



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر آب مغناطیسی شده بر رشد جودوسر و سیتیک خشک شدن جوانه‌های آن برای استفاده در فرمولاسیون محصولات فاقد گلوتن

کیمیا ثمری^۱، فخرالدین صالحی^{۲*}، اکبر علی‌وردی^۳، امیر دارایی گرمه‌خانی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
۳- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
۴- دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده فنی و منابع طبیعی تویسرکان، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۸

کلمات کلیدی:

آبگیری مجدد،

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت،

مدل میدیلی،

میدان مغناطیسی.

DOI:10.22034/FSCT.22.163.190.

* مسئول مکاتبات:

F.Salehi@basu.ac.ir

یکی از روش‌های پیشنهادشده در کشاورزی برای مصرف بهینه آب، عبور دادن آب آبیاری از یک میدان مغناطیسی است. استفاده از این آب مغناطیسی‌شده باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی دانه‌ها و افزایش تولید محصول می‌شود. جودوسر جوانه‌زده محصولی فاقد گلوتن و حاوی انواع ویتامین‌ها و مواد مغذی است و از پودر آن می‌توان برای افزایش کیفیت مواد غذایی مختلف استفاده کرد. در این پژوهش اثرات آب تیمارنشده، آب مغناطیسی‌شده و میدان مغناطیسی بر رشد جودوسر و سیتیک خشک شدن جوانه‌های آن بررسی و مدل‌سازی شد. جهت مغناطیسی کردن آب و تهیه آب مغناطیسی شده از دستگاه تولیدکننده آب مغناطیسی-قلیایی استفاده شد. اثر تیمارهای مختلف بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های جودوسر هنگام خشک شدن محاسبه و آبگیری مجدد جوانه‌های خشک‌شده آنها اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش نشان داد که قرارگیری دانه‌های جودوسر درون آب مغناطیسی‌شده و میدان مغناطیسی باعث افزایش وزن آنها هنگام خیساندن و همچنین افزایش سرعت رشد آنها می‌شود. جوانه‌های جودوسر رشد کرده در میدان مغناطیسی به دلیل رطوبت بالاتر، با سرعت بیشتری رطوبت خود را از دست دادند و سریعتر خشک شدند. متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه‌شده برای جوانه‌های جودوسر رشد کرده با آب تیمارنشده، آب مغناطیسی‌شده و میدان مغناطیسی به ترتیب برابر $7/31 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ، $9/14 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $15/22 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود. جهت مطالعه سیتیک خشک شدن جوانه‌های جودوسر، مدل‌های ریاضی مختلفی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش و در مجموع مدل میدیلی بر اساس بالاترین برازش و کمترین خطا به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. آبگیری مجدد محاسبه‌شده برای جوانه‌های جودوسر رشد کرده با آب تیمارنشده، آب مغناطیسی‌شده و میدان مغناطیسی به ترتیب برابر ۱۸۲/۹۳ درصد، ۱۸۴/۴۰ درصد و ۱۶۷/۲۷ درصد بود.

۱-مقدمه

بیماری سلیاک یک بیماری مادام‌العمر روده‌ای است که در اثر عوامل محیطی و ژنتیکی ایجاد شده و در نتیجه مصرف پروتئین گلوتن در این افراد پوشش مخاطی روده کوچک آسیب‌دیده و موجب کاهش جذب مواد مغذی ضروری مانند پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، ویتامین‌های محلول در چربی، آهن و کلسیم می‌گردد. تنها راه درمان این بیماری استفاده از یک رژیم غذایی بدون گلوتن در تمام طول عمر است [۱]؛ بنابراین تولید محصولات بدون گلوتن یکی از اولویت‌های بخش صنعت غذا جهت کمک به این افراد است. از جودوسر خشک‌شده و پودر تهیه شده از آن می‌توان در فرمولاسیون محصولات فاقد گلوتن استفاده کرد [۲].

