Investigating the Effect of the Magnetic Field Generated by the Helmholtz Coil on Water Evaporation Rate in a Hot Air Convection Dryer

H. Mohammadinezhad¹, M. H. Aghkhani^{2*}, H. Sadrnia³

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (*- Corresponding Author Emai: aghkhani@um.ac.ir) https://doi.org/10.22067/jam.2025.91869.1337

Introduction

Water is a very important component of many food products and determines their physical properties, texture, sensory quality, and rate of chemical and microbiological reactions. Magnetic fields, as an emerging technological tool, have recently received increasing attention in the food industry due to their strong permeability and non-contact nature. Studies have shown that magnetic fields weaken hydrogen bonds. Researchers reported that when the magnetic field strength increases, the refractive index of water increases by approximately 0.1%. Magnetic fields can also weaken the van der Waals bonds between water molecules. A similar type of magnet was used in another study for a magnetic field of 6 Tesla. They did not evaluate the evaporation rate, but rather some other properties using the air flow contact angle, and suggested that the magnetization of pure water requires air and the relative motion of the water against the magnetic flux. Previous experiments were conducted at room temperature. The effects of magnetic fields on water samples have been studied from various aspects and are still of interest to researchers in this field. The direction of air flow relative to the magnetic field gradient also affects the evaporation rate. However, some experiments are not well-defined, and their repetition will not be easily feasible. Therefore, a review of the literature on the effects of magnetic fields on water properties shows that there is still no coherent view on the mechanism of the effects of such fields. In this study, we focused on studying the effect of a static electromagnetic field with predefined intensities on the water evaporation rate, fields from 30 to 130 mT and a temperature range between 30, 50, and 70 °C with forced air movement at a uniform speed, and the continuous presence of samples in the electromagnetic field, which, to our knowledge, has not been reported before. To this end, the objectives of this study include: (1) quantitative determination of the evaporation rate as a function of the applied magnetic field; (2) finding the energy contribution to the evaporation rate in the presence of a magnetic field.

Materials and Methods

To create a magnetic field, two copper coils with a wire gauge of 1.25 mm, a core diameter of 110 mm, and 2500 turns were used. To measure the level of magnetism, the PHYWE Tesla meter with an accuracy of 10 microteslas and measurement range of 20 to 2000 mT, made in Germany, was used. To measure the weight of the samples at the desired intervals, the AND digital scale model GF6000 with a weighing capacity of 6000 grams and an accuracy of 0.01 grams, made in Japan, was used. For each of the tests, 40 milliliters of Type II distilled water were used in accordance with ASTM D1193 and ISO 3696 standards, with a conductivity of 0.1 μ S.cm⁻¹. Initially, to ensure uniform testing conditions, the device was operated for 15 minutes, after which the samples were placed in petri dishes with a diameter of 90 millimeters and a height of 11 millimeters at a constant temperature of 20 degrees Celsius and prepared for testing. After preparing the samples and the device, the prepared samples were placed inside the device and removed at 15-minute intervals for a duration of 120 minutes, then weighed using a scale with an accuracy of 0.01 grams. This process was carried out separately for each treatment, and the data were collected. The evaporation rate of the sample per unit time was calculated using the unit of milligrams per minute and the trend line equation. The slope of the obtained lines indicated the evaporation rate values. All the trend lines obtained had a coefficient of determination (i.e., linear correlation degree) equal to or greater than 0.99. We chose the magnetic field range of 30 to 130 mT because the working range of the magnetic field generator in the device fell within this range. The experiments were conducted using a factorial test based on a completely randomized design with two replications. The first factor was the intensity of the electromagnetic field at four levels: 0, 30, 60, and 130 mT; the second factor was temperature at three levels: 30, 50, and 70 degrees Celsius; and the third factor was time at eight levels: 15 to 120 minutes. The means were compared at the 5% significance level using Duncan's test. For this purpose, SAS software version 9.2 was used, and Excel 2016 was used for plotting the graphs.

Results and Discussions

The samples were placed in the field generated by the Helmholtz coil, and the results confirmed the effect of the magnetic field on the water evaporation rate. It was demonstrated in a study that, although increasing temperature and decreasing humidity are the dominant factors affecting the rate of water evaporation, a stationary magnetic field with decreasing temperature has an increasing effect on the evaporation rate. This finding contradicts the results of the present study, where the experimental data indicate an increased impact of the magnetic field with rising temperature levels. Considering the results of the analysis of variance, all factors along with their two-way and three-way interactions were significant at the one percent level.

Based on Duncan's multiple range test, for duration, magnetic intensity, and temperature, with the increase in each factor level, the weighted evaporation values of the samples significantly decreased compared to the previous factor level. All the trend lines obtained had a coefficient of determination (i.e., linear correlation degree) equal to or greater than 0.99. The slope of the line equation between weight and time is equal to the evaporation rate (R). From the evaporation rates obtained from experimental data, it is clear that the correlation with temperature is not linear, but rather an exponential function as:

 $Ln(R) = ln(k) + \alpha Ln(B) + \beta Ln(T) + \varepsilon$

The above model can behave like a linear model. The parameter estimates of the model were obtained using the SPSS software as:

 $Ln(R) = 2.779 + 0.503Ln(B) + 0.174Ln(T) + \varepsilon$

The final model can be expressed in the following form:

 $R = 16.103 \times B^{0.503} T^{0.174} + \varepsilon$

At a temperature of 30 degrees Celsius, the energy consumption decreased by 11.4 kJ with the increase of magnetic levels. At temperatures of 50 and 70 degrees Celsius, the reduction in energy consumption with the application of a magnetic field was observed to be 48.3 and 45.2 kJ per gram, respectively. These results demonstrate the effect of magnetism on optimizing energy consumption at different temperature levels, with 50 degrees Celsius and a magnetic field intensity of 130 mT being the optimal conditions in terms of energy consumption.

