

تأثیر رطوبت نسبی هوا بر نیاز آبی گیاه ریحان در گلخانه

چکیده

کشور ایران به دلیل موقعیت استراتژیک خود به لحاظ قرارگیری در مجاورت دریا، از ظرفیت منحصر به فردی برای بهره‌مندی از این پتانسیل عظیم جهت توسعه در بخش‌های مختلف برخوردار است. در زمینه توسعه کشاورزی در مناطق ساحلی، تاکون ایده‌های مختلفی در دنیا توسعه داده شده که یکی از نمونه‌های موفق آن سیستم گلخانه ساحلی می‌باشد. این سیستم با شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی، امکان تولید همزمان محصول و آب شیرین را فراهم می‌نماید. در این راستا، در پژوهش حاضر با الگوپذیری از اصول کار سیستم گلخانه ساحلی، نسبت به مدل‌سازی فیزیکی محیط کشت مشابه این سیستم با بکارگیری دستگاه‌ها و تجهیزات هوشمند اقدام گردید. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی تأثیر رطوبت نسبی بالای هوا (بیش از ۸۰ درصد) بر نیاز آبی گیاه و عملکرد محصول ریحان در گلخانه و مقایسه با مقادیر متناظر آن در محیط‌های کشت کنترل شده با رطوبت نسبی هوای معمول مانند شرایط گلخانه‌های متعارف می‌باشد. در این پژوهش کشت گیاه مطابق طرح بلوک‌های کامل تصادفی و درون گلدان صورت پذیرفت و نیاز آبی محصول و مقدار آب مورد نیاز هر گلدان به روش میکروولایسیمتر تعیین گردید. بر اساس نتایج، عملکرد محصول بر حسب وزن تر بوته در محیط کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی به ترتیب ۱۵/۹۸ و ۱۵/۸۳ گرم و وزن خشک بوته در محیط کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی به ترتیب ۱/۶۲ و ۱/۵۳ گرم اندازه‌گیری شد که تفاوت معنی‌داری بین این مقادیر مشاهده نشد. این در حالی است که مجموع و متوسط نیاز آبی گیاه ریحان در طول دوره کشت محصول، در محیط کشت گلخانه ساحلی به ترتیب برابر با ۴۵/۲۰ میلی‌متر و ۱/۳۳ میلی‌متر در روز و در محیط کشت گلخانه متعارف به ترتیب برابر با ۸۷/۶۶ میلی‌متر و ۲/۵۸ میلی‌متر در روز بود.

واژگان کلیدی: آب دریا، بهره‌وری آب، تبخیر-عرق، عملکرد محصول، کشاورزی دریامحور.

The Effect of Air Relative Humidity on the Crop Water Requirement of Basil in the Greenhouse

Abstract

Due to strategic location in the vicinity of the sea, Iran has a unique capacity to benefit from this great potential for development in different fields. In the field of agricultural development in coastal areas, various ideas have been developed in the world, one of the successful examples of which is the coastal greenhouse system. This system, by simulating the hydrological cycle, enables the simultaneous production of crops and freshwater. In this regard, in the present study, by simulating the functional principles of the coastal greenhouse system, a physical modeling of a similar cultivation media was conducted with smart equipment. The main aim of this study is to evaluate the effect of high air relative humidity (more than 80%) on the crop water requirement and crop yield of Basil in greenhouses cultivation media and compare it with the corresponding values in controlled cultivation media with normal relative humidity, such as conventional greenhouse conditions. In this study, plant cultivation was carried out by randomized complete block design in pots, and the crop water requirement were determined using the micro-lysimeter method. By the results, the crop yield by wet weight in the conventional and coastal greenhouse cultivation medias was 15.98 and 15.83, by dry weight was 1.62 and 1.53 grams, respectively. However, the total and average of Basil water requirement during the cultivation period were 45.20 mm and 1.33 mm/day in the coastal greenhouse, and 87.66 mm and 2.58 mm/day in the conventional greenhouse, respectively.

Keywords: Crop Yield, Evapotranspiration, Marine-base Agriculture, Seawater, Water Productivity.

Extended Abstract

Background:

Due to strategic location in the vicinity of the sea, Iran has a unique capacity to benefit from this great potential for development in different fields. The importance and necessity of utilizing the potential capacities of coastal areas has led to the marine-base development being considered at the highest levels of policy-making and planning, which can be reflected in this country's general policies and documents.

The shortage of freshwater resources in the country, in recent years, the attitudes of administrators and decision-makers have been directed towards developing agriculture on the coasts using seawater. In the field of agricultural development in coastal areas, various ideas have been developed in the world so far, one of the successful examples of which is the coastal greenhouse system. This system, by simulating the hydrological cycle and using the seawater desalination approach, enables the simultaneous production of crops and fresh water. In this regard, in the present study, by simulating the functional principles of the coastal greenhouse system, a physical modeling of a similar cultivation media was attempted with smart devices and equipment.

Objective:

The main aim of this study is to evaluate the effect of high air relative humidity (more than 80%) on the crop water requirement and crop yield of Basil in greenhouses cultivation media and compare it with the corresponding values in controlled cultivation media with normal relative humidity, such as conventional greenhouse conditions.

Methods:

The present study was conducted at the research greenhouse complex of the Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University. In this study, the cultivation conditions of the crop similar to the coastal greenhouse system were provided by increasing the air relative humidity to near saturation level using a vaporizer. This greenhouse was equipped with sensors to measure and control the air temperature and relative humidity parameters inside and outside the cultivation media connected to central data-logger devices and other precise measurement equipment. Measurement and recording of atmospheric data including air temperature and relative humidity were carried out continuously and regularly simultaneously in three separate environments including the coastal greenhouse cultivation media, the conventional greenhouse cultivation media, and the open field.

In the present study, the increasing and controlling of the air relative humidity in the coastal greenhouse physical model cultivation media was carried out using an ultrasonic vaporizer. One of the innovations of this research in simulating the atmospheric conditions of the coastal greenhouse cultivation media was the use of an ultrasonic vaporizer, because using of thermal vaporizer equipment to increase water vapor in the air also will affected the air temperature in the coastal greenhouse cultivation media. Since the main aim of this study was to investigate changes in crop water requirement and crop yield in a cultivation media with relative humidity close to saturation (above 80%), this ultrasonic vaporizer device made this aim possible without affecting the air temperature.

Basil is a moisture-loving plant and grows better with high relative humidity. The favorable adaptation of this plant to the climatic conditions of controlled environments is one of the reasons for choosing basil for the present study. This study period included a cultivation period from 27th October to 29th November 2025. The crop water requirement and the amount of water required for each pot were determined using the microlysimeter method, and the volume of irrigation water (the amount of soil moisture deficit to the field capacity limit) was measured and delivered to each one.

Also, to evaluate the crop yield of basil at the end of the cultivation period, some of the crop characteristics including plant height, dry weight, and fresh weight of the plant were measured and calculated in the conventional greenhouse and coastal greenhouse cultivation media.

Results:

According to the methodology of the study, crop cultivation was conducted in two controlled environments, including a conventional greenhouse and a coastal greenhouse cultivation media. The main principles of the coastal greenhouse system were to increase and control the air relative humidity in the crop cultivation media close to the saturation limit (above 80%) and compare it with the corresponding values in the conventional greenhouse cultivation media. Based on the recorded atmospheric parameters and the analysis of variance, the air temperature values in the two cultivation medias were approximately close to each other and no significant difference was observed between the values. While the average air relative humidity in the coastal greenhouse cultivation media was 84 percent, which was about 1.5 times the average air relative humidity in the conventional greenhouse cultivation media (56 percent), and the difference between the daily relative humidity values in these two cultivation medias was significant at the one percent level.

Based on the results, the crop yield by wet weight in the conventional and coastal greenhouse cultivation medias was measured as 15.98 and 15.83 and by dry weight was measured as 1.62 and 1.53 grams, respectively.

The measurement of daily crop water requirement of Basil using the microlysimeter method during the study period of this research. The average daily crop water requirement of Basil during the crop cultivation period was 1.33 mm in the coastal greenhouse cultivation media and 2.58 mm in the conventional greenhouse cultivation media. The highest and lowest daily crop water requirement of Basil during the crop cultivation period were 1.40 and 1.28 mm in the coastal greenhouse cultivation media and 2.80 and 2.32 mm in the conventional greenhouse cultivation media, respectively. In addition, the total crop water requirement of Basil during the crop cultivation period was 45.20 mm in the coastal greenhouse cultivation media and 87.66 mm in the conventional greenhouse cultivation media.

Based on the results, in the present study, by increasing and controlling the air relative humidity in the crop cultivation media (average 84%), the average daily crop water requirement of Basil decreased compared to the conventional greenhouse cultivation media.

Conclusion:

In field of crop yield, no significant difference was observed in the cultivation media in terms of plant fresh and dry weight index, and changes in crop water requirements did not lead to significant differences in crop yield. It was concluded that the average daily crop water requirement of Basil during the crop cultivation period in the coastal greenhouse cultivation media decreased by about 48.5% compared to the conventional greenhouse cultivation media. In other words, it can be said that increasing the air relative humidity in the crop cultivation media by 1.5 times resulted in reducing the crop water requirement of Basil in the coastal greenhouse cultivation media to half the value of this parameter in the conventional greenhouse cultivation media. Accordingly, the efficiency of this system in reducing the crop water requirement was evaluated as very significant.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Data availability statement

All data of this study are available upon request from the authors.

مقدمه

امروزه بحران تأمین آب و امنیت غذایی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی جهان به‌شمار می‌روند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تولید پایدار محصولات کشاورزی مستلزم افزایش بهره‌وری آب یا بهره‌گیری از منابع آب جدید می‌باشد. کشور ایران به دلیل اقلیم خشک و نیمه‌خشک و محدودیت در دسترسی به منابع آب شیرین، به طور جدی‌تری با بحران آب مواجه است. توسعه کشاورزی در چند دهه اخیر سبب بارگذاری بر منابع آب شیرین سطحی و زیرزمینی شده و تخلیه آبخوان‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی گردیده است. به حدی که ناترازی‌های شدید در تأمین نیازهای آبی در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت علاوه بر تعارضات اجتماعی مناطق مختلف، آسیب‌های زیست محیطی متعدد در اغلب مناطق را نیز در پی داشته است.

با این حال، کشور ایران به دلیل موقعیت استراتژیک خود به لحاظ قرارگیری در مجاورت دریا، از ظرفیت منحصر به فردی برای بهره‌مندی از این پتانسیل عظیم جهت توسعه در بخش‌های مختلف برخوردار می‌باشد که در صورت استفاده از این ظرفیت‌ها می‌توان توسعه اقتصادی مبتنی بر ظرفیت‌های دریایی را تضمین کرد. از آنجایی که منابع آب شیرین موجود در کشور به تنهایی جوابگوی نیازهای فعلی و آینده در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک نمی‌باشند، در سال‌های اخیر نگرش‌های متولیان و تصمیم‌گیران به سوی توسعه کشاورزی در سواحل با استفاده از آب دریا سوق داده شده است. اهمیت و ضرورت استفاده از ظرفیت‌های بالقوه مناطق ساحلی باعث شده است تا موضوع توسعه دریامحور در عالی‌ترین سطوح سیاست‌گذاری، تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی مورد توجه قرار گیرد که بازتاب آن را می‌توان در سیاست‌های کلی مشاهده کرد که بر جنبه‌های مختلفی از توسعه دریامحور و استفاده کارآمدتر از ظرفیت‌های مناطق ساحلی و دریایی تأکید شده است. این موارد همگی بیانگر درک عمیق حاکمیت از اهمیت و ضرورت توسعه دریامحور است.