جودوسر یا یولاف بانام علمی *Avena sativa* گیاهی است از خانواده گندمیان که دارای گل‌های ریز است و به دلیل شکل ظاهری باریک و بسیار کشیده و از دو طرف یکسان به این نام شناخته می‌شود. استفاده از جودوسر در رژیم غذایی تأثیرات مثبتی بر سلامتی انسان دارد. جودوسر حاوی پروتئین فاقد گلوتن و مقدار زیادی فیبر (به‌ویژه محتوای بتاگلوکان) است که می‌تواند به پایین نگه‌داشتن کلسترول خون، قند خون و انسولین کمک کند [۳، ۴]. جودوسر حاوی ویتامین‌های گروه B ازجمله بیوتین، نیاسین، پنتونیک اسید و املاح معدنی به‌خصوص منیزیم است که یک ترکیب ضروری در عملکرد آنزیم‌ها و تولید انرژی است [۵]. با توجه به نتایج پژوهش اکستروم و همکاران (۲۰۱۷) گلوکان‌های موجود در جودوسر برای استفاده در پخت مناسب هستند و جودوسر پتانسیل جالبی برای استفاده در هنگام تنظیم نمایه گلیسمی محصولات نان دارد [۶].

استفاده از غلات جوانه‌زده در رژیم غذایی افراد به دلیل ارزش تغذیه‌ای و محتوای فیتوشیمیایی آنها افزایش یافته است. این محصولات جوانه‌زده به‌طور چشمگیری طی مدت جوانه‌زنی حاوی منابع غذایی ارزشمندی می‌شوند. این ترکیبات مغذی شامل ویتامین‌ها و ترکیبات ثانویه می‌باشد که عوامل ضد تغذیه‌ای این محصولات را کاهش می‌دهند [۷]. ظهور و همکاران (۲۰۲۱) تأیید کردند که طی فرآیند

جوانه‌زنی میزان فیبرها، ویتامین‌ها و املاح لوبیای سویا افزایش و فعالیت آنزیم‌های بازدارنده تیرپسین و فیتاز در آن کاهش می‌یابد. جودوسر جوانه‌زده هم محصولی ارزشمند برای مغذی کردن مواد غذایی به شمار می‌آید [۸]. در پژوهشی کائو و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر جایگزینی آرد جودوسر جوانه‌زده بر بافت و قابلیت هضم نشاسته در شرایط آزمایشگاهی نان گندم را بررسی کرده و عنوان کردند که پلی‌فنل‌ها و اسید بوتیریک محصول افزایش یافته و فرآیند جوانه زدن، پتانسیل تهیه نان مغذی باقابلیت هضم بالا را دارد [۹].

آب نقش مهمی در سلامتی و درمان بسیاری از بیماری‌ها و تسکین دردها نظیر کاهش تشنجات عضلانی، افزایش حرکت، جنب‌وجوش مفاصل و افزایش گردش خون دارد. در صورتی که آب در معرض میدان مغناطیسی که دارای قطب مثبت و منفی است قرار گیرد، مولکول‌های آن مغناطیسی می‌شوند [۱۰]. این موضوع سبب خارج شدن مولکول‌های آب از بی‌نظمی شده و ضمن تشکیل خوشه‌های کوچک‌تر آب، سبب افزایش تعداد خوشه‌ها در واحد حجم و افزایش قدرت حلالیت آب می‌شود [۱۱]. آب مغناطیسی به دلیل ساختار شش‌ضلعی خود می‌تواند تأثیرات خوبی بر مواد غذایی داشته باشد. ازجمله اثر میدان مغناطیسی بر برخی خواص آب می‌توان به کاهش کشش سطحی آب، افزایش pH، افزایش ویسکوزیته و کاهش تشکیل رسوب اشاره کرد [۱۲]. استفاده از این آب باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی و افزایش تولید محصول می‌شود [۱۳]. تأثیر آبیاری با آب مغناطیسی شده بر همزیستی بین سویا و ریزوبیوم توسط علی‌وردی و همکاران (۲۰۲۱) بررسی و این‌گونه بیان شده که این فناوری سبب خروج سریع‌تر گیاه چه از خاک می‌شود و می‌تواند وزن خشک اندام هوایی و ریشه، محتوای نیتروژن اندام هوایی و ریشه، تعداد و وزن گره‌های باکتریایی، تعداد غلاف، وزن صد دانه و عملکرد بوته را افزایش دهد [۱۳]. بودلسنی و همکاران (۲۰۰۴) گزارش دادند که قرار دادن دانه لوبیا در معرض میدان مغناطیسی قبل از کاشت می‌تواند اثر قابل توجهی بر جوانه‌زنی بذر و عملکرد آن داشته باشد [۱۴].