Conclusion

In this study, a statistical approach was used to investigate the rate of water evaporation under different magnetic fields and temperatures over a specified period. The results indicated that the magnetic field, like temperature, affects water evaporation, and as the field increased, the rate of water evaporation also rose. Specifically, the evaporation rates in the treatments at 30, 50, and 70 degrees Celsius after 120 minutes without applying the magnetic field were 43.7%, 53.3%, and 66.5% of the initial weight of the sample, respectively. After applying the magnetic field from 0 to 130 mT, the evaporation rates were reported as 59.6%, 82.8%, and 94.7% of the initial sample weight, respectively, indicating an increase in the evaporation rate with the application of the magnetic field. Finally, a model was proposed that accurately predicts this trend and can be utilized. The analysis of the energy consumption results for each treatment also showed that the magnetic field can influence the total energy consumption for water evaporation and optimize energy use, with reductions of 14.6% at 30 degrees Celsius, 26.55% at 50 degrees Celsius, and 22.5% at 70 degrees Celsius.

Acknowledgments

The present study pertains to research project number 60993 approved by Ferdowsi University of Mashhad, and it acknowledges the efforts of Dr. Mohammad Farkhari (Associate Professor of Plant Breeding at the University of Agricultural Sciences and Natural Resources of Khuzestan) and Dr. Omid Doosti Irani, alumnus of the Biosystems Engineering Department at Ferdowsi University of Mashhad.

Keywords: Energy consumption, Magnetic field, Temperature, Water evaporation

بررسی تاثیر میدان مغناطیس حاصل از پیچه هلمهولتز بر نرخ تبخیر آب در یک خشککن همرفتی هوای گرم

حمید محمدی نژاد'، محمد حسین آق خانی'*، حسن صدرنیا'

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

کاهش رطوبت در محصولات غذایی برای حفظ بهتر آن ها بسیار معمول بوده و یکی از روشهای نگهداری مواد غذایی تبخیـر آب و خشـککردن آنها میباشد، که در روشهای خشک کردن سنتی اتلاف انرژی، زمان طولانی و تاثیر نامطلوب بر کیفیت محصـولات قابل مشـاهده است، بنـابراین استفاده از روشهایی جهت بهبود و رفع این گونه محدودیتها و افزایش راندمان خشک کردن لازم و ضروری میباشد. در ایـن خصـوص تـاثیر میـدان معناطیس بر نرخ تبخیر آب موضوعی است که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، خشککنی با هوای گرم و محفظهای بـرای اعمال میدان مغناطیس در محدوده دمایی ۳۰ تا ۲۰ درجه سانتیگراد و شدتهای میدان مغناطیس ۲۰ تا ۲۰ میلی تسلا به کار گرفته شد. مطابق نتـایج بهدستآمده، با اعمال میدان مغناطیس در محدوده دمایی ۳۰ تا ۲۰ درجه سانتیگراد و شدتهای میدان مغناطیس ۲۰ درجه و میدان مغناطیس ۲۰ میلی تسلا به کار گرفته شد. مطابق نتـایج مقدار ۹۴/۲ درصد وزن اولیه نمونه و کمترین مقدار تبخیر مربوط به تیمار ۲۰ درجه و میدان مغناطیس ۲۰ میلی تسلا به کار اولیه بود. در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد، با افزایش شدت میدان مناطیس به ۲۰ میدان مغناطیس صفر به مقدار ۱۳/۴۰ درصد وزن نمونـه که این روند در دمای ۵۰ و ۲۰ درجه سانتیگراد با افزایش شدت میدان مغناطیس به ۲۰ میلی تسلا درصد وزن نمونه های میدان مغناطیس دسته مقدار ۲۰/۲۰ درصد وزن نمونـه مشاهده گردید. درخصوص انرژی مصرفشده جهت تبخیر یک گرم آب در طی مدت زمان ۲۰ درجه افزایش تبخیر نسبت به میدان مغناطیس صفر مشاهده گردید. درخصوص انرژی مصرفشده جهت تبخیر یک گرم آب در طی مدت زمان ۲۰ درقیقه بیشترین انرژی مصرفی بدست.آمده مربوط بـه میلی تسلا و مقدار ۶۶/۲۰ کیلوژول بود. بیشترین کاهش مصرف انرژی با اعمال میدان مغناطیس جهت تبخیر یک گرم آب نسبت به میدان مغناطیس در میلی تسلا و مقدار ۶۶/۲۶ کیلوژول بود. بیشترین کاهش مصرف انرژی با اعمال میدان مغناطیس جهت تبخیر یک گره و میدان مغناطیس در میلی تسلا و مقدار ۶۶/۲۶ کیلوژول در درم انرژی با اعمال میدان مغناطیس جهت تبخیر یک گرم آب نسبت به تیمار معناطیس ۲۰ میلی تسلا و مقدار ۶۶/۶۰ کیلوژول در درم محدن زمان ۲۰۰ درجه سانتیگراد و میدان مغناطیس در تر در میلی مسرفی میدان مناطیس در میلی نسبت به میدان مغناطیس در میلی تسلا به مقدار ۲۸/۶ کیلوژول در مدت زمان

واژه های کلیدی: انرژی مصرفی، تبخیر آب، دما، میدان مغناطیس

مقدمه

حكىدە

آب جزء بسیار مهم بسیاری از محصولات غذایی است و خواص فیزیکی، بافت، کیفیت حسی و میزان واکنشهای شیمیایی و میکروبیولوژیکی آن را در غذا تعیین میکند، کاهش رطوبت در محصولات غذایی برای حفظ بهتر آنها بسیار معمول بوده و یکی از روشهای نگهداری مواد غذایی تبخیر آب و خشک کردن آنها میباشد، میدان مغناطیس بهعنوان یک ابزار تکنولوژیک نوظهور، اخیرا به دلیل نفوذپذیری قوی و ماهیت غیرتماسی با مواد غذایی، در این

صنعت مورد توجه فزاینده ای قرار گرفته است (& Gąstoł &) صنعت مورد توجه فزاینده ای قرار گرفته است (& Błaszczyk, 2024 Toledo,). پژوهش ها نشان می دهد که میدان های مغناطیس باعث تضعیف پیونده ای هیدروژنی می شود (, Ramalho, & Magriotis, 2008 قدرت میدان مغناطیس افزایش می یابد، ضریب شکست آب تقریبا Hosoda, Mori, Sogoshi,). محققان گزارش دادند که وقتی Hosoda, Mori, Sogoshi,). همچناین در پژوهشی ا/۰ درصد افزایش خواهد یافت (, Nagasawa, & Nakabayashi, 2004 دیگر افزایش جزئی در تعداد پیونده ای هیدروژنی با شبیه سازی دیگر افزایش جزئی در تعداد پیونده ای هیدروژنی با شبیه سازی دیگر افزایش از ۰ تا ۱۰ تسلا بررسی شده است (, 2006).