در زمینه توسعه کشاورزی در مناطق ساحلی، تاکنون ایده‌های جدیدی توسعه داده شده که به بررسی راهبردهای پایدار و چالش‌های زیست محیطی این نوع کشاورزی پرداخته‌اند. نمونه‌های موفق از کشاورزی پایدار در مناطق ساحلی در سراسر جهان وجود دارد که نشان می‌دهند با مدیریت صحیح منابع و استفاده از فناوری‌های نوین، می‌توان هم تولید غذا را افزایش داد و هم از محیط زیست محافظت کرد. در این راستا سیستم گلخانه ساحلی یا گلخانه آب شور (SWG) به عنوان رویکردی نوین مطرح شده است که با شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی و استفاده از فرایند نمک‌زدایی، امکان تولید هم‌زمان محصول و آب شیرین را فراهم می‌نماید. (Sablani et al., 2003)

در سیستم گلخانه ساحلی، آب دریا طی فرآیند نمک‌زدایی تبخیر شده و پس از افزایش رطوبت نسبی هوا در محیط کشت محصول، در بخش انتهایی از طریق چگالش، بخار آب موجود در هوا به آب شیرین مایع تبدیل می‌شود. کنترل شرایط خرداقلیمی و به طور خاص افزایش رطوبت نسبی هوا در محیط کشت سیستم گلخانه ساحلی، محیطی برای کشت محصولات مهیا می‌کند که توانایی کاهش تعرق به حداقل میزان را دارا می‌باشد. (Al-Ismaili and Jayasuriya, 2016).

در مطالعه‌ای یک سامانه‌ی نوین با استفاده از فرآیند نمک‌زدایی آب دریا در گلخانه‌های ساحلی مدل‌سازی و ارزیابی گردید و نتایج نشان داد این راهکار می‌تواند بخشی از راه‌حل توسعه کشاورزی در مناطق خشک باشد به طوری که سالانه می‌تواند حدود ۳۳ تا ۸۳ مترمکعب آب را به ازای هر مترمربع از صفحات پوشال، تبخیر و تا حدود ۵/۸ تن نمک در سال به ازای هر مترمربع تولید نماید (Akinaga et al., 2018). در پژوهشی با پیشنهاد و اجرای یک راهکار تلفیقی با عنوان سیستم یکپارچه نوین گلخانه و حوضچه تبخیر آب شور دریافتند که در سیستم یکپارچه پیشنهادی، بهره‌وری مصرف آب در کشت ریحان به طور چشم‌گیری بالاتر از فضای باز بود که مقدار $2/89 \text{ kg/m}^3$ برای محیط کشت سیستم یکپارچه، در مقایسه با $1/14 \text{ kg/m}^3$ در فضای باز گزارش گردید (Ahmadinik et al., 2020). همچنین احمدی نیک و همکاران ۱۳۹۹ اولویت تأثیرگذاری عوامل جوی در فضای باز بر تغییرات پارامترهای جوی در سیستم یکپارچه پیشنهادی را به ترتیب شامل تأثیر دما، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی عنوان کردند. در این مطالعه، به بررسی تبخیر-تعرق مرجع، نیاز آبی گیاه و عملکرد محصول ریحان در سیستم یکپارچه پیشنهادی و مقایسه با فضای باز نیز پرداخته شد. بر اساس

نتایج، متوسط تبخیر-تعرق مرجع در فضای باز در طول دوره مطالعاتی $4/81$ میلیمتر در روز و متوسط تبخیر-تعرق مرجع در سیستم یکپارچه پیشنهادی $2/44$ میلیمتر در روز اندازه‌گیری شده است. همچنین متوسط نیاز آبی گیاه ریحان در طول دوره کشت در فضای باز $3/16$ میلیمتر در روز و متوسط روزانه نیاز آبی گیاه ریحان در سیستم یکپارچه پیشنهادی محصول $2/11$ میلیمتر در روز گزارش گردید. احمدی نیک و همکاران 1398 در مطالعه‌ای دیگر به بررسی تأثیر ابعاد حوضچه بر نیاز آبی گیاه ریحان در سیستم یکپارچه پیشنهادی خود در قالب سه طرح پایلوت با ابعاد متفاوت پرداختند و نتایج تحقیق، معنی‌دار بودن تفاوت نیاز آبی گیاه ریحان در طرح‌های پایلوت را نشان داد. احمدی نیک و همکاران 1399 در مطالعه‌ای دیگر پتانسیل تبخیر در سیستم یکپارچه پیشنهادی خود را ارزیابی نموده و متوسط تبخیر روزانه از حوضچه تبخیر طرح پایلوت سیستم یکپارچه پیشنهادی را $4/5$ میلیمتر در روز گزارش نمودند.

همچنین پژوهشی با هدف طراحی، ساخت و ارزیابی یک گلخانه آب شیرین کن خورشیدی در سواحل مکران و ترکیب فناوری گلخانه ساحلی با یک واحد نوین رطوبت‌زدایی-رطوبت‌زدایی (HDH) انجام شد و نتایج نشان داد که ترکیب گلخانه ساحلی با واحد خورشیدی رطوبت‌زدایی-رطوبت‌زدایی یک روش کارآمد و پایدار برای تولید هم‌زمان آب شیرین و شرایط مطلوب کشت در مناطق گرم و خشک ساحلی است به طوری که میزان ظرفیت تولید حدود 20 تا 80 لیتر بر ساعت در بازه دمای آب دریا 40 تا 65 درجه سانتی‌گراد بود (Zamen et al., 2023). در تحقیقی دیگر توسعه و ارزیابی تجربی یک سیستم رطوبت‌زدایی-رطوبت‌زدایی مجهز به پمپ حرارتی و صفحات چگالش اضافی برای بهبود تولید آب و بهینه‌سازی مصرف انرژی، همراه با مدل‌سازی کامل ترمودینامیکی سیستم را بررسی کردند. نتایج نشان داد، این سیستم قادر به تولید بالای آب شیرین بود. به طوری که در شرایط کاری بهینه حدود $32/75$ کیلوگرم آب مقطر بر مترمربع در روز با مصرف $26/72$ کیلووات‌ساعت در روز تولید شده بود (Sarghini et al., 2024).

مطالعه‌ای با هدف مقایسه مقادیر Kc و تبخیر-تعرق محصول (ETc) بین محصولات مختلف و در میان فاصله دو فصل بهار و پاییز در شرایط گلخانه‌ای مدیترانه‌ای، با استفاده از لایسیمترهای زهکش‌دار اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق محصول و با استفاده از گیاه مرجع برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق مرجع و با سه تکرار برای هر نوع گیاه و گیاه مرجع در جهات مختلف گلخانه انجام شد. نتایج نشان داد مقادیر فصلی تبخیر-تعرق مرجع بین حدود $206/5$ تا $329/1$ میلی‌متر و تبخیر-تعرق محصولات بین $243/6$ تا $529/3$ میلی‌متر بسته به نوع گیاه و فصل می‌باشد (Baştuğ et al., 2024). در پژوهشی ارزیابی توسعه یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری عمیق برای بهینه‌سازی تولید آب شیرین در گلخانه‌های ساحلی بررسی شد. مطابق نتایج، ادغام گلخانه‌های ساحلی با مدل‌های پیش‌بینی دقیق می‌تواند به مدیریت بهینه آب و افزایش کارایی کشاورزی در مناطق ساحلی خشک کمک کند، به طوری که مصرف آب شیرین کشاورزی را تا حدود 90% نسبت به کشت متعارف کاهش و عملکرد محصول را حدود 30% تا 35% نسبت به روش‌های متعارف افزایش می‌دهد (Barzigar et al., 2025).

در طی تحقیقی با هدف توسعه و ارزیابی یک مدل عددی برای فرایند شیرین‌سازی پساب گلخانه‌ها با استفاده از انرژی خورشیدی و بررسی امکان استفاده از تقطیر چند مرحله‌ای برای بازیافت آب و تأمین آب شیرین مورد نیاز گلخانه‌ها، از داده‌های اقلیمی و تابش خورشیدی استان تهران در طول یک سال و همچنین از مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار Aspen HYSYS استفاده شد. نتایج نشان داد تقطیر چند مرحله‌ای می‌تواند پساب گلخانه‌ها را به آب شیرین تبدیل کند، برای گلخانه کوچک (500 متر مربع) با سطح دریافت انرژی تابشی خورشید 37 متر مربع حدود 40 لیتر در ساعت آب شیرین تولید شد و برای گلخانه بزرگ‌تر (2000 متر مربع) با سطح دریافت انرژی تابشی خورشید 148 متر مربع تولید آب به 160 لیتر در ساعت رسید. مطابق نتایج، نیاز انرژی سیستم متناسب با اندازه گلخانه افزایش یافت (Oskouie et al., 2025).

بر این اساس در پژوهش حاضر با الگوبرداری از اصول کار سیستم گلخانه ساحلی که بر مبنای افزایش رطوبت نسبی هوا در محیط کشت محصول به منظور کاهش نیاز آبی گیاه می‌باشد نسبت به مدل‌سازی فیزیکی محیط کشت مشابه این سیستم و ثابت نگه‌داشتن

2. Humidification-Dehumidification
3. Drainage-Type Lysimeters
4. Multi-Effect Distillation

رطوبت نسبی هوای بین ۸۰ تا ۹۰ درصد در کل دوره رشد محصول با بکارگیری دستگاه‌های مختلف از جمله دستگاه بخارساز اولتراسونیک و تجهیزات کنترل دما در محل گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی تربیت مدرس اقدام گردیده است. هدف از این تحقیق، ارزیابی تغییرات نیاز آبی گیاه در محیط کشت محصول با رطوبت نسبی هوا نزدیک به حد اشباع (بالتر از ۸۰ درصد) و مقایسه با مقادیر متناظر آن در محیط‌های کشت کنترل شده با رطوبت نسبی هوای معمول مانند شرایط گلخانه‌های متعارف می‌باشد که در طول یک دوره مطالعاتی کشت گیاه ریحان به آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در محل مجموعه گلخانه تحقیقاتی واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس واقع در شمال غرب شهر تهران به مختصات عرض جغرافیایی ۳۵/۷۴ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱/۱۷ درجه شرقی و ارتفاع از سطح دریا حدود ۱۲۶۵ متر انجام شد. در این پژوهش نسبت به ایجاد شرایط کشت محصول مشابه محیط کشت سیستم گلخانه ساحلی با افزایش رطوبت نسبی هوا در حدود بالاتر از ۸۰ درصد توسط دستگاه بخارساز اولتراسونیک و کنترل شرایط دمایی و تهویه هوا به وسیله تجهیزات اتوماتیک اقدام گردید. این گلخانه به سنسورهای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوای داخل و خارج محیط کشت متصل به دستگاه‌های ثبت داده مرکزی، تجهیزات اندازه‌گیری دقیق حجم آب مصرفی، ترازوی دیجیتال و سایر تجهیزات کنترل دما، رطوبت و تهویه هوا تجهیز گردید. اندازه‌گیری داده‌های دما و رطوبت نسبی هوا در این مجموعه، هر ۱۰ دقیقه توسط سنسورهای مربوطه صورت پذیرفت و توسط دیتالاگر ثبت گردید. اندازه‌گیری و ثبت داده‌های جوی شامل دما و رطوبت نسبی هوا به طور مستمر و منظم به طور همزمان در سه محیط مجزا شامل محیط کشت گلخانه ساحلی، محیط کشت گلخانه متعارف و فضای باز صورت پذیرفت. لازم به ذکر است استفاده از اطلاعات و داده‌های جوی ثبت شده توسط تجهیزات مشابه و به صورت همزمان در هر یک از محیط‌ها، با هدف افزایش دقت در داده‌های واقعی منطقه‌ای و مقایسه‌ها و ارزیابی‌های مورد نیاز در مطالعه مدنظر قرار گرفت.