در پژوهش دیگری، اثر آب مغناطیسی بر چهار نوع آب شامل شهری، دیونیزه، باران و مقطر بررسی شد. تأثیر این آب‌های مغناطیسی شده بر سرعت جوانه‌زنی بذر گندم و جو نشان داد که آب دیونیزه مغناطیسی به‌طور قابل‌توجهی وزن‌تر ریشه در گندم و سرعت جوانه‌زنی در جو را افزایش می‌دهد. آب شهری مغناطیسی شده وزن‌تر اندام هوایی و وزن‌تر ریشه گیاهچه را در گندم افزایش ولی وزن خشک اندام هوایی و شاخص بینه گیاهچه را در جو کاهش داد [۱۵]. از اهمیت آب مغناطیسی در درمان بیماری‌ها می‌توان به نقش آن در درمان دیابت اشاره کرد. از آنجایی که بیماران دیابتی از مشکل استرس‌های اکسیداتیو رنج می‌برند، آب مغناطیسی می‌تواند باعث کاهش فشار اکسیداتیو شده و در درمان بیماری دیابت مؤثر باشد [۱۶].

در این پژوهش، ابتدا اثر آب تیمارنشده، آب مغناطیسی و میدان مغناطیسی بر رشد جودوسر بررسی و سپس سیستیک خشک شدن جودوسر جوانه‌زده در خشک‌کن هوای داغ بررسی می‌شود. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نیز محاسبه و گزارش می‌شود. سپس معادله‌های سیستیکی مختلف روی داده‌های نسبت رطوبت بررسی و بهترین مدل برای بررسی سرعت خشک شدن جودوسر جوانه‌زده با آب تیمارنشده، آب مغناطیسی شده و میدان مغناطیسی گزارش می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه جودوسر جوانه‌زده

در ابتدا بذر جودوسر (*Avena sativa* L.) از شرکت پاکان بذر اصفهان (اصفهان، ایران) تهیه شد. بعد از تمیز کردن و

جداسازی ضایعات، دانه‌ها شسته و در آب تیمارنشده، آب مغناطیسی شده و آبی که در میدان مغناطیسی قرار داشت، با دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت، خیسانده شدند (شکل ۱). جهت مغناطیسی کردن آب و تهیه آب مغناطیسی شده از دستگاه تولیدکننده آب مغناطیسی-قلیایی (مدل دوقطبی، شرکت مغناطیس سازان حیات، ایران) استفاده شد (شکل ۲). برای تهیه آب مغناطیسی شده، ۲ لیتر آب شهری داخل ظرفی از جنس پلی‌اتیلن ریخته شد و ظرف آب به مدت ۲ ساعت داخل دستگاه قرار داده شد. میزان میدان مغناطیسی دستگاه و آب مغناطیسی شده توسط دستگاه مغناطیس سنج (TES-3196، تایوان) اندازه‌گیری شد (شکل ۳). شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط دستگاه ۲/۸ گوس، شدت میدان مغناطیسی آب داخل دستگاه ۱/۴ گوس و مقدار میدان مغناطیسی آب مغناطیسی شده (خارج دستگاه) ۰/۶ گوس بود. در مرحله بعد، آب اضافی دانه‌های پوست‌گیری شده حذف شد و درون یک ظروف مسطح ریخته شدند و روی آن‌ها توسط حوله نازک نم‌دار پوشانده شد. در مرحله جوانه‌زنی، برای گروه اول از آب تیمارنشده و برای گروه دوم از آب مغناطیسی شده برای جوانه زدن دانه‌ها استفاده شد و برای گروه سوم، دانه‌ها طی مدت جوانه‌زنی به‌صورت کامل همراه با ظرف و حوله، داخل میدان مغناطیسی قرار گرفتند. در مجموع، دانه‌ها برای جوانه‌زنی به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند.