میدانهای مغناطیس همچنین میتوانند پیوند واندروالس بین مولکولهای آب را تضعیف کنند (Krems, 2004). بـ معنوان مثـال،

۱ گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

⁽Email: aghkhani@um.ac.ir (#- نویسنده مسئول: https://doi.org/10.22067/jam.2025.91869.1337

ناكاگوا و همكاران (Nakagawa, Hirota, Kitazawa, & Shoda,) ناكاگوا و 1999)، از سيستمي جهت تبخير آب تحت جريان گاز حامل خارجي استفاده کردند که در آن نظارت بر میزان تبخیر آب توسط یک سنسور رطوبت قرار داده شده در مسیر گاز خروجی کنترل میشد و در این سیستم برای اعمال میدان مغناطیس ساکن از آهنرباهای ابررسانا به شدت ۸ تسلا استفاده کردند. نوع مشابهی از آهنربا توسط اوتسوکا و ازکی (Otsuka & Ozeki, 2006)، برای میدان مغناطیس ۶ تسلا استفاده شد. آنها نرخ تبخیر را ارزیابی نکردند، بلکه برخی از خواص دیگر را با استفاده از زاویه تماس جریان هوا ارزیابی کردند و اظهار داشتند که مغناطش آب خالص به هوا و حرکت نسبی آب در برابر شار مغناطیس نیاز دارد. سیفی و همکاران (Seyfi, Afzalzadeh, &) Chibowski,) و ڇيبوفسکي و همکاران (Hajnorouzi, 2017 Szcześ, & Hołysz, 2018)، آزمایش های خود را در دمای اتاق انجام دادند. آزمایش ها بهترتیب با آهنرباهای حلقه ای فریت (۵۵ میلی تسلا) و نئودیم (۰/۶۵ تسلا) صورت پذیرفت. اثرات میدان مغناطیس بر نمونه های آب از جنبه های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است و هنوز هم مورد علاقه محققان در این زمینه میباشد. همچنین جهت جریان هوا نسبت به گرادیان میدان مغناطیس بر ميزان تبخير تأثير مي گذارد.

در پژوهشی افزایش ۶ درصدی در تبخیر آب تیمارشده در میدان مغناطیس با شدت ۸/۰ تسلا توسط رشید و همکاران گزارش شد (Rashid, Hassan, Mashot, & Hashim, 2013) صورتی این اتفاق رخ میدهد که مبدا میدان در سطح رابط آب و هوا قرار گرفته باشد و اگر میدان مغناطیس در وسط یا پایین نمونه قرار گرفته باشد، هیچ اثری مشاهده نمیشود. سیفی و همکاران (Seyfi et راد 2017 ماله، افزایش تبخیر آب را بر اساس انرژی جنبشی مولکول های آب و نیروی لورنتس که بر مولکول های باردار وارد آب میتواند به صورت لحظهای بر روی پیوندهای هیدروژنی در نوشه ها تأثیر گذاشته و آن ها را ضعیف یا شکسته و منجر به افزایش نرخ تبخیر شود.

Amor, Elaoud, Salah, & Elmoueddeb,) آمور و همکاران (2017)، با استفاده از آهنرباهای تجاری مختلف (۰/۲۳ ، ۰/۲۹ و ۲۰۱۵)، با استفاده از آهنرباهای تجاری مختلف (۰/۲۹ ، ۲۳۳ و ۲۵ تسلا) و یک آهنربای الکترومغناطیس (۰/۰۹ تسلا) که بر روی لوله نصب شدهاند، یک اثر آماری معنیدار میدان مغناطیس بر میزان تبخیر

آب آبیاری در دماهای مختلف منتشر کردند. اخیرا وانگ و همکاران (Wang, Wei, & Li, 2018)، تغییرات در مقادیر تبخیرشده، کاهش گرمای ویژه و نقطه جوش آب لوله کشی پس از قـرار دادن نمونـه در میدان مغناطیس ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی تسلا متشکل از ۲۶ آهنربا را به مدت ۵ دقیقه و با سرعت جریان آب ۰/۸ متر بر ثانیه گزارش کردنـد. اوتسوكا و اوزكي (Otsuka & Ozeki, 2006)، ادعا كردند كه، در آب خالص (آب مقطر در خلاء بدون گاز محلول) میدان مغناطیس خواص آب را تغییر نمیدهد اما اگر اکسیژن یا هوا وارد محفظه شود خواص آب تغییر می کند. آن گونه که مشاهده می شود برخی از آزمایش ها بهخوبي مشخص نيستند و اجراي مجدد آنها نيز بهراحتي قابل اجرا نخواهد بود لذا بررسي مقالات مربوط به اثرات ميدانهاي مغناطيس بر خواص آب نشان میدهـد کـه هنـوز دیـدگاه منسـجمی در مـورد مکانیسم اثرات این گونه میدان ها وجود ندارد. با وجود این، در تعداد کمی از آثاری که به بررسی خواص آب میپردازند گردش هوا و تبخیر آب بهطور همزمان صورت پذیرفته است. در این پژوهش به مطالعه تأثير يك ميدان الكترومغناطيس استاتيك با شدتهاي ذکرشده روی نرخ تبخیر آب، تمرکز شد میدان هایی از ۳۰ تا ۱۳۰ میلی تسلا و طیف دمایی بین ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتی گراد به همراه حرکت اجباری هوا با سرعت یکنواخت و حضور پیوسته نمونهها در ميدان الكترومغناطيس، قبلا گزارش نشده است. بدين منظور اهداف این پژوهش موارد زیر را شامل می شود: (۱) تعیین کمی نرخ تبخیر بهعنوان تابعی از میدان مغناطیس اعمال شده (۲) پیدا کردن سهم انرژی در نرخ تبخیر با حضور میدان مغناطیس.

مواد و روشها

در ادامه بهترتیب تجهیزات مورداستفاده، مواد آزمایشی، نحوه آمادهسازی نمونهها و روش تجزیه و تحلیل دادهها توضیح داده خواهند شد.

جهت انجام پژوهش حاضر از یک خشک کن با دارا بودن قابلیت محفظه اعمال میدان مغناطیس بر پایه هوای داغ با مشخصات زیر که در گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد در بهمین ماه ۱۴۰۱ طراحی و ساخته شد استفاده گردید، طرحواره دستگاه در شکل ۱ مشاهده می شود.



شکل ۱ – طرحواره دستگاه خشککن مغناطیس آزمایشگاهی و اجزای آن: (۱) دمنده هوا، (۲) مولد الکتریکی حرارت، (۳) سینی نمونه، (۴) مولد میدان مغناطیس، (۵) کنترلر دستگاه (۶) دریچه خروجی هوا

Fig.1. Schematic of the laboratory magnetic dryer and its components: (1) Air blower, (2) Electric heat generator, (3) Sample tray, (4) Magnetic field generator, (5) Device controller, (6) Air outlet valve

گرفتهاند و با فاصله مشخص از هم جدا می شوند (, Beiranvand, 2013)، میدان مغناطیس همگن در کنار فضای آزاد موجود بین سیم پیچها در سیستم هلمهولتز دلیل اصلی انتخاب این سیستم در پژوهش حاضر بوده است. بهمنظور اطمینان از یکنواختی میدان مغناطیس، شدت میدان در نقاط مختلف داخل محفظه میدان مغناطیس توسط پروب نشان داده شده در شکل ۴ اندازه گیری و تغییرات آن بررسی شد.





شکل ۲ – شماتیکی از سیم پیچهای هلمهولتز جهت تولید میدان مغناطیس یکنواخت Fig. 2. Schematic of the Helmholtz coils to generate a uniform magnetic field (Min, Zhou, Qing, Luo, & Zhu, 2017)

سیم پیچها با منبع جریان مستقیم یک میدان همگن تولید میکنند. بر اساس قانون Bio-Savart، حاصل میدان همگن دو سیم پیچ برابر است با مجموع بردار میدانهای ایجادشده توسط یک سیم پیچ (Saqib, Francis, & Francis, 2020).

میدان همگن ایجادشده توسط یک سیمپیچ را میتوان طبق رابطه (۱) محاسبه کرد.

$$B_{Z} = \frac{\mu_{0} N R^{2}}{2 \left(R^{2} + (Z + h^{2})\right)^{\frac{2}{3}}}$$
(1)

که در این رابطه B_Z میدان مغناطیس بر حسب تسلا، μ نفوذپدیری I مغناطیس خلاء بر حسب N ،H m⁻¹ معناطیس خلاء بر

جریان در سیم پیچها بر حسب آمپر، Z محوری که میدان مغناطیس ایجاد می کند، R شعاع سیم پیچها بر حسب متر و h فاصله مرکز سیم پیچ بر حسب متر می باشد.

در این دستگاه جهت ایجاد میدان مغناطیس از دو سیمپیچ مسی با نمره ۱/۲۵ میلیمتر با قطر هسته ۱۱۰ میلیمتر و تعداد ۲۵۰۰ دور استفاده گردید (شکل ۳). جریان در هـر دو سیمپیچ در یک جهت انتخاب گردید تا میدانها مکمل یکدیگر باشند و در هر نقطـه یک میدان مغناطیس تقویتشده ایجاد گردد.



شکل ۳- مولدهای میدان مغناطیس ساخته شده برای دستگاه خشک کن مغناطیس آزمایشگاهی Fig. 3. Magnet generators made for laboratory magnetic dryer

دقت ۱۰ میکروتسلا و رنج اندازهگیری ۲۰ تا ۲۰۰۰ میلیتسلا ساخت کشور آلمان استفاده شد.

جهت اندازه گیری میدان مغناطیس و صحتسنجی میدانهای مغناطیس ایجادشده از دستگاه PHYWE Teslameter (شکل ۴) با



شکل ٤ – دستگاه اندازه گیری میدان مغناطیس Fig. 4. Magnetic field measuring device

جهت اندازه گیری وزن نمونهها در فواصل زمانی مورد نظر از یک توزین ۶۰۰۰ گرم دارای دقت ۰/۰۱ گرم ساخت کشور ژاپـن اسـتفاده دستگاه ترازوی دیجیتال AND مدل GF6000 (شکل ۵) با ظرفیـت گردید.



شکل ٥- ترازوی دیجیتال جهت توزین نمونهها Fig. 5. Digital scale for weighing samples

جهت اندازه گیری توان مصرفی خشک کن در هر یک از تیمارها از دستگاه پاورمتر دیجیتال گودویل مدل 8213 GPM ساخت کشور

تایوان استفاده گردید (شکل ۶) که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.



Fig. 6. Dryer power consumption measuring device

GPM 8213 جدول ۱ – مشخصات پاورمتر دیجیتال گودویل مدل Table 1- Specifications of Goodwill Digital Power Meter Model GPM 8213

| nome er ever min Bighan | 1 0 11 01 11 10 |
|---|------------------|
| رنج ولتاژ Voltage range | ۲۰۰ ولت 600 V |
| فرکانس آزمایش Current test frequency | 6 kHz |
| جريان Current | 20 A |
| توان Power | 13.2 kW |
| تغذیه ورودی Input power | 220 V |
| قدرت تُفکیکُ Watt resolution | 1 mW |
| رنج ولتاژ Voltage range | 640 V |
| | |

برای انجام هر یک از آزمایش ها از ۴۰ میلی لیتر آب مقطر نوع گرید (II) مطابق با ASTMD1193 و استانداردهای ISO 3696 با رسانایی 0.1µS.cm⁻¹ استفاده شد. ابتدا جهت یکنواختی شرایط آزمایش دستگاه برای مدت ۱۵ دقیقه شروع به کار نمود و پس از آن

نمونهها با دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی گراد درون پتری دیش ه ایی با قطر ۹۰ میلی متر و ارتفاع ۱۱میلی متر ریخته شده و جهت آزم ایش آماده شدند (شکل ۷).



شکل ۷− نمونه آب مقطر آماده شده جهت آزمایش Fig. 7. Distilled water sample prepared for testing

پس از آماده سازی نمونه و دستگاه، نمونه های آماده شده درون دستگاه قرار گرفتند و در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه به مدت ۱۲۰ دقیقه از دستگاه خارج و توسط ترازو با دقت ۲۰/۱ گرم وزن شدند. در طی مراحل آزمایش ها رطوبت نسبی هوای اتاق در محدوده ۲۷ تا ۳۱ درصد متغیر بود. این کار برای هریک از تیمارها به صورت جداگانه صورت پذیرفت و داده ها جمع آوری گردید. در این پژوهش برای محاسبه میزان تبخیر نمونه در واحد زمان از واحد میلی گرم در دقیقه و معادله خط روند استفاده شد. شیب خطهای به دستآمده نشان دهندهی مقادیر نرخ تبخیر بود. همه خطوط روند به دستآمده دارای ضریب تعیین (یعنی درجه همبستگی خطی) برابر یا بیشتر از ۹/۰۰ بودند.

جهت محاسبه کمی درصد تغییرات نرخ تبخیر در هنگام استفاده از میدانهای مغناطیس با شـدتهای متفاوت از رابطـه (۲) اسـتفاده گردیـــد (-Rodríguez, 2021). (Rodríguez, 2021).

$$\Delta R(\%) = \frac{R_M - R_{NM}}{R_{NM}} \times 100 \tag{7}$$

در این رابطه ΔR درصد تغیرات نرخ تبخیر بهعنوان تابعی از میدان مغناطیس، RM نرخ تبخیر در حالتی که میدان مغناطیس وجود دارد و RNM نرخ تبخیر در حالتی که میدان مغناطیس وجود ندارد می باشد.

در پژوهش حاضر محدوده میدان مغناطیس ۳۰ تا ۱۳۰ میلی تسلا انتخاب شد زیرا محدوده کاری مولد میدان مغناطیس موجود در دستگاه در این رنج قرار داشت.

روشهای تحلیل آماری آزمایش

تجزیه و تحلیل دادههای آزمایش در قالب آزمون فاکنوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با دو تکرار انجام شد که در آن فاکتور اول شدت میدان الکترومغناطیس در چهار سطح ۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۳۰ میلیتسلا، فاکتور دوم دما در سه سطح ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد و فاکتور سوم زمان در ۸ سطح ۱۵ الی ۱۲۰ دقیقه میباشد. مقایسه میانگینها در سطح احتمال ۵ درصد و آزمون دانکن صورت پذیرفت. در این خصوص از نرمافزار SAS نسخه ۲/۴ استفاده گردید، برای

رسم نمودارها نیز از نرمافزار اکسل ۲۰۱۶ اسنفاده گردید. با توجه به نرمال نبودن توزیع باقیماندهها در تجزیه واریانس براساس دادههای اصلی، تبدیل جذری روی دادهها صورت پذیرفت. روابط رگرسیونی خطی براساس نرمافزار Minitab نسخه ۲۲/۱ انجام شد. بعد از تجزیه واریانس و مقایسه میانگین، گزارش میانگینها براساس دادههای اصلی انجام گردید.

نتايج و بحث

همان گونه که در ابتدا بیان شد هدف این پـژوهش بررسـی تـاثیر میدان مغناطیس بر نرخ تبخیر آب در چهار سطح ۳۰،۰ ۶۰ و ۱۳۰ میلی تسلا و سه سطح دمایی ۵۰،۳۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد بود که مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی اثر میدان مغناطیس، جریان هوای عبوری از محفظه با سرعت ثابت تنظیم شد تا از تأثیر نامطلوب نوسانات جریان هوا بر نتایج جلوگیری شود. نمونهها در میدان حاصل از پیچه هلمهولتز قرار گرفتند و نتایج تاثیر میدان مغناطیس بر نرخ تبخیر آب را مورد تایید قرار داد. دوناس و همکاران (Dueñas et al., 2021)، در پژوهشی نشان دادند که اگرچه افزایش دما و کاهش رطوبت عوامل غالب موثر بر میزان تبخیر آب هستند، با این حال، یک میدان مغناطیس ساکن با کاهش دما تأثیر فزایندهای بـر نـرخ تبخیـر دارد موضوعی که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر در تضاد است و نتایج حاصل از دادههای تجربی این پژوهش نشان دهنده افزایش تاثیر میدان مغناطیس هنگام افزایش سطوح دمایی میباشد که نتایج تجزیه واریانس در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جـدول تجزیـه واریانس تمام فاکتورها به همراه اثرات متقابل دوجانبه و سهجانبه آنها در سطح یک درصد معنی دار بودند. بدین منظور از آزمون F استفاده گردید. آماره F نسبت دو واریانس است که در اینجا این آماره از تقسميم واريانس فاكتور مد نظر يا اثرات متقابل آنها بر واريانس خطا محاسبه و سپس میزان احتمال وقوع آن یا همان پی-والیو (احتمال رد فرض صفر صحيح) بهدست آمد.

| ب | تبحير ا | ميزان | براي | يانس | جزيه وار | نتايج ت | جدول ۱- | |
|------|---------|-------|------|------|----------|---------|---------|--|
| | | - | | | | - | | |

| Table 2 Results of analysis of variance for water evaporation | | | | | | | |
|---|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------|---------|--|--|
| منابع تغییر Source | درجه آزادی Degrees of Freedom | مجموع مربعات Sum of Squares | میانگین مربعات Mean of squares | F-value | P-value | | |
| دما Temperature (T) | 2 | 21.75 | 10.87 | 4664.53** | <.0001 | | |
| میدان مغناطیس Magnetic field (Mf) | 3 | 12.42 | 4.14 | 1776.67** | <.0001 | | |

| زمان Time (t) | 7 | 131.92 | 18.84 | 8083.29** | <.0001 |
|-------------------------------|----|--------|-------|-----------|--------|
| اثر متقابل دوجانبه T×Mf | 6 | 1.84 | 0.30 | 131.88** | <.0001 |
| اثر متقابل دوجانبه T×t | 14 | 9.04 | 0.64 | 277.03** | <.0001 |
| اثر متقابل دوجانبه Mf×t | 21 | 5.87 | 0.27 | 120.09** | <.0001 |
| اثر متقابل سه جانبه T×Mf×t | 42 | 1.20 | 0.02 | 12.31** | <.0001 |
| خطا Error | 96 | 0.22 | 0.00 | | |

**: معنیدار در سطح ۱ درصد

** Significant at 1% level

براساس مقایسه میانگین به روش دانکن اثرات اصلی، برای طول زمان، شدت میدان مغناطیس و دما با افزایش میزان هرفاکتور، مقادیر وزنی تبخیر نمونه بهصورت معنیداری نسبت به سطح قبلی فاکتور کاهش یافت و این کاهش معنیدار بود. مقایسه میانگین اثرات متقابل دوجانبه در شکلهای (۸، ۹ و ۱۰). نشان داده شده است. با توجه به

این نمودارها با افزایش مقادیر دما و میدان مغناطیس و زمان، میزان تغییرات وزن آب در طول زمانهای مختلف شدت بیشتری می گیرد. لذا میتوان پذیرفت که سازوکار طراحی شده توانسته است بهخوبی نقش خود را در افزایش نرخ تبخیر در میدانهای ۳۰، ۶۰ و ۱۳۰ میلی تسلا ایفا کند.





استفاده می شود که با افزایش سطوح حرارتی میزان تبخیر نیز به طرز معنیداری افزایش یافته است. میانگین ها با حروف مشابه از لحاظ آماری اختلاف معنی داری با یکدیگر ندارند. مقایسه میانگین اثر متقابل دما و زمان بر تغییرات وزنی آب براساس آزمون دانکن در سطح معنیداری ۱٪: همانطور که مشاهده می گردد گذشت زمان موجب تاثیر معنیدار در نرخ تبخیر نمونه مورد



شکل ۹ مقایسه میانگین اثر متقابل میدان مغناطیس و زمان بر تغیرات وزنی آب **Fig. 9**. Comparison of the average interaction effect of magnetic field and time on water weight changes

افزایش معنیدار در میزان تبخیر آب شدند. میانگینها با حروف مشابه از لحاظ آماری اختلاف معنیداری با یکدیگر ندارند. مقایسه میانگین اثر متقابل میدان مغناطیس بر تغیرات وزنی آب در واحد زمان براساس آزمون دانکن در سطح معنیداری ۱٪: نتایج نشان داد تمامی سطوح میدان مغناطیس با افزایش زمان موجب



Fig.10. Comparison of the average interaction effect of temperature and magnetic field on water weight changes

همه خطوط روند بهدست آمده دارای ضریب تعیین (یعنی درجه همبستگی خطی) برابر یا بیشتر از ۱/۹۹ بودند. شیب معادله خط بین وزن و زمان، برابر با نرخ تبخیر (R) است. بنابراین شیب این خط برای سطوح مشخص دما و شدت میدان مغناطیس بهدست آمد، برای این منظور از رگرسیون خطی ساده استفاده شد. نتایج در جدول ۳ گزارش شده است. مقایسه میانگین اثر اصلی دما بر تغیرات وزنی آب براساس آزمون دانکن در سطح معنیداری ۱٪: افزایش میدان مغناطیس از صفر تا ۱۳۰ میلی تسلا باعث تغییر معنی دار در نرخ تبخیر آب شده است که همین روند با اعمال تیمارهای دمایی مختلف نیز مشاهده گردید که نشان دهنده تاثیر دو تیمار بر نرخ تبخیر آب می باشد. میانگین ها با حروف مشابه از لحاظ آماری اختلاف معنی داری با یکدیگر ندارند.

| Table 3- Results of linear regression equations for different levels of temperature and magnetism per unit time | | | | | | |
|---|---|-----|------------------------------|---|--------------------------------------|--|
| Δ R % | ضریب تبیین Coefficient of Determination | R | معادله خط Linear equation | میدان مغناطیس Magnetic field (mT) | سطوح دمایی Temperature level (°C) | |
| | 0.996 | 146 | w = -0.146 time + 40.044 + e | • | 30 | |
| | 0.997 | 182 | w = -0.182 time + 40.341 + e | • | 50 | |
| | 0.998 | 221 | w = -0.221 time + 39.542 + e | • | 70 | |
| 13.70 | 0.996 | 166 | w = -0.166 time + 39.911 + e | 30 | 30 | |
| 13.74 | 0.998 | 207 | w = -0.207 time + 39.845 + e | 30 | 50 | |
| 14.99 | 0.998 | 254 | w = -0.254 time + 39.724 + e | 30 | 70 | |
| 29.45 | 0.997 | 189 | w = -0.189 time + 40.030 + e | 60 | 30 | |
| 24.18 | 0.999 | 226 | w = -0.226 time + 40.097 + e | 60 | 50 | |
| 33.94 | 0.999 | 296 | w = -0.296 time + 39.800 + e | 60 | 70 | |
| 36.30 | 0.998 | 199 | w = -0.199 time + 40.086 + e | 130 | 30 | |
| 56.59 | 0.997 | 285 | w = -0.285 time + 40.682 + e | 130 | 50 | |
| 42.99 | 0.997 | 316 | w = -0.316 time + 39.244 + e | 130 | 70 | |

جدول ۳– نتایج معادلات رگرسیون خطی برای سطوح مختلف دما و میدان مغناطیس در واحد زمان

کاملا مشهود بوده به طوری که بیشترین مقدار ۰/۳۱۶ گرم بر دقیقه مربوط به تیمار ۷۰ درجه سانتی گراد و میدان مغناطیس ۱۳۰ میلی تسلا و کمترین مقدار با ۰/۱۴۶ گرم بر دقیقه مربوط به تیمار ۳۰ درجه سانتی گراد و میدان مغناطیس صفر است که نشان دهنده افزایش ۱۲۱/۴ درصدی استفاده از تیمار ۷۰ درجه سانتی گراد و میدان ۱۳۰ میلی تسلا می باشد.

رابطه بین دما، میـدان مغنـاطیس و نـرخ تغییـرات تبخیـر آب در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تبخیر یکی از پارامترهای فیزیکی آب تحت تأثیر میدان مغناطیس است (Guo et al., 2012). اعمال میدان مغناطیس با کاهش کشش سطحی و ترویج تبخیر بر پارامترهای فیزیکی آب تأثیرگذار است. کاهش کشش سطحی باعث افزایش میزان تبخیر میشود (Amor et al., 2017). همانطور که در جدول ۳ ملاحظه میگردد با افزایش شدت میدان مغناطیس، درصد تغییرات تبخیر نسبت به حالتی که میدان مغناطیس وجود ندارد، افزایش یافته است و تاثیر دما و میدان مغناطیس در زمانهای مختلف بر نرخ تبخیر آب



شکل ۱۱ – رابطه بین دما، میدان مغناطیس و درصد تغییرات تبخیر آب

Fig. 11. Relationship between temperature, magnetism, and percentage change in water evaporation

از نرخهای تبخیر بهدست آمده از دادههای تجربی، واضح است که همبستگی با دما خطی نیست، بلکه تابعی نمایی است (Dueñas et) همبستگی با دما خطی نیست، بلکه تابعی نمایی است (Lnige ct) برای برآورد پارامترها، رابطه (۳) مورد استفاده قرار گرفت: $Ln(R) = \ln(k) + \alpha Ln(B) + \beta Ln(T) + \varepsilon$ (۳) مدل بالا می تواند شبیه به یک مدل خطی عمل کند. بر آورد (۴) مدل با استفاده از نرمافزار SPSS به صورت رابط (۴) بهدست آمد: $Ln(R) = 2.779 + 0.503Ln(B) + 0.174Ln(T) + \varepsilon$ (۴) که مدل نهایی را می توان به صورت رابطه (۵) بیان کرد:

$$R = 16.103 \times B^{0.503} T^{0.174} + \varepsilon \tag{(a)}$$

با توجه به شکل ۱۲ نمودار انرژی صرفشده بر اساس کیلوژول بهازای هر یک گرم از آب تبخیرشده در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه ترسیم شده است، در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد با افزایش سطوح میدان مغناطیس مصرف انرژی ۱۱/۴ کیلوژول کاهش داشت، در سطوح دمایی ۵۰ و ۲۰ درجه سانتی گراد، کاهش مصرف انرژی با اعمال میدان مغناطیس بهترتیب ۴۸/۳ و ۴۵/۲ کیلوژول بر گرم مشاهده گردید که نتایج تاثیر گذاری میدان مغناطیس بر بهینه سازی مصرف انرژی را در سطوح دمایی مختلف اثبات می کند که در این میان دمای ۵۰ درجه سانتی گراد با شدت میدان مغناطیس ۲۰۰ میلی تسالا



Temperature (°C) - Magnetic field (mT) دما (درجه سانتی گراد) – میدان مغناطیس (میلی تسلا)

شکل ۱۲ – نمودار انرژی مصرفی بر اساس کیلوژول برای هر گرم آب تبخیرشده در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه Fig. 12. Energy consumption chart based on kilojoules per gram of water evaporated in 120 minutes

نتيجهگيرى

در این پژوهش از یک رویکرد آماری جهت بررسی میزان تبخیر آب تحت میدانهای مختلف میدان مغناطیس و دماهای مختلف طی زمانی مشخص استفاده گردید. نتایج نشاندهنده این موضوع بود که میدان مغناطیس همچون دما در تبخیر آب تاثیرگذار بوده و هرچه این میدان افزایش یافت، میزان تبخیر آب نیز روند صعودی به خود گرفت، به طوری که نرخ تبخیر در تیمارهای ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد پس از ۱۲۰ دقیقه بدون اعمال میدان مغناطیس بهترتیب ۴۳/۷، ۳۳/۳ میدان مغناطیس از صفر تا ۱۳۰ میلی تسلا مقادیر نرخ تبخیر بهترتیب میدان مغناطیس از صفر تا ۱۳۰ میلی تسلا مقادیر نرخ تبخیر بهترتیب میدان مغناطیس از صفر تا ۱۳۰ میلی تسلا مقادیر نرخ تبخیر بهترتیب میدان مغناطیس از صفر تا ۱۳۰ میلی تسلا مقادیر نرخ تبخیر بهترتیب میدان مغناطیس از مور آزمایش بود که پس از اعمال میدان مغناطیس می مرخ تبخیر با اعمال میدان مغناطیس مود. نهایتا مدلی پیشنهاد گردید که بهخوبی این روند را پیش بینی کرده و مدلی پیشنهاد گردید که بهخوبی این روند را پیش بینی کرده و محرفی هر یک از تیمارها نیز نشان داد که میدان مغناطیس میتواند انرژی مصرفی کل برای تبخیر آب را مورد تاثیر قرار داده و موجب

بهینه شدن مصرف انرژی گردد، به طوری که در تیمار ۳۰ درجه سانتیگراد ۱۴/۶٪ در ۵۰ درجه سانتیگراد ۲۶/۵۵٪ و در ۷۰ درجه سانتیگراد ۲۲/۵٪ کاهش انرژی مصرفی نسبت به نمونه شاهد مشاهده گردید. با توجه به شرایط آزمایشگاهی این پژوهش، پیشنهاد میشود اثر میدانهای مغناطیس قویتر (بالاتر از ۱۳۰ میلیتسلا) و تأثیر رطوبت نسبی محیط نیز در پژوهشهای آینده بررسی شود.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر مربوط به طرح پژوهشی شماره ۳ و کد ۶۰۹۹۳ تصویب شده در دانشگاه فردوسی مشهد می باشد که بدین وسیله از زحمات آقای دکتر محمد فرخاری (دانشیار اصلاح نباتات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان) و آقای دکتر امید دوستی ایرانی دانش آموخته گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد قدردانی می گردد. مدیریت، مفهومسازی، روششناسی، مشاوره فنی حسن صدرنیا: اعتبارسنجی، ویـرایش مـتن، نظـارت و مـدیریت، مفهومسازی، روش شناسی، مشاوره فنی مشاركت نويسندگان

حمید محمدی نژاد: جمع آوری دادهها، پردازش دادهها، تحلیل آماری، خدمات نرمافزاری، تصویر سازی نتایج، تهیه متن اولیه

محمدحسين أق خاني: اعتبارسنجي، ويرايش متن، نظارت و

References

- 1. Amor, H. B., Elaoud, A., Salah, N. B., & Elmoueddeb, K. (2017). Effect of magnetic treatment on surface tension and water evaporation. *International Journal of Advance Industrial Engineering*, 5(03). https://doi.org/10.14741/Ijae/5.3.4
- 2. Beiranvand, R. (2013). Analyzing the uniformity of the generated magnetic field by a practical one-dimensional Helmholtz coils system. *Review of Scientific Instruments*, 84(7). https://doi.org/10.1063/1.4813275
- Chang, K. T., & Weng, C. I. (2006). The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. *Journal of Applied Physics*, 100(4). https://doi.org/10.1063/1.2335971
- 4. Chibowski, E., Szcześ, A., & Hołysz, L. (2018). Influence of magnetic field on evaporation rate and surface tension of water. *Colloids and Interfaces*, 2(4), 68. https://doi.org/10.3390/colloids2040068
- Dueñas, J. A., Weiland, C., García-Selfa, I., & Ruíz-Rodríguez, F. J. (2021). Magnetic influence on water evaporation rate: an empirical triadic model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 539, 168377. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168377
- 6. Gąstoł, M., & Błaszczyk, U. (2024). Effect of magnetic field and UV-C radiation on postharvest fruit properties. *Agriculture*, 14(7), 1167. https://doi.org/10.3390/agriculture14071167
- Guo, Y. Z., Yin, D. C., Cao, H. L., Shi, J. Y., Zhang, C. Y., Liu, Y. M., ... & Shang, P. (2012). Evaporation rate of water as a function of a magnetic field and field gradient. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(12), 16916-16928. https://doi.org/10.3390/ijms131216916
- Hosoda, H., Mori, H., Sogoshi, N., Nagasawa, A., & Nakabayashi, S. (2004). Refractive indices of water and aqueous electrolyte solutions under high magnetic fields. *The Journal of Physical Chemistry A*, 108(9), 1461-1464. https://doi.org/10.1021/jp0310145
- 9. Krems, R. V. (2004). Breaking van der Waals molecules with magnetic fields. *Physical Review Letters*, 93(1), 013201. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.013201
- Min, D., Zhou, W., Qing, Y., Luo, F., & Zhu, D. (2017). Greatly enhanced microwave absorption properties of highly oriented flake carbonyl iron/epoxy resin composites under applied magnetic field. *Journal of Materials Science*, 52, 2373-2383. https://doi.org/10.1007/s10853-016-0532-1
- 11. Nakagawa, J., Hirota, N., Kitazawa, K., & Shoda, M. (1999). Magnetic field enhancement of water vaporization. *Journal of applied physics*, 86(5), 2923-2925. https://doi.org/10.1063/1.371144
- 12. Nieves, F. J., Bayón, A., & Gascón, F. (2019). Optimization of the magnetic field homogeneity of circular and conical coil pairs. *Review of Scientific Instruments*, 90(4). https://doi.org/10.1063/1.5079476
- 13. Otsuka, I., & Ozeki, S. (2006). Does magnetic treatment of water change its properties. *The Journal of Physical Chemistry B*, *110*(4), 1509-1512. https://doi.org/10.1021/jp056198x
- 14. Rashid, F. L., Hassan, N. M., Mashot, J. A., & Hashim, A. (2013). Increasing water evaporation rate by magnetic field. *International Science and Investigation Journal*, 2(3), 61-68.
- Saqib, M., Francis, S. N., & Francis, J. N. (2020, March). Design and development of Helmholtz coils for magnetic field. In 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/REEPE49198.2020.9059109
- Seyfi, A., Afzalzadeh, R., & Hajnorouzi, A. (2017). Increase in water evaporation rate with increase in static magnetic field perpendicular to water-air interface. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 120, 195-200. https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.06.009
- 17. Toledo, E. J., Ramalho, T. C., & Magriotis, Z. M. (2008). Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models. *Journal of Molecular Structure*, 888(1-3), 409-415. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.01.010
- 18. Wang, Y., Wei, H., & Li, Z. (2018). Effect of magnetic field on the physical properties of water. *Results in Physics*, 8, 262-267. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.022