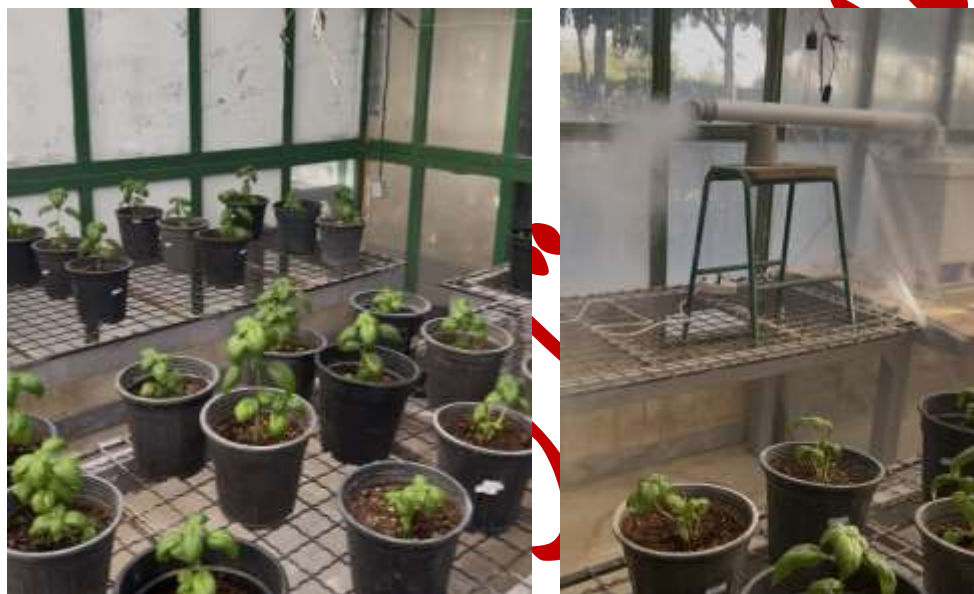
افزایش و کنترل رطوبت نسبی هوا در محیط کشت مدل فیزیکی گلخانه ساحلی در مطالعه حاضر توسط دستگاه بخارساز اولتراسونیک صورت پذیرفت که در شکل ۱ نمایش داده شده است. از نوآوری‌های اجرایی این پژوهش در شبیه‌سازی شرایط جوی محیط کشت گلخانه ساحلی، استفاده از دستگاه بخارساز از نوع اولتراسونیک بود زیرا که استفاده از تجهیزات بخارساز نوع حرارتی جهت تولید و افزایش بخار آب در هوا در محیط کشت گلخانه ساحلی، دمای هوا در این محیط را نیز تحت تأثیر قرار می‌داد. از آنجایی که هدف از این پژوهش بررسی تغییرات نیاز آبی گیاه در محیط کشت با رطوبت نسبی هوا نزدیک به حد اشباع (بالتر از ۸۰ درصد) و مقایسه با مقادیر متناظر آن در محیط‌های کشت کنترل شده معمول مانند شرایط گلخانه‌های متعارف بوده است، دستگاه بخارساز نوع اولتراسونیک، بدون اثرگذاری برای دمای هوای محیط، این هدف را میسر می‌نمود.

گیاه مدنظر برای کشت در پژوهش حاضر، ریحان (*Ocimum basilicum*) از تیره نعنائیان (*Lamiaceae*) بود. ریحان به عنوان یکی از گیاهان عطر و طعم‌دهنده، دارویی و معطر در سراسر جهان شناخته می‌شود. گیاه ریحان به دلیل داشتن اسانس‌های معطر (حاوی ترکیباتی مانند لینالول، اوژنول، متیل‌چاویکول و سینئول) در صنایع غذایی، دارویی، بهداشتی و آرایشی کاربرد گسترده‌ای دارد (Ozcan et al., 2005). در ایران نیز از آن به صورت تازه‌خوری، خشک‌شده و اسانس‌گیری استفاده می‌شود و جزو سبزیجات پرمصرف و صادراتی محسوب می‌گردد. این گیاه گرمادوست است و در مناطق گرمسیر و نیمه گرمسیر به طور طبیعی رشد می‌کند. ریحان جزو گیاهان رطوبت‌دوست است و در محیط‌هایی با رطوبت نسبی بالا رشد بهتری دارد (Labra et al., 2004). سازگاری مطلوب رشد این گیاه با شرایط جوی گلخانه ساحلی و رشد مناسب در محیط‌های تحت کنترل، دوره رشد کوتاه و اقتصادی و پاسخ‌پذیری بالا به تغییرات خرداقلیمی که آن را برای بررسی تخییر-تعرق و کارایی مصرف آب مناسب می‌سازد، از دلایل انتخاب گیاه ریحان برای پژوهش حاضر می‌باشد. دوره مطالعاتی این پژوهش مطابق جدول ۱ از زمان انتقال بوته‌های نشا به گلدان تا زمان برداشت محصول در نظر گرفته شد که دوره کشت آن از اوایل آبان‌ماه تا اوایل آذرماه سال ۱۴۰۴ به طول انجامید.

جدول ۱. مراحل و تاریخ‌های کشت محصول در دوره مطالعاتی

تاریخ	مراحل دوره رشد
۱۴۰۴/۰۷/۲۰	کاشت بذر
۱۴۰۴/۰۸/۰۵	انتقال نشا به گلدان
۱۴۰۴/۰۹/۰۸	برداشت محصول

همانگونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است کشت محصول ریحان در این پژوهش به صورت کشت در گلدان و در دو محیط مجزای کشت شامل محیط کشت گلخانه ساحلی و محیط کشت گلخانه متعارف صورت پذیرفت.



شکل ۱. دستگاه بخارساز و کشت محصول

عملیات آبیاری گیاه در محیط‌های کشت در طول دوره آماری پژوهش حاضر، با هدف تأمین نیاز آبی کامل گیاه، به صورت روزانه و به روش کنترل شده دستی صورت پذیرفت. به گونه‌ای که در پایان هر روز، نیاز آبی محصول و مقدار آب مورد نیاز هر گلدان به روش میکرو لایسیمتر وزنی تعیین گردید و حجم آب آبیاری (مقدار کمبود رطوبت خاک نسبت به حد ظرفیت رزاعی) به صورت اندازه‌گیری شده و با استفاده از ظروف مدرج به هر یک از گلدان‌ها تحویل داده شد و مبنای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری قرار گرفت. همچنین مقادیر آب آبیاری مورد استفاده در هر یک از گلدان‌ها در طول دوره کشت، به صورت منظم روزانه ثبت گردید. تغییرات پارامترهای جوی هوا در محیط کشت محصول تأثیر بسزایی بر تبخیر-تعرق، نیاز آبی و نهایتاً عملکرد گیاه خواهد داشت. با توجه به اینکه رطوبت نسبی هوا بالا در محیط کشت گلخانه مورد مطالعه با شرایط جوی در فضای باز و محیط‌های کشت گلخانه‌ای متعارف، متفاوت خواهد بود لذا در پژوهش حاضر به بررسی عملکرد گیاه در محیط‌های کشت مورد مطالعه پرداخته شد. بر این اساس به منظور بررسی عملکرد گیاه ریحان در این تحقیق، پارامترها و شاخص‌هایی مانند ارتفاع گیاه، وزن تر بوته و وزن خشک بوته که پس از قرارگیری نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت به دست آمد در پایان دوره کشت محصول مورد ارزیابی قرار گرفتند.

لازم به ذکر است با توجه به اینکه حجم آبیاری گلدان‌ها به همان اندازه نیاز آبی گیاه در نظر گرفته شد و خاک مورد استفاده از لحاظ شوری مشکلی نداشت، از مقدار نیاز آبیاری جهت شستشوی املاح صرف نظر گردید. به منظور آبیاری محصول از منبع آب چاه موجود در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس استفاده گردید که مشخصات کیفی آن در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج آنالیز کیفی آب، پارامتر هدایت الکتریکی آب (EC) برابر با ۷۳۱ میکرومهموس بر سانتیمتر و پارامتر نسبت جذب سدیم (SAR) برابر با ۳/۷ تعیین گردید که بر اساس طبقه‌بندی ویل کاکس (Wilcox) برای طبقه‌بندی آب از نظر مصرف کشاورزی در گروه C2-S1 قرار می‌گیرد و جزو آب‌های کمی شور بوده که برای کشاورزی تقریباً مناسب می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات آب مورد استفاده جهت آبیاری محصول

HCO ₃ (mg/l)	S (mg/l)	B (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	N(NO ₃) (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Cl (mg/l)	Na (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	EC (dS/m)	SAR	pH
۱۱۷/۴	۳۸/۵	۰/۲۱	۵/۴	۵/۴	۱۱۵/۳	۶۸	۵۲/۱	۴/۹۰	۶/۸۷	۰/۷۳۱	۳/۷	۸/۱۸

بستر کشت مورد استفاده در گلدان جهت رشد گیاه ریحان در مطالعه حاضر، خاک مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس با بافت سیلتی لوم بود که حدود رطوبتی آن به صورت حجمی در جدول ۳ ارائه گردیده است. برای تهیه بستر کشت محصول، در ابتدا نسبت به ترکیب مناسبی از خاک مورد نظر با مفادیری از ماسه، کود حیوانی و مواد آلی اقدام گردید و پس از آماده‌سازی گلدان‌ها، به مقدار یکسانی از مخلوط خاک استفاده شد و وزن هر یک از گلدان‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری و ثبت شد. مشخصات بستر کشت مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۴ ارائه شده است به نحوی که در تعیین مشخصات شیمیایی خاک، عناصر کم مصرف خاک با استفاده از روش عصاره‌گیری DTPA^۵ (دی‌تیلن تری‌آمین پنتااستیک اسید) اندازه‌گیری شدند. به منظور برنامه‌ریزی آبیاری در دوره کشت محصول در این پژوهش، تعیین حدود رطوبتی خاک از جمله حد اشباع (S)، حد ظرفیت زراعی (FC) و حد نقطه پژمردگی (PWP) با استفاده از دستگاه صفحات فشاری صورت گرفت و حد ظرفیت زراعی (FC) در فشار ۰/۳ بار و حد نقطه پژمردگی (PWP) در فشار ۱۵ بار تعیین گردید.

جدول ۳. بافت و حدود رطوبتی خاک

Soil texture	ρ_b (g/cm ³)	θ_s (%)	θ_{fc} (%)	θ_{pwp} (%)
Silty loam	۱/۱۵	۴۹/۸۸	۲۵/۹۹	۱۲/۴۲

جدول ۴. مشخصات شیمیایی خاک

pH	EC (Micromhos/cm)	Total N (%)	N-No3- (Kg/ha)	S-So4 (mg/kg)	Available P (mg/kg)	Available K (mg/kg)	Available Fe (mg/kg)	Available Mn (mg/kg)	Available Cu (mg/kg)	Available Zn (mg/kg)	OC (%)
۸/۶	۱/۳۲	۰/۰۵	۶۲/۱۱	۱۶	۱۲/۶۳	۱۹۴	۱۰	۱۵	۱	۳	۰/۲۸

در پژوهش حاضر، به منظور شناسایی میزان ارتباط و روابط بین پارامترهای جوی اندازه‌گیری شده در فضای باز، محیط کشت گلخانه متعارف و محیط کشت گلخانه ساحلی و بررسی تأثیرپذیری پارامترها از یکدیگر و همچنین ارزیابی تغییرات و معنی‌دار بودن اختلاف مقادیر نیاز آبی گیاه در محیط‌های کشت مورد مطالعه از آنالیز همبستگی و تحلیل واریانس در محیط نرم افزار SAS استفاده گردید. تحلیل همبستگی ابزاری است آماری که بوسیله آن می‌توان درجه‌ای را که یک متغیر به متغیر دیگر وابسته است را اندازه‌گیری نمود. ضریب همبستگی^۶ (R)، یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی دو متغیر است و ابزاری آماری برای تعیین شدت و نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر می‌باشد.