Figure 1- Soaking, peeling, and sprouting steps



Figure 2- Device for producing magnetized water



Figure 3- Gauss meter (digital magnetic field detector)

۲-۲- اندازه گیری تغییرات وزنی دانه ها

بعد از پایان ۲۴ ساعت خیساندن دانه ها و پوست گیری آن ها، وزن دانه های پوست گیری شده و پوست آن ها با ترازوی دیجیتالی (GM-300p، لوترون، تایوان) با دقت ± 0.01 گرم ثبت گردید. بعد از جوانه زدن نیز وزن دانه ها اندازه گیری شد. برای اندازه گیری رطوبت جو دوسر تازه و جوانه زده از ترازوی رطوبت سنج (DBS 60-3، کرن، آلمان) استفاده شد.

۲-۳- خشک کردن جو دوسر جوانه زده

برای خشک کردن دانه های جو دوسر جوانه زده با آب تیمار نشده، آب مغناطیسی شده و میدان مغناطیسی، از آون فن دار (شیماز، ایران) در دمای 70°C درجه سلسیوس استفاده شد. وزن نمونه ها هر ۵ دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ± 0.01 گرم تا رسیدن به وزن ثابت اندازه گیری شد.

۲-۴- محاسبه پارامتر نسبت رطوبت

کاهش محتوای رطوبت جوانه های جو دوسر، بر مبنای خشک در برابر زمان خشک کردن رسم و تأثیر شرایط مختلف جوانه زنی بر آنها مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر نسبت رطوبت^۱ (MR) از طریق معادله ۱، محاسبه گردید [۱۷].

(۱)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

در این معادله، MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t محتوای رطوبت بر مبنای خشک در هر زمان t (گرم آب بر گرم ماده خشک)، M_0 محتوای رطوبت اولیه بر مبنای خشک و M_e محتوای رطوبت تعادلی (گرم آب بر گرم ماده خشک) است. برای زمان های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_0 و M_t بسیار کوچک می باشد؛ بنابراین می توان

1- Moisture ratio (MR)

خشک کردن و به دست آوردن ثلثت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب و ویرایش R2012a استفاده شد.

۲-۷- آبیگری مجدد جوانه‌های جودوسر خشک‌شده

برای محاسبه پارامتر آبیگری مجدد، ۵ گرم از جوانه‌های جودوسر خشک‌شده توزین و درون آب با دمای ۵۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور شدند. نمونه‌ها بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از آب خارج‌شده و توزین شدند. نسبت باز جذب آب توسط معادله ۴ محاسبه و گزارش شد.

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (4)$$

در این معادله M وزن جوانه‌های جودوسر بعد از باز جذب آب و M_0 وزن جوانه‌های جودوسر خشک می‌باشد.

۲-۸- آنالیز آماری

نتایج به دست آمده از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آزمون‌های خشک کردن در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات وزن و رطوبت دانه‌های جودوسر طی

فرآیند خیساندن و جوانه زدن

وزن جودوسر خشک استفاده شده در این مرحله برای هر تکرار، ۱۰ گرم بود. میانگین درصد رطوبت بذر جودوسر استفاده شده ۳/۷ درصد و جودوسر پوست‌کنده خیس‌خورده در آب تیمارنشده ۳۶/۴ درصد بود. طی فرآیند خیساندن بذر جودوسر با آب تیمارنشده، آب مغناطیسی‌شده و در میدان مغناطیسی، بذرها به ترتیب برابر ۵۸/۸۰، ۸۰/۳۰ و ۸۵/۱۰ درصد وزن اولیه خود، آب جذب کردند.

معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت معادله ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست.

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2)$$

۲-۵- محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

مدل نظری استفاده شده برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت^۲ جوانه‌های جودوسر بر اساس قانون دوم نفوذ فیک^۳ و با استفاده از مختصات کروی^۴ بود. برای حل معادله فیک، ابتدا فرض شد که (۱) خروج رطوبت تنها به روش نفوذ بوده، (۲) چروکیدگی حجمی قابل چشم‌پوشی است، (۳) دما در طی فرآیند ثابت است و (۴) ضرایب نفوذ در طی فرآیند ثابت باقی می‌ماند؛ سپس از معادله ۳ برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت استفاده شد [۱۸].

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (3)$$

در این معادله‌ها، r شعاع جودوسر جوانه‌زده (m)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ($m^2 s^{-1}$)، n اعداد صحیح مثبت، t زمان خشک شدن (s) و $Slope$ شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی ($\ln MR$) در مقابل زمان خشک کردن می‌باشد.

۲-۶- مدل‌سازی سینتیکی

به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن جوانه‌های جودوسر، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف خشک کردن، مدل‌سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پابیس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی، لگاریتمی و درجه دوم، برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن جوانه‌های جودوسر و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند [۱۹]. به منظور مدل کردن داده‌های تجربی

4- Spherical coordinate

2- Effective moisture diffusivity coefficient (D_{eff})

3- Fick's second law of diffusion

سرعت خشک شدن یک پارامتر مهم است که بر فرآیند خشک کردن تأثیر می‌گذارد و ویژگی‌های خشک کردن مواد مرطوب نیز با منحنی‌های سرعت خشک شدن مشخص می‌شوند. از نظر تعریف، سرعت خشک شدن مقدار آب حذف شده در واحد زمان است [۲۰]. شکل ۴ افت رطوبت جوانه‌های جودوسر رشد کرده در محیط‌های مختلف (آب تیمارنشده، آب مغناطیسی شده و میدان مغناطیسی) هنگام خشک شدن در خشک‌کن هوای داغ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، جوانه‌های جودوسر رشد کرده در میدان مغناطیسی با سرعت بیشتری رطوبت خود را از دست می‌دهند. میدان مغناطیسی باعث افزایش مقدار رطوبت محصول در مرحله خیساندن شد؛ علاوه بر این باعث افزایش سرعت رشد دانه‌ها هم گردید. در نتیجه جوانه‌های رشد کرده در این شرایط، رطوبت بیشتری داشته و سریعتر هم رطوبت خود را از دست دادند.

بعد فرآیند جوانه‌زنی، مجدد وزن جوانه‌های جودوسر رشد کرده اندازه‌گیری شد. درصد افزایش وزن جوانه‌های رشد کرده در حضور آب تیمارنشده، آب مغناطیسی شده و در میدان مغناطیسی، به ترتیب برابر $۷۶/۶۰$ ، $۹۳/۳۳$ و $۱۱۴/۸۳$ درصد (نسبت به وزن اولیه بذر)، بود. قراردادن بذره‌های جودوسر درون آب مغناطیسی شده باعث افزایش سرعت رشد آن‌ها شد. البته سرعت رشد دانه‌هایی که درون میدان مغناطیسی قرار داشتند بیشتر بود و اختلاف معناداری بین این تیمار با دو تیمار دیگر وجود داشت. در مجموع، آب مغناطیسی شده که به طور پیوسته در میدان مغناطیسی قرار داشت، باعث افزایش بیشتر وزن دانه‌های خیس خورده و افزایش سرعت رشد جوانه‌های جودوسر شد.

۲-۳- افت رطوبت دانه‌های جودوسر هنگام خشک شدن

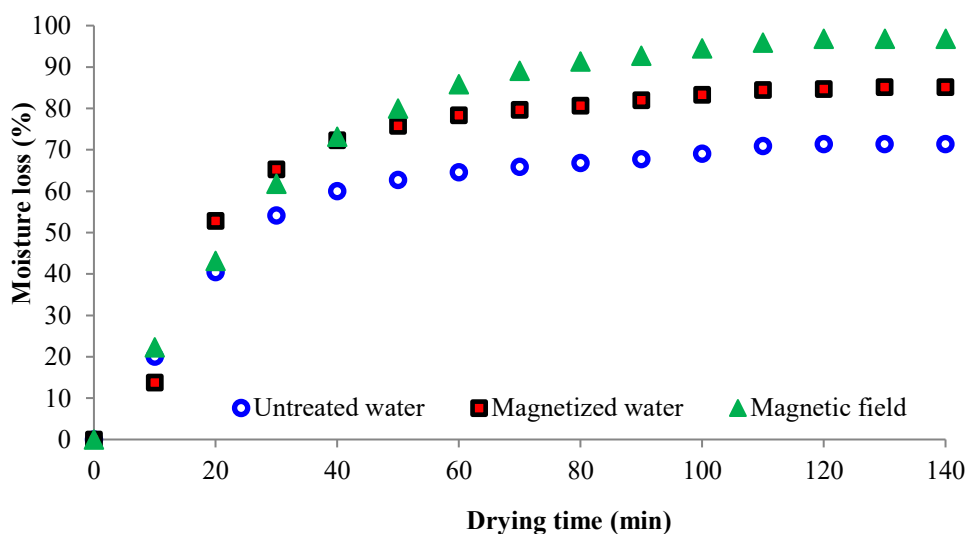


Figure 4- Effect of experimental treatments on the moisture loss rate of sprouted oats during drying in the hot-air dryer

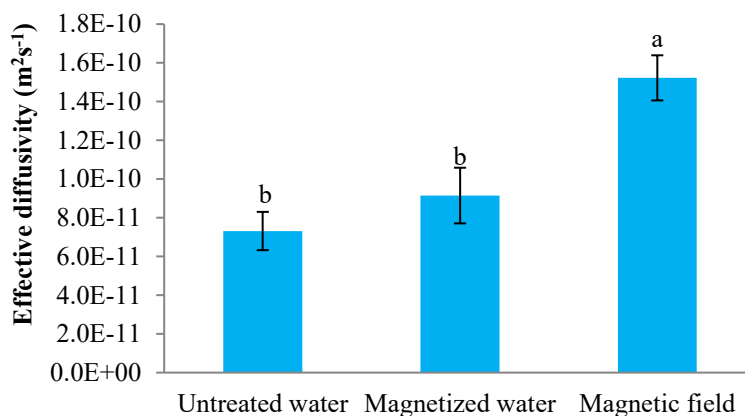
رطوبت جوانه‌های جودوسر رشد کرده با آب تیمارنشده، آب مغناطیسی شده و میدان مغناطیسی هنگام خشک شدن در خشک‌کن هوای داغ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، جوانه‌های جودوسر رشد کرده در میدان مغناطیسی با سرعت بیشتری رطوبت خود را از دست می‌دهند و مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای این جوانه‌ها بیشتر است. جوانه‌های رشد کرده در حضور میدان مغناطیسی رطوبت

۳-۳- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

بسته به روش انتقال حرارت اعمال شده، خشک‌کن‌ها روش‌ها و طرح‌های مختلفی برای گرم کردن محصول و خروج رطوبت از آن دارند. در اکثر روش‌های خشک کردن، حرارت ابتدا به سطح خارجی ماده مرطوب و سپس به داخل آن منتقل می‌شود [۲۰]. شکل ۵ ضریب نفوذ مؤثر

که نشان می‌دهد ضریب نفوذ مؤثر رطوبت گندم جوانه‌زده کمی بیشتر از جودوسر جوانه‌زده است [۱۸]. در پژوهش دیگری صالحی و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر پیش‌تیمار فراصوت بر سرعت خشک شدن جوانه‌های عدس در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ را بررسی کردند. متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه‌شده برای جوانه‌های عدس قرار گرفته در خشک‌کن هوای داغ برابر $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و برای خشک‌کن فروسرخ برابر $3.76 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود [۲۱].

بیشتری دارند و رطوبت خود را هم با سرعت بیشتری از دست می‌دهند. متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه‌شده برای جوانه‌های جودوسر رشد کردن با آب تیمارنشده، آب مغناطیسی‌شده و میدان مغناطیسی به ترتیب برابر $7.31 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ، $9.14 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $1.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود. از نظر آماری اختلاف معناداری بین مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های رشد کرده در آب تیمارنشده و آب مغناطیسی‌شده نبود ($p > 0.05$). امین‌اخلاص و همکاران (۲۰۲۳) متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت گندم جوانه‌زده هنگام خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس را برابر $1.65 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ گزارش کردند



Experimental treatments

Figure 5- Effect of experimental treatments on the effective moisture diffusivity coefficient of oat sprouts
Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$).

مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این ۸ مدل در جدول ۱ گزارش شده است. در این جدول ضرایب مدل‌ها و خطای محاسبه شده برای هر یک از مدل‌ها نیز گزارش شده است. بهترین مدل می‌بایست دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (r) و حداقل مقادیر خطا باشد. نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک کردن جوانه‌های جودوسر، مدل میدیلی است. در جدول ۲ مجموع مربعات خطا^۵ (SSE)، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا^۶ (RMSE) و همچنین ضرایب ثابت مدل میدیلی ارائه شده است. لذا استفاده از مدل میدیلی برