscular-mycorrhizal symbiosis in *Brachypodium distachyon*. *The Plant Journal*, 109(6), 1559-1574. <https://doi.org/10.1111/tpj.15651>
- Nelson, D.C., Flematti, G.R., Ghisalberti, E.L., Dixon, K.W. & Smith, S.M. (2012). Regulation of seed germination and seedling growth by chemical signals from burning vegetation. *Annual Review of Plant Biology*, 63(1), 107-130. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105545>
- Noroozi Shahri, F. & Jalali Honarmand, S. (2025). Effect of plant-derived smoke on salinity tolerance of chili pepper seedlings. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 15(2), 5503-5508. <https://doi.org/10.71551/ijpp.2025.1197851>
- Noroozi Shahri, F., Gholami, B., Jalali Honarmand, S., Mondani, F. & Saeedi, M. (2018). Evaluating the effect of smoke-water and nitrogen fertilizer on wheat (*Triticum aestivum* L.) ecophysiological traits. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 16(2), 459-475. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i2.66520>
- Noroozi Shahri, F., Jalali Honarmand, S., Saeidi, M. & Mondani, F. (2020). Evaluation of growth phytohormones and different concentrations of plant-derived smoke applications on growth characteristics and biological yield of medicinal plants Lemon balm (*Melissa*

- officinalis*) and Basil (*Ocimum basilicum*). *Journal of Crops Improvement*, 22(1), 89-102. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2019.280801.2211>
- Noroozi Shahri, F., Jalali Honarmand, S., Saeidi, M. & Mondani, F. (2021). Evaluation of some biochemical characteristics of medicinal plant basil (*Ocimum basilicum* L.) under the application of growth phytohormones and phytohormone-like substances. *Plant Process and Function*, 10(42), 189-210. (In Persian). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1400.10.42.19.1>
- Noroozi Shahri, F., Jalali Honarmand, S., Saeidi, M. & Mondani, F. (2023). Improving some biochemical characteristics of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) with phytohormone-like activity of plant-derived smoke. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(4), 229-244. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2022.337941.654892>
- Rastogi, B., Schmidt, A., Berkelhammer, M., Noone, D., Meinzer, F.C., Kim, J. & Still, C.J. (2022). Enhanced photosynthesis and transpiration in an old-growth forest due to wildfire smoke. *Geophysical Research Letters*, 49(10), e2022GL097959. <https://doi.org/10.1029/2022GL097959>
- Ratnayaka, H.H. & Kincaid, D. (2005). Gas exchange and leaf ultrastructure of tinnevelly senna, *Cassia angustifolia*, under drought and nitrogen stress. *Crop Science*, 45(3), 840-847. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.737>
- Robinson, G.M. (2024). Global sustainable agriculture and land management systems. *Geography and Sustainability*, 5(4), 637-646. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.09.001>
- Smith, M.R., Rao, I.M. & Merchant, A. (2018). Source-sink relationships in crop plants and their influence on yield development and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1889. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01889>
- Uddin, M., Singh, S., Chishti, A.S., Singh, S., Bhat, U.H. & Khan, M.M. (2023). Rhizomes priming with smoke-water and karrikinolide enhances the production of essential oil and bioactive constituents of *Mentha arvensis* L. via improving the growth and physiological attributes of the plant. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(11), 7023-7037. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-10994-1>
- Waters, M.T. & Nelson, D.C. (2023). Karrikin perception and signalling. *New Phytologist*, 237(5), 1525-1541. <https://doi.org/10.1111/nph.18598>
- Wei, M., Wen, J., Ren, Y., Shao, D., Wang, Y., Li, J. & Li, Q. (2025). Metabolic pathways and molecular regulatory mechanisms of fruit color change during the greening stage of peppers (*Capsicum annuum* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 26(10), 4508. <https://doi.org/10.3390/ijms26104508>
- Yuca, H. (2022). *Capsicum annuum* L. In Novel drug targets with traditional herbal medicines: Scientific and clinical evidence (pp. 95-108). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07753-1_7
- Zamljen, T., Jakopič, J., Hudina, M., Veberič, R. & Slatnar, A. (2021). Influence of intra- and interspecies variation in chilies (*Capsicum* spp.) on metabolite composition of three fruit segments. *Scientific Reports*, 11(1), 4932. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84458-5>
- Zhou, J., Fang, L., Wang, X., Guo, L. & Huang, L. (2013). Effects of smoke-water on photosynthetic characteristics of *Isatis indigotica* seedlings. *Sustainable Agriculture Research*, 2(2), 24. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.231313>