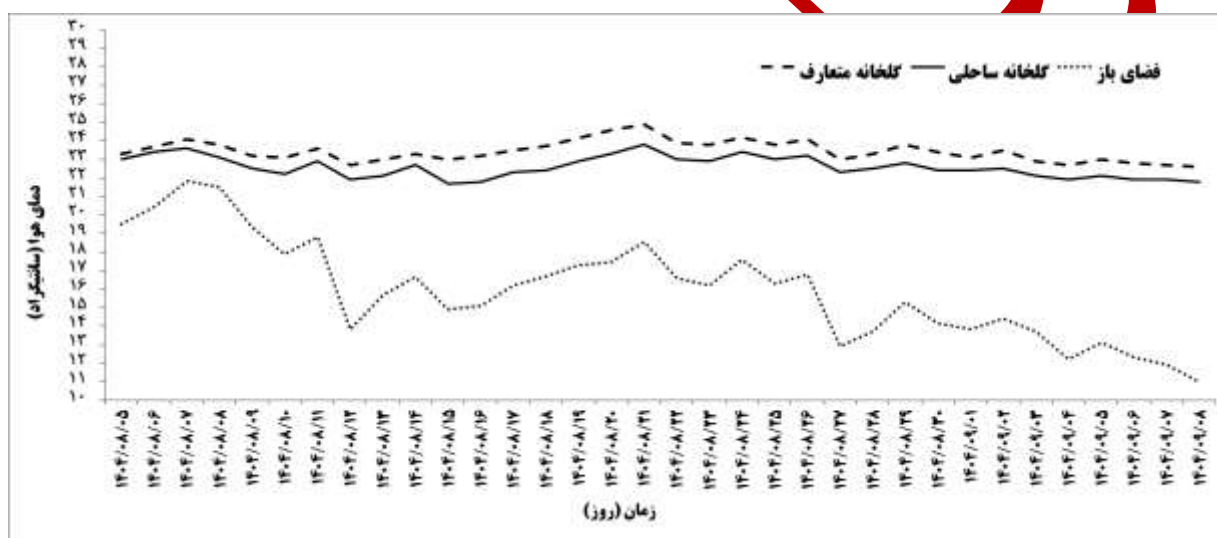
5. Diethylenetriaminepentaacetic Acid

6. Correlation coefficient

آنالیز واریانس^۷ مجموعه‌ای از مدل‌های آماری است که به بررسی میانگین در گروه‌ها و توابع وابسته به آنها (مثل واریانس در یک گروه یا بین چند گروه) می‌پردازد. به بیانی دیگر آنالیز واریانس آزمون آماری را فراهم می‌نماید که برابری میانگین‌های گروه‌های متفاوت را مورد بررسی قرار داده و در نتیجه، معنی‌دار بودن این تفاوت را در سطح‌های مختلف بیان می‌کند. چنانچه تحلیل واریانس بر اساس مشاهداتی صورت گیرد که بر مبنای معیار واحد (برای مثال تأثیر رطوبت نسبی هوا در محیط کشت بر نیاز آبی گیاه) طبقه‌بندی شوند آن را تحلیل واریانس یک‌عامله گویند.

یافته‌های پژوهش

تغییرات دمای هوای روزانه ثبت شده در طول دوره کشت محصول در فضای باز، محیط کشت گلخانه متعارف و محیط کشت گلخانه ساحلی در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. نمودار تغییرات روزانه دمای هوا در دوره کشت محصول

همانگونه که در جدول ۵ نیز مشاهده می‌گردد دمای هوای روزانه در فضای باز در طول دوره کشت (از تاریخ ۱۴۰۴/۰۸/۰۵ تا تاریخ ۱۴۰۴/۰۹/۰۸) به دلیل تغییرات آب و هوایی از مقدار مینیمم ۱۱ درجه سانتیگراد تا مقدار ۲۲ درجه سانتیگراد متغیر بوده است. در فضای باز میانگین دما ۱۵/۹۹ درجه سانتیگراد، انحراف معیار ۲/۷۵ و ضریب تغییرات ۱۷/۲۴ درصد ثبت گردیده است. این شرایط نشان‌دهنده یک رژیم حرارتی کاملاً متفاوت است که دامنه تغییرات دمایی آن حدود ۱۱ درجه سانتیگراد می‌باشد.

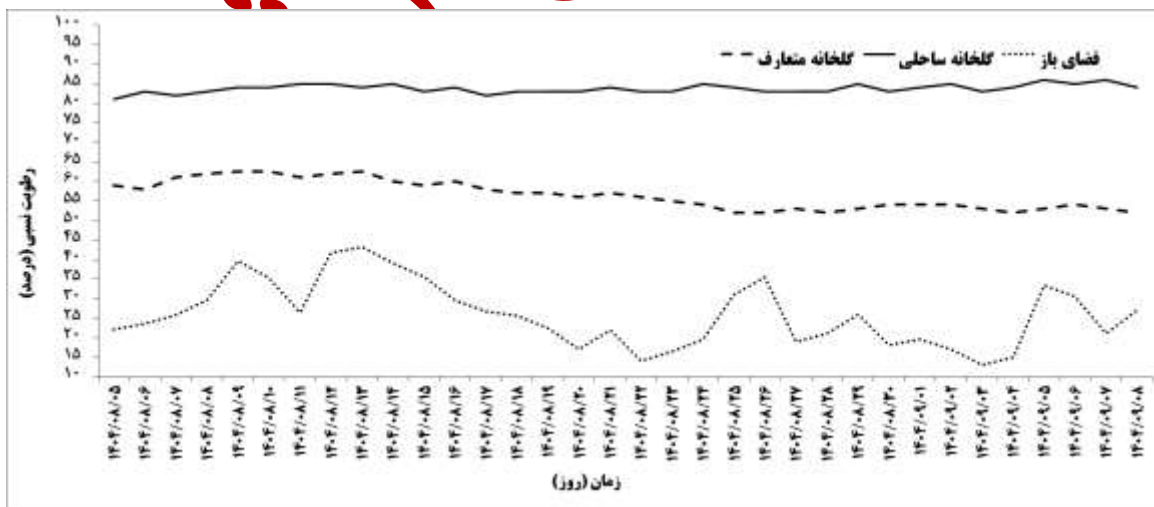
جدول ۵. آمار داده‌های ثبت شده دمای هوا در فضای باز، محیط کشت گلخانه ساحلی و محیط کشت گلخانه متعارف

Type of Media	N	Mean	SD	Min	Max	Median	CV (%)
Conventional Greenhouse	۳۴	۲۳/۴۵۵	۰/۵۶۶	۲۲/۶	۲۴/۹	۲۳/۳۵	۲/۴۱
Costal Greenhouse	۳۴	۲۲/۵۷۹	۰/۵۷۵	۲۱/۷	۲۳/۸	۲۲/۵	۲/۵۴
Open Field	۳۴	۱۵/۹۹	۲/۷۵۷	۱۱	۲۱/۸۵	۱۶/۲	۱۷/۲۴

از آنجایی که یکی از اهداف کشت محصول در محیط‌های کنترل شده همچون گلخانه، کنترل نوسانات دمایی هوا متناسب با گیاه تحت کشت می‌باشد در طول پژوهش حاضر با استفاده از سنسورهای دمایی و تجهیزات گرمایشی نسبت به کنترل دمای هوا در هر دو محیط کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی اقدام گردید. با توجه به خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه ریحان (Labra et al., 2004)، متوسط دمای هوا در طول دوره کشت، در محیط‌های کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی حدوداً نزدیک به هم تنظیم گردید. به نحوی که ماکزیمم و مینیمم دمای هوا در طول دوره کشت محصول به ترتیب، در محیط کشت گلخانه متعارف برابر با ۲۵ و ۲۳ درجه سانتیگراد و در محیط کشت گلخانه ساحلی برابر با ۲۵ و ۲۲ درجه سانتیگراد بود. در گلخانه متعارف میانگین دما برابر ۲۳/۴۵ درجه سانتیگراد با انحراف معیار ۰/۵۶ و ضریب تغییرات ۲/۴۱ درصد نشان‌دهنده یک محیط حرارتی پایدار و به‌خوبی کنترل شده می‌باشد. در گلخانه ساحلی نیز میانگین دما برابر ۲۲/۵۷ درجه سانتیگراد، انحراف معیار ۰/۵۷ و ضریب تغییرات ۲/۵۴ درصد است که از نظر تنظیم دما عملکردی مشابه گلخانه متعارف دارد.

در تحلیل داده‌های دمایی می‌توان گفت در فضای باز تغییرات دمایی ناشی از تأثیر مستقیم چرخه‌های شبانه‌روزی و فصلی می‌تواند خطرات تنش سرمایی و کاهش فعالیت انزیمی و نهایتاً کاهش عملکرد محصول را در پی داشته باشد. در حالی که محیط کشت در هر دو گلخانه، تقریباً دارای شرایط هم‌دما (near-isothermal) بوده که منجر به کاهش تنش حرارتی در گیاه می‌شود و فرآیندهای متابولیکی گیاه مانند فتوسنتز و تعرق را پشتیبانی می‌کند. ضریب تغییرات دمایی کم در هر دو محیط نشان می‌دهد هر دو سیستم، پایداری حرارتی مشابهی داشته که این سطح از پایداری از نظر کشاورزی اهمیت دارد. زیرا بیشتر محصولات فصل گرم در محدوده‌ای حدود چند درجه سانتیگراد حول دمای بهینه رشد خود، بیشترین فعالیت متابولیکی را خواهند داشت.

همانگونه که در شکل ۳ و جدول ۶ ارائه شده است بر اساس تغییرات آب و هوایی منطقه و داده‌های جوی ثبت شده در طول دوره کشت محصول، میانگین رطوبت نسبی هوا در فضای باز برابر با ۲۵/۹۵ درصد و ماکزیمم و مینیمم رطوبت نسبی هوا به ترتیب، برابر با ۴۳ و ۱۳ درصد بود. همچنین انحراف معیار ۸/۳۲ و ضریب تغییرات ۳۲/۰۵ درصد می‌باشد که به لحاظ رطوبتی، این شرایط خشک‌ترین و متغیرترین محیط است. این در حالی است که میانگین رطوبت نسبی هوا در محیط کشت گلخانه متعارف برابر با ۵۶/۴۸ درصد و ماکزیمم و مینیمم رطوبت نسبی هوا به ترتیب، برابر با ۶۲ و ۵۲ تنظیم گردید. همچنین انحراف معیار ۳/۶۹ و ضریب تغییرات ۶/۵۲ درصد است. این دامنه تغییرات برای رشد اکثر محصولات قابل قبول است و این مقدار نشان‌دهنده نوسان متوسط است.



شکل ۳. نمودار تغییرات رطوبت نسبی هوا در دوره کشت محصول

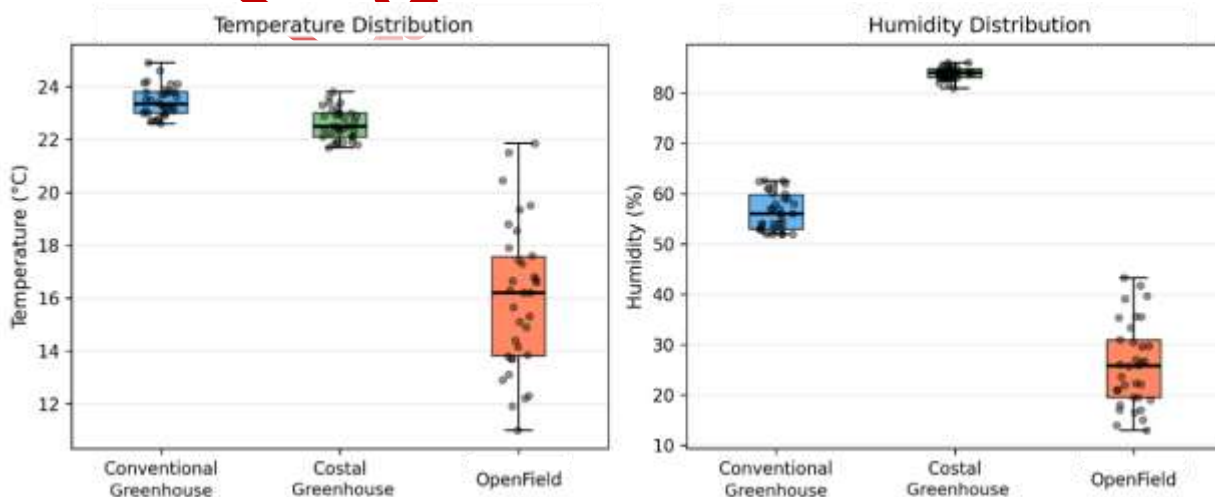
همانگونه که اشاره شد با توجه به نحوه کارکرد سیستم گلخانه ساحلی رطوبت نسبی هوا در محیط کشت محصول می‌بایست در حد بالاتری در محیط‌های کشت معمول همچون فضای باز و گلخانه‌های متعارف باشد. بر این اساس در پژوهش حاضر، میانگین رطوبت نسبی هوا در محیط کشت گلخانه ساحلی در حد بسیار بالاتری نسبت به سایر محیط‌ها تنظیم گردید به حدی که میانگین رطوبت نسبی هوا در محیط کشت گلخانه ساحلی تا ۸۳/۷۴ درصد افزایش داده شد و نوسانات رطوبتی هوای روزانه در این محیط از حد ماکزیمم و مینیمم ۸۶ و ۸۱ درصد تجاوز ننموده است. همچنین در این مقادیر، انحراف معیار ۱/۱۴ و ضریب تغییرات ۱/۳۶ درصد می‌باشد که این محیط پایدارترین و مرطوب‌ترین شرایط را در بین سایر محیط‌ها دارد.

جدول ۶- آمار داده‌های ثبت شده رطوبت نسبی هوا در فضای باز، محیط کشت گلخانه ساحلی و محیط کشت گلخانه متعارف

Type of Media	N	Mean	SD	Min	Max	Median	CV (%)
Conventional Greenhouse	۳۴	۵۶/۴۸۶	۳/۶۸۵	۵۲	۶۲/۵۲	۵۶	۶/۵۲
Costal Greenhouse	۳۴	۸۳/۷۳۵	۱/۱۳۶	۸۱	۸۶	۸۴	۱/۳۶
Open Field	۳۴	۲۵/۹۵۷	۸/۳۱۹	۱۳	۴۳/۲۷	۲۵/۷۶	۳۲/۰۵

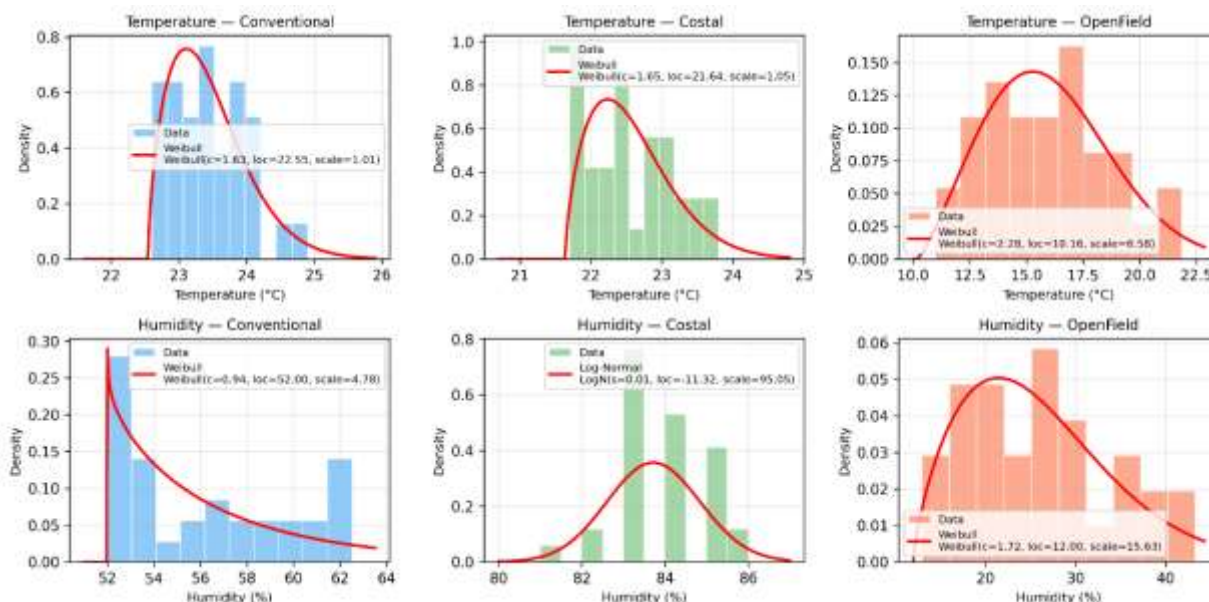
آنالیز داده‌های رطوبتی نشان می‌دهد تغییرات رطوبتی بسیار بالا در فضای باز، نشان‌دهنده وابستگی کامل به شرایط جوی است و مقدار رطوبت بسیار پایین در حداقل میزان (۱۳ درصد) می‌تواند باعث تنش شدید خشکی، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز در گیاه شود. در محیط کشت گلخانه متعارف، رطوبت در محدوده قابل قبول فیزیولوژیکی نوسان نموده و برای جلوگیری از تنش موضعی رطوبتی نیاز به مدیریت فعال دارد. ضریب تغییرات بسیار پایین در محیط کشت گلخانه ساحلی نیز نشان‌دهنده شرایط تقریباً ثابت اشباع رطوبتی ناشی از بکارگیری دستگاه بخار ساز برای افزایش بخار آب در هوای محیط کشت گلخانه ساحلی می‌باشد.

مطابق داده‌های روزانه ثبت شده توسط تجهیزات مورد استفاده در تحقیق حاضر، میانگین رطوبت نسبی هوا در طول دوره کشت محصول در محیط کشت سیستم گلخانه ساحلی حدود ۳/۳۶ برابر نسبت به میانگین رطوبت نسبی هوا در فضای باز و حدود ۱/۴۸ برابر نسبت به میانگین رطوبت نسبی هوا در محیط کشت گلخانه متعارف افزایش داده شد. تحلیل پارامترهای جوی نشان می‌دهد گلخانه ساحلی با رطوبت نسبی بالا و دمای مناسب و پایدار، شرایط منحصر بفردی را ایجاد کرده که آن را از گلخانه متعارف متمایز می‌نماید. در شکل ۴ نمودار توزیع میله‌ای و تابع برازندگی توزیع داده‌های دما و رطوبت نسبی هوا در سه محیط مختلف شامل فضای باز، گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی نمایش داده شده است.



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای دمای هوا و رطوبت نسبی هوا در فضای باز، محیط کشت گلخانه ساحلی و محیط کشت گلخانه متعارف

همانگونه که در شکل ۵ و جدول ۷ مشاهده می‌شود در بررسی برازش توزیع داده‌ها، اغلب پارامترها در سه محیط مورد بررسی، به‌طور کلی توسط توزیع ویبول Weibull به‌عنوان بهترین برازش توصیف شدند. به جز توزیع داده رطوبت نسبی در گلخانه ساحلی که توزیع لگ-نرمال بهترین برازش را برای آن نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار توزیع میله‌ای و تابع برازندگی توزیع داده‌های دما و رطوبت نسبی هوا در فضای باز، گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی

جدول ۷. نتایج برازش توزیع داده‌ها برای متغیرهای دما و رطوبت نسبی هوا در فضای باز، گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی

Variable	Type of Media	Best Fit	Equation
Temperature	Conventional Greenhouse	Weibull	Weibull(c=1.63, loc=22.55, scale=1.01)
Temperature	Coastal Greenhouse	Weibull	Weibull(c=1.65, loc=21.64, scale=1.05)
Temperature	Open Field	Weibull	Weibull(c=2.28, loc=10.16, scale=6.58)
Relative Humidity	Conventional Greenhouse	Weibull	Weibull(c=0.94, loc=52.00, scale=4.78)
Relative Humidity	Coastal Greenhouse	Log-Normal	LogN(s=0.01, loc=-11.32, scale=95.05)
Relative Humidity	Open Field	Weibull	Weibull(c=1.72, loc=12.00, scale=15.63)

مطابق جدول ۸ آزمون نرمال بودن Shapiro-Wilk نشان داد فرض نرمال بودن برای داده‌های دمای هوا در هر سه محیط برقرار است و امکان استفاده از تحلیل‌های آماری پارامتریک وجود دارد. در مقابل، داده‌های رطوبت نسبی هوا برای فضای باز دارای توزیع نرمال بود در حالی که در گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی فرض نرمال بودن برای این محیط‌ها رد شد. این الگوی ترکیبی نشان داد که رفتار آماری داده‌های رطوبت نسبی هوا در محیط‌های کنترل شده از یک‌نواختی کمتری برخوردار است و دچار انحراف از توزیع نرمال می‌باشد. لذا نیازمند استفاده از روش‌های ناپارامتریک برای مقایسه‌های آماری هستند تا از صحت و پایداری نتایج اطمینان حاصل شود.

جدول ۸. نتایج آزمون نرمال بودن Shapiro-Wilk برای داده‌های دما و رطوبت نسبی هوا در فضای باز، گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی

Type of Media	Variable	Shapiro-Wilk W	p-value	Normal ($\alpha=0.05$)
Conventional Greenhouse	Temperature	۰/۹۵۹۴	۰/۲۳۳	Yes

Costal Greenhouse	Temperature	۰/۹۵۷۵	۰/۲۰۵۶	Yes
Open Field	Temperature	۰/۹۷۹۷	۰/۷۶۴	Yes
Type of Media	Relative Humidity	۰/۸۹۵۱	۰/۰۰۳۴	No
Conventional Greenhouse	Relative Humidity	۰/۹۲۰۷	۰/۰۱۷	No
Costal Greenhouse	Relative Humidity	۰/۹۵۸۰	۰/۲۱۳	Yes

در جدول ۹ با بررسی پارامتر دما و رطوبت نسبی هوا در هر یک از محیطها، نتایج بدین صورت بود که برای پارامتر دمای هوا، سطح معنی داری با آزمون تحلیل واریانس یک طرفه (ANOVA) تقریباً صفر ($p \approx 0$) بود. این نتیجه توسط آزمون ناپارامتریک-Kruskal-Wallis نیز تأیید شد. همگرایی نتایج هر دو روش نشان می‌دهد که محیط اثر بسیار معناداری بر دما دارد و تفاوت‌های مشاهده شده بین گروه‌ها از نظر آماری کاملاً معنی دار هستند. برای پارامتر رطوبت نسبی هوا نیز سطح معنی داری با آزمون ANOVA و آزمون Kruskal-Wallis تقریباً صفر ($p \approx 0$) بود. مقدار بسیار بالای F نشان‌دهنده اندازه اثر بسیار قوی است، به طوری که نوع محیط به‌عنوان عامل غالب در تغییرات رطوبت عمل می‌کند. هم‌خوانی نتایج پارامتریک و ناپارامتریک، علی‌رغم نقض نرمال بودن در برخی گروه‌ها، استحکام این نتیجه را تقویت می‌کند.

جدول ۹. نتایج آزمون‌های ANOVA یک طرفه و Kruskal-Wallis برای مقایسه داده‌های دما و رطوبت نسبی هوا

Variable	ANOVA F	ANOVA p	ANOVA sig	Kruskal H	Kruskal p	Kruskal sig
Temperature	205.9255	.	Yes	۷۸/۴۶۱۳	.	Yes
Relative Humidity	1013.532	.	Yes	۹۰/۱۰۰۲	.	Yes

بر اساس جدول ۱۰ در مقایسه‌های پس از آزمون (Post-Hoc) با آزمون Tukey HSD، تمام مقایسه‌های زوجی برای پارامتر دمای هوا معنادار بودند. به طوری که بیشترین اختلاف بین گلخانه متعارف و فضای باز با $\Delta x^- = 7.47^\circ\text{C}$ مشاهده شد و پس از آن اختلاف گلخانه ساحلی و فضای باز با $\Delta x^- = 6.59^\circ\text{C}$ بود. در حالی که اختلاف بین دو نوع گلخانه ساحلی و گلخانه متعارف با $\Delta x^- = 0.88^\circ\text{C}$ کمتر از سایر مقایسه‌ها بود اما همچنان به صورت معنی دار بود. برای پارامتر رطوبت نسبی هوا نیز تمام مقایسه‌های زوجی دارای اختلاف بسیار معنی دار بودند که بیشترین تفاوت مربوط به گلخانه ساحلی و فضای باز با $\Delta x^- = 57.78\%$ بود. همچنین اختلاف بین گلخانه متعارف و فضای باز نیز زیاد $\Delta x^- = 30.53\%$ بود. در حالی که اختلاف بین گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی برابر با $\Delta x^- = 27.25\%$ بود که نشان می‌دهد گلخانه ساحلی به‌طور قابل توجهی رطوبت بالاتری نسبت به گلخانه متعارف فراهم می‌نماید.

جدول ۱۰. نتایج آزمون Tukey HSD برای مقایسه‌های زوجی دما و رطوبت نسبی هوا

Variable	Group1	Group2	Mean Diff	q-stat	p-value (approx)	Significant
Temperature	Conventional Greenhouse	Costal Greenhouse	۰/۸۷۵۳	۳/۰۷۸	۰/۰۳۱۹	Yes
Temperature	Conventional Greenhouse	Open Field	۷/۴۶۵	۲۶/۲۵۰۸	.	Yes
Temperature	Costal Greenhouse	Open Field	۶/۵۸۹۷	۲۳/۱۷۲۸	.	Yes
Relative Humidity	Conventional Greenhouse	Costal Greenhouse	-۲۷/۲۴۸۸	۳۰/۰۱۲۴	.	Yes
Relative Humidity	Conventional Greenhouse	Open Field	۳۰/۵۲۹۱	۳۳/۶۲۵۴	.	Yes
Relative Humidity	Costal Greenhouse	Open Field	۵۷/۷۷۷۹	۶۳/۶۳۷۹	.	Yes

مطابق جدول ۱۱ در آزمون Mann-Whitney U، تمام مقایسه‌های زوجی برای هر دو پارامتر دما و رطوبت نسبی هوا از نظر آماری معنی‌دار بودند. نکته قابل توجه این است که در مقایسه رطوبت بین گلخانه متعارف و ساحلی مقدار $U = 0$ به دست آمد، که حداقل مقدار نظری این آماره است. این نتیجه به این معناست که تمام مقادیر رطوبت در گلخانه ساحلی از تمام مقادیر گلخانه متعارف بیشتر بوده‌اند، که نشان‌دهنده یک تفکیک کامل و بسیار قوی بین دو گروه است و اهمیت عملی آن فراتر از صرفاً معنی‌داری آماری است.

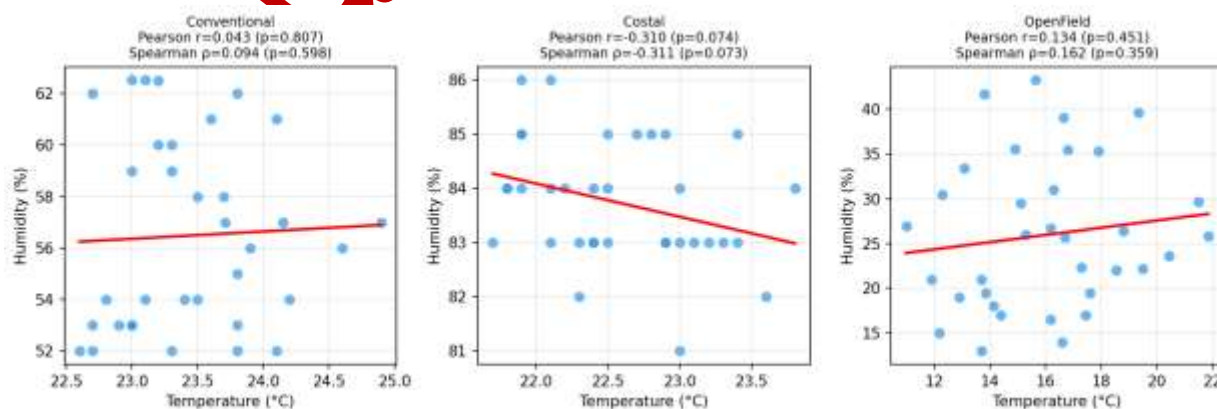
جدول ۱۱. نتایج آزمون Mann-Whitney U برای مقایسه‌های زوجی دما و رطوبت نسبی هوا در فضای باز، گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی

Variable	Group1	Group2	Mann-Whitney U	p-value	Significant
Temperature	Conventional Greenhouse	Costal Greenhouse	۹۸۸/۵	.	Yes
Temperature	Conventional Greenhouse	Open Field	۱۱۵۶	.	Yes
Temperature	Costal Greenhouse	Open Field	۱۱۵۳	.	Yes
Relative Humidity	Conventional Greenhouse	Costal Greenhouse	.	.	Yes
Relative Humidity	Conventional Greenhouse	Open Field	۱۱۵۶	.	Yes
Relative Humidity	Costal Greenhouse	Open Field	۱۱۵۶	.	Yes

در بررسی همبستگی پارامترهای دما و رطوبت نسبی هوا در هر یک از محیط‌ها به صورت جداگانه در جدول ۱۲ و شکل ۶ نتایج نشان داد در هیچ یک از محیط‌ها، همبستگی معناداری بین تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا وجود ندارد. ارتباط این دو پارامتر در گلخانه ساحلی، قوی‌ترین ارتباط بود که به صورت معکوس ($r = -0.310$) می‌باشد که این رابطه از نظر آماری تنها در سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ به مرز معناداری رسید ولی آن را عبور نکرد ($p = 0.074$). در گلخانه متعارف و فضای باز هیچ الگوی همبستگی معناداری مشاهده نشد. به طور کلی، دما و رطوبت در هر محیط به‌عنوان متغیرهایی مستقل رفتار می‌کنند و رابطه خطی یا یکنواخت معناداری بین آن‌ها وجود ندارد زیرا تحت کنترل سازوکارهای مدیریتی و طبیعی متفاوتی قرار دارند.

جدول ۱۲. ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن بین دما و رطوبت نسبی هوا در فضای باز، گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی

Type of Media	Pearson r	Pearson p	Spearman r	Spearman p	Pearson sig	Spearman sig	Significant ($\alpha=0.05$)
Conventional Greenhouse	۰/۰۴۳۵	۰/۸۰۷۱	۰/۰۹۲۷	۰/۵۹۸۱	No	No	No
Costal Greenhouse	۰/۳۱۰۲	۰/۰۷۴۱	۰/۳۱۱۲	۰/۰۷۳۲	No	No	No
Open Field	۰/۱۳۳۸	۰/۴۵۰۶	۰/۱۶۲۴	۰/۳۵۸۸	No	No	No



شکل ۶. نمودار پراکنش و ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن و رابطه بین دما و رطوبت نسبی هوا در فضای باز، گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت نوع گلخانه به لحاظ نوع مدیریت و کنترل شرایط جوی یک عامل آماری غالب برای هر دو متغیر دمای هوا ($F = 205.93$) و رطوبت نسبی هوا ($F = 1013.53$) محسوب می‌شود. گلخانه ساحلی پایدارترین و مرطوب‌ترین شرایط جوی را فراهم می‌کنند و گلخانه متعارف پایداری حرارتی همراه با رطوبت متوسط ارائه می‌دهند. شرایط فضای باز با دمای پایین‌تر، تغییرپذیری بالا و کاهش سریع فصلی در هر دو متغیر مشخص می‌شود. عدم وجود همبستگی بین دما و رطوبت نسبی هوا در هیچ‌یک از محیط‌ها نشان می‌دهد که این دو متغیر تحت مکانیسم‌های کنترلی مستقل عمل می‌کنند. روندهای زمانی نشان می‌دهد که دوره مطالعه یک گذار فصلی فعال را ثبت کرده است که در فضای باز و گلخانه متعارف شدیدتر بوده است، در حالی که رطوبت در گلخانه ساحلی به‌طور منحصربه‌فردی افزایش یافته است.

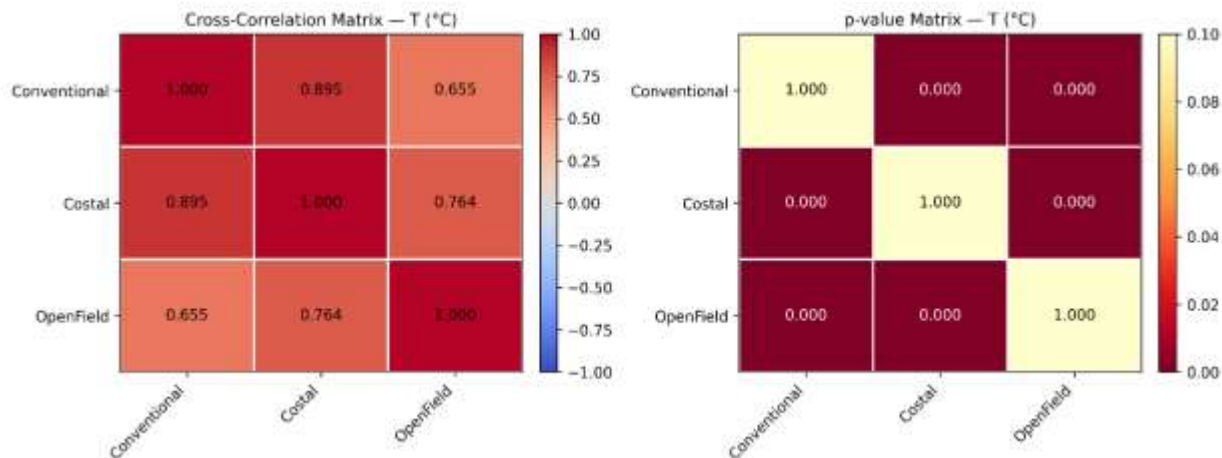
به منظور تحلیل همبستگی و رابطه پارامترهای اقلیمی دما و رطوبت نسبی در هر یک از محیط‌ها، تحلیل‌های همبستگی پیرسون و اسپیرمن مطابق جدول ۱۲ نشان داد که رابطه بین دما و رطوبت نسبی هوا در هر سه نوع گلخانه از نظر آماری معنی‌دار نیست. در گلخانه متعارف، یک همبستگی ضعیف مثبت مشاهده شد در حالی که گلخانه ساحلی یک رابطه ضعیف منفی نشان داد و محیط فضای باز نیز یک همبستگی مثبت ناچیز را نشان داد. ضرایب اسپیرمن نیز از نظر جهت و مقدار با ضرایب پیرسون سازگار بودند و تأیید کردند که عدم وجود رابطه معنادار بین دما و رطوبت نسبی هوا ناشی از فرضیات توزیعی یا داده‌های پرت نیست.

در بررسی همبستگی پارامتر دمای هوا در بین محیط‌های مختلف مطابق جدول ۱۳ و شکل ۷، تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد که بین هر سه محیط، روابط مثبت قوی و از نظر آماری معنی‌دار وجود دارد. بیشترین هم‌زمانی به ترتیب بین گلخانه متعارف-گلخانه ساحلی، سپس گلخانه ساحلی-فضای باز و در نهایت گلخانه متعارف-فضای باز مشاهده می‌شود. همبستگی‌های بالا و معنادار در بین تمام محیط‌ها نشان می‌دهد که رژیم حرارتی هر سه محیط عمدتاً تحت تأثیر یک نیروی اقلیمی مشترک، یعنی چرخه دمای محیط بیرونی منطقه قرار دارد. مقدار ضریب همبستگی بالاتر دمای هوا بین گلخانه‌ها به دلیل محصور بودن و ظرفیت بالا در تعدیل نوسانات دمای بیرونی می‌باشد. در حالی که فضای باز به‌طور مستقیم‌تری به شرایط محیطی پاسخ می‌دهد و بنابراین واگرایی بیشتری با سیستم‌های محصور دارد.

جدول ۱۳. ضرایب همبستگی پیرسون بین انواع محیط‌ها برای متغیر دما هوا همراه با سطح معنی‌داری و نتیجه آزمون در $\alpha = 0.05$

Variable	Group_1	Group_2	Pearson_r	p_value	Significant ($\alpha=0.05$)
Temperature	Conventional Greenhouse	Costal Greenhouse	۰/۸۹۵۲	.	Yes
Temperature	Conventional Greenhouse	Open Field	۰/۶۵۵۱	.	Yes
Temperature	Costal Greenhouse	Conventional Greenhouse	۰/۸۹۵۲	.	Yes
Temperature	Costal Greenhouse	Open Field	۰/۷۶۴	.	Yes
Temperature	Open Field	Conventional Greenhouse	۰/۶۵۵۱	.	Yes
Temperature	Open Field	Costal Greenhouse	۰/۷۶۴	.	Yes

شکل ۷. ماتریس همبستگی پیرسون و سطح معنی‌داری آماری (P-VALUE) برای داده‌های دمای هوا در بین انواع محیط‌ها



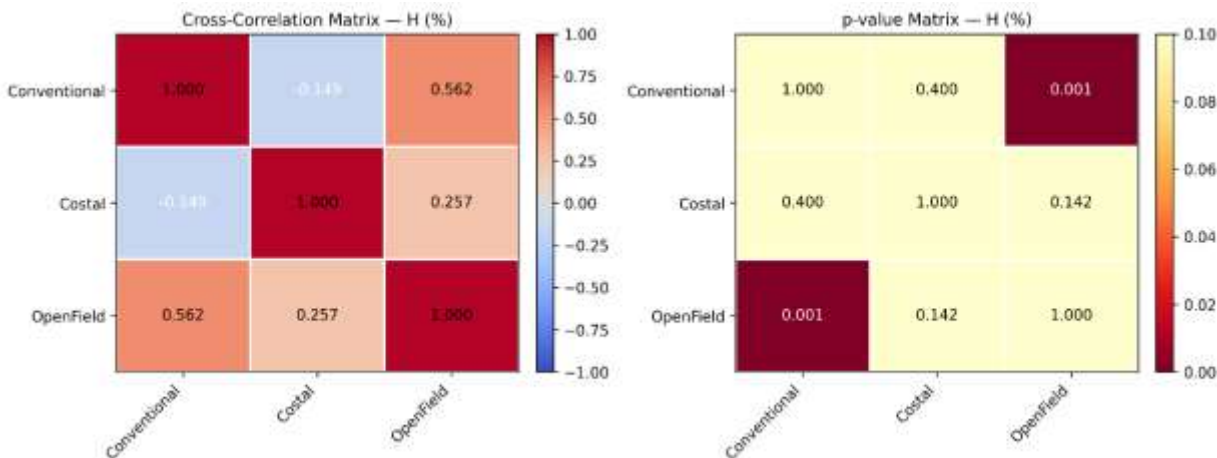
همانگونه که در جدول ۱۴ و شکل ۸ مشاهده می‌شود همبستگی پارامتر رطوبت نسبی هوا در بین محیط‌های مختلف برخلاف پارامتر دمای هوا، دارای ساختار همبستگی ناهمگون و عمدتاً غیرمعنی‌دار است. تنها رابطه معنی‌دار بین گلخانه متعارف-فضای باز مشاهده می‌شود. در حالی که بین گلخانه ساحلی-گلخانه متعارف یک همبستگی منفی ضعیف و غیرمعنی‌دار وجود دارد و بین گلخانه ساحلی-فضای باز نیز یک رابطه مثبت ضعیف و غیرمعنی‌دار مشاهده می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده واگرایی بنیادی در کنترل رطوبت بین گلخانه ساحلی و دو محیط دیگر است. همبستگی منفی و غیرمعنی‌دار بین گلخانه ساحلی و گلخانه متعارف نشان می‌دهد که کنترل رطوبت در گلخانه ساحلی تا حد زیادی مستقل و گاهی معکوس نسبت به گلخانه متعارف عمل می‌کند که بیانگر تفاوت ساختاری در نحوه مدیریت رطوبت است.

تفاوت شدید بین همبستگی‌های قوی دما و همبستگی‌های مقطعی رطوبت، در مدل‌سازی شرایط جوی اهمیت بالایی دارد. این نتایج نشان می‌دهد که در حالی که دما را می‌توان تا حد زیادی با یک محرک اقلیمی منطقه‌ای واحد تقریب زد، اما رطوبت نسبی هوا باید به‌صورت مستقل برای هر سیستم مدل‌سازی شود، به‌ویژه در گلخانه ساحلی که رژیم رطوبتی آن کاملاً مجزا می‌باشد.

جدول ۱۴. ضرایب همبستگی پیرسون بین انواع محیط‌ها برای متغیر رطوبت نسبی هوا همراه با سطح معنی‌داری و نتیجه آزمون در $\alpha = 0.05$

Variable	Group_1	Group_2	Pearson_r	p_value	Significant ($\alpha=0.05$)
Relative Humidity	Conventional Greenhouse	Costal Greenhouse	-۰/۱۴۹۲	۰/۳۹۹۷	No
Relative Humidity	Conventional Greenhouse	Open Field	۰/۵۶۱۹	۰/۰۰۰۵	Yes
Relative Humidity	Costal Greenhouse	Conventional Greenhouse	-۰/۱۴۹۲	۰/۳۹۹۷	No
Relative Humidity	Costal Greenhouse	Open Field	۰/۲۶۵۹	۰/۱۴۲۴	No
Relative Humidity	Open Field	Conventional Greenhouse	۰/۵۶۱۹	۰/۰۰۰۵	Yes
Relative Humidity	OpenField	Costal	۰/۲۶۵۹	۰/۱۴۲۴	No

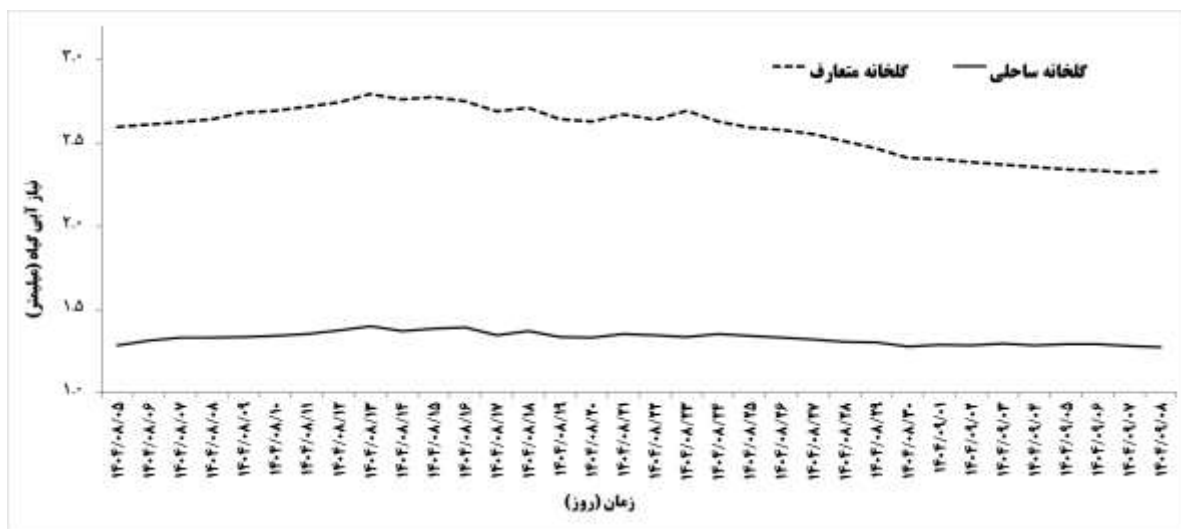
شکل ۸. ماتریس همبستگی پیرسون و سطح معنی‌داری آماری (P-VALUE) برای داده‌های رطوبت نسبی هوا در بین انواع محیط‌ها



مطابق روش‌شناسی پژوهش حاضر، کشت محصول در دو محیط کنترل شده شامل گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی صورت پذیرفت که اصول کار در سیستم گلخانه ساحلی، افزایش و ثابت نگه‌داشتن رطوبت نسبی هوا در محیط کشت محصول نزدیک به حد اشباع (بالتر از ۸۰ درصد) و مقایسه با مقادیر متناظر آن در محیط کشت گلخانه متعارف بود. همانگونه که در بخش قبل اشاره شد، بر اساس پارامترهای ثبت شده جوی و آنالیز واریانس انجام شده، مقادیر دمای هوا در دو محیط کشت حدوداً نزدیک به هم بوده و اختلاف معنی‌دار بین مقادیر مشاهده نگردید. در حالی که میانگین رطوبت نسبی هوا در محیط کشت گلخانه ساحلی برابر با ۸۴ درصد بود که این مقدار در حدود ۱/۵ برابر نسبت به میانگین رطوبت نسبی هوا در محیط کشت گلخانه متعارف با مقدار ۵۶ درصد تنظیم گردید و اختلاف بین مقادیر رطوبت نسبی روزانه هوا در این دو محیط کشت در سطح یک درصد معنی‌دار بود.

اندازه‌گیری نیاز آبی روزانه گیاه ریحان با روش میکروولایسیمتر وزنی در طول دوره مطالعاتی این پژوهش در شکل ۹ نمایش داده شده است. متوسط نیاز آبی روزانه گیاه ریحان در طول دوره کشت محصول، در محیط کشت گلخانه ساحلی برابر با ۱/۳۳ میلیمتر و در محیط کشت گلخانه متعارف برابر با ۲/۵۸ میلیمتر بود. بالاترین و پایین‌ترین مقدار نیاز آبی روزانه گیاه ریحان در طول دوره کشت محصول به ترتیب، در محیط کشت گلخانه ساحلی برابر با ۱/۴۰ و ۱/۲۸ میلیمتر و در محیط کشت گلخانه متعارف برابر با ۲/۸۰ و ۲/۳۲ میلیمتر بود. همچنین مجموع نیاز آبی گیاه ریحان در طول دوره کشت محصول، در محیط کشت گلخانه ساحلی برابر با ۴۵/۲۰ میلیمتر و در محیط کشت گلخانه متعارف برابر با ۸۷/۶۶ میلیمتر بود.

بر اساس نتایج، در مطالعه حاضر با افزایش و کنترل مقادیر رطوبت نسبی هوا در محیط کشت محصول (متوسط ۸۴ درصد)، متوسط نیاز آبی روزانه گیاه ریحان نسبت به محیط کشت گلخانه متعارف کاهش یافته است. این موضوع همچنین در مقایسه با متوسط نیاز آبی گیاه ریحان با مقدار ۲/۱۱ میلیمتر در محیط کشت پیشنهادی مطالعه احمدی نیک و همکاران ۱۳۹۹ قابل مشاهده است. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که اختلاف مقادیر نیاز آبی گیاه ریحان در طول دوره کشت محصول در محیط کشت گلخانه ساحلی و محیط کشت گلخانه متعارف از نظر آماری و در سطح یک درصد بسیار معنی‌دار ($p < 0.001$) است. این موضوع بیانگر تأثیرگذاری بالای تغییرات پارامتر رطوبت نسبی هوا در محیط کشت بر نیاز آبی گیاه می‌باشد.



شکل ۹. نمودار نیاز آبی روزانه گیاه ریحان در دوره کشت محصول

جهت ارزیابی عملکرد گیاه ریحان در پایان دوره کشت محصول، در محیط کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی برخی از مشخصات محصول شامل ارتفاع گیاه، وزن خشک و وزن تر بوته اندازه‌گیری و محاسبه گردید که مقادیر آن‌ها در هر یک از محیط‌های کشت در جدول ۱۵ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد گیاه ریحان در این مطالعه در هر دو محیط کشت از عملکرد حدوداً یکسانی برخوردار بود. به گونه‌ای که ارتفاع گیاه در محیط کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی به ترتیب ۳۳/۱۱ و ۳۳/۰۵ سانتیمتر اندازه‌گیری گردید. همچنین وزن تر بوته در محیط کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی به ترتیب ۱۵/۹۸ و ۱۵/۸۳ گرم و وزن خشک بوته در محیط کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی به ترتیب ۱/۶۲ و ۱/۵۳ گرم اندازه‌گیری شد.

جدول ۱۵. عملکرد گیاه ریحان در محیط کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی

شاخص	گلخانه متعارف	گلخانه ساحلی
ارتفاع گیاه (سانتیمتر)	۳۳/۱۱	۳۳/۰۵
وزن تر بوته (گرم)	۱۵/۹۸	۱۵/۸۳
وزن خشک بوته (گرم)	۱/۶۲	۱/۵۳

در ادامه، مقادیر شاخص‌های مربوط به عملکرد محصول شامل وزن تر و خشک بوته گیاه در هر یک از محیط‌های کشت با استفاده از تحلیل آماری آنالیز واریانس مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۱۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج، بررسی مقادیر شاخص وزن تر و خشک بوته گیاه نشان داد در زمینه عملکرد محصول در هر یک از محیط‌های کشت محصول شامل گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی، تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد ($p > 0/05$) وجود ندارد. به بیانی دیگر نتایج نشان داد کاهش نیاز آبی گیاه در مدل شبیه‌سازی گلخانه ساحلی، منجر به تفاوت معنی‌دار در عملکرد محصول نداشته است.

جدول ۱۶. تحلیل واریانس یک طرفه برای مقایسه شاخص‌های عملکرد گیاه ریحان در گلخانه ساحلی و متعارف

صفت	مقدار p	آماره F	خطای میانگین مربعات
وزن تر بوته (گرم)	۰/۴۳۲	۰/۶۲۵	۰/۳۶۸
وزن خشک بوته (گرم)	۰/۱۹	۲۱/۸۱۷	۰/۱۴۸

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه تغییرات شرایط جوی و ارتباط بین پارامترهای اقلیمی در محیط‌های فضای باز، محیط کشت گلخانه متعارف و گلخانه ساحلی به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته و شناخت کامل از اثرات متقابل این پارامترها حاصل گردید. همچنین ارزیابی نیاز آبی گیاه ریحان و عملکرد محصول در محیط کشت با رطوبت نسبی بالا و مقایسه آن با مقادیر متناظر در محیط کشت گلخانه‌های متعارف نشان داد در زمینه عملکرد محصول بر حسب شاخص وزن تر و خشک بوته گیاه تفاوت معنی‌داری در محیط‌های کشت، مشاهده نشد و تغییرات نیاز آبی گیاه منجر به تفاوت معنی‌دار در عملکرد محصول نگردید. این در حالی بود که متوسط نیاز آبی روزانه گیاه ریحان در طول دوره کشت محصول، در محیط کشت گلخانه ساحلی حدود ۴۸/۵ درصد نسبت به متوسط نیاز آبی روزانه گیاه ریحان در محیط کشت گلخانه متعارف کاهش یافت. به بیانی دیگر می‌توان گفت افزایش رطوبت نسبی هوا در محیط کشت محصول به مقدار ۱/۵ برابر، منجر به تقلیل نیاز آبی گیاه ریحان در محیط کشت گلخانه ساحلی به نصف مقدار این پارامتر در محیط کشت گلخانه متعارف گردید. بر این اساس، کارایی این سیستم در کاهش نیاز آبی گیاه بسیار معنی‌دار ارزیابی گردید. شایان ذکر است پیشنهاد می‌شود ارزیابی شاخص‌های کیفی عملکرد گیاه نیز در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهشی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

منابع

- Ahmedy Nik, Ahmad, Rahimiyeh, Aliyeh, & Aliniaiefard, S. (2020). Water use efficiency in novel integrated system of greenhouse and saltwater evaporative pond. *Desalination*, 496, 114698.
Doi: <https://doi.org/10.22034/AEJ.2019.1878218.1112>.
- Ahmedy Nik, Ahmad, Rahimiyeh, Aliyeh, & Aliniaiefard, S. (2021). Evaluation of Evaporation Potential in Novel Integrated System of Greenhouse and Saltwater Evaporative Pond. *International Conference on Desalination and Water Purification*, Amirkabir University of Technology, Bandarabbas Campus, 16-18 Feb 2021.
- Ahmedy Nik, Ahmad, Rahimiyeh, Aliyeh, & Aliniaiefard, S. (2019). Effect of pond dimensions on water requirement of basil in novel integrated system of greenhouse and saltwater evaporation pond. *Agroecology Journal*, 15(3): 13-22.
<https://doi.org/10.22034/AEJ.2019.1878218.1112>, (In Persian).
- Ahmedy Nik, Ahmad, Rahimiyeh, Aliyeh, & Aliniaiefard, S. (2020). Atmospheric Parameters Variation, Reference Crop Evapotranspiration and Basil Water Requirement in Novel Integrated System of Greenhouse and Saltwater Evaporative Pond. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(2): 455-467. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.278320.668152>

REFERENCES

- Ahmadinik, A., Rahimikhoob, A., & Aliniaiefard, S. (2020). Water use efficiency in novel integrated system of greenhouse and saltwater evaporative pond. *Desalination*, 496, 114698.
- Ahmadinik, A., Rahimikhoob, A., & Aliniaiefard, S. (2021). Evaluation of Evaporation Potential in Novel Integrated System of Greenhouse and Saltwater Evaporative Pond. *International Conference on Desalination and Water Purification*, Amirkabir University of Technology, Bandarabbas Campus, 16-18 Feb 2021.
- Ahmadinik, A., Rahimikhoob, A., Aliniaiefard, S. (2019). Effect of pond dimensions on water requirement of basil in novel integrated system of greenhouse and saltwater evaporation pond. *Agroecology Journal*, 15(3): 13-22. <https://doi.org/10.22034/AEJ.2019.1878218.1112>, (In Persian).
- Ahmadinik, A., Rahimikhoob, A., Aliniaiefard, S. (2020). Atmospheric Parameters Variation, Reference Crop Evapotranspiration and Basil Water Requirement in Novel Integrated System of Greenhouse and Saltwater Evaporative Pond. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(2): 455-467. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.278320.668152>, (In Persian).

- Akinaga, T., Generalis, S. C., Paton, C., Igobo, O. N., & Davies, P. A. (2018). Brine utilisation for cooling and salt production in wind-driven seawater greenhouses: Design and modelling. *Desalination*, 426, 135–154.
- Barzigar, A., Allahyari, S., Fathi, M., Mujumdar, A. S., & Hosseinalipour, S. M. (2025). Modeling Freshwater Yield: Deep Learning Applications in Seawater Greenhouses in Iran.
- Baştuğ, R., Büyüктаş, D., Büyüктаş, K., Aydinsakir, K., Onus, A. N., & Karaca, C. (2024). Evapotranspiration and crop coefficients of some vegetable crops grown under greenhouse conditions. *Journal of Water and Climate Change*, 15(7), 3236–3259.
- Bonachela, S., Fernández, M. D., Hernández, J., & Karaca, C. (2024). Computing air temperature and humidity for reference crop evapotranspiration calculation in passive Mediterranean greenhouses. *Agricultural Water Management*, 302, 108991.
- Labra, M., Miele, M., Ledda, B., Grassi, F., Mazzei, M., and Sala, F. (2004). Morphological characterization, essential oil composition and DNA genotyping of *Ocimum basilicum* L. cultivars. *Plant Science*; 167(4): 725-731. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.04.026>
- M. Al-Ismaili, H. Jayasuriya, Seawater greenhouse in Oman: A sustainable technique for freshwater conservation and production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54(2016), 653–664.
- Oskouie, A. G., Soufi, M. D., Khashehchi, M., Gorjian, S., & Kermani, A. M. (2025). Numerical modeling of the greenhouse effluent desalination process using solar energy by a multi-effect method with HYSYS software. *Results in Engineering*, 105892.
- Sablani, S. S., Goosen, M. F. A., Paton, C., Shayya, W. H., and Al-Hinai, H. (2003). Simulation of fresh water production using a humidification-dehumidification seawater greenhouse. *Desalination*; 159(3): 283-288. doi:[https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)90080-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)90080-4)
- Sarghini, H., Ibn-elhaj, S., Ennaciri, Y., Elghardouf, N., Ladouy, S., Khabbazi, A., & Kabouri, A. (2024). Primarily experimental study of the energy performances of a humidification-dehumidification seawater desalination system coupled with a heat pump. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100643.
- Zamen, M., Kahani, M., & Zarei, G. (2023). Seawater Greenhouse Equipped with a Novel Solar Humidification Dehumidification Desalination Unit in MAKHRAN Coast: Fabrication and Experimental Study. *Water*, 15(3), 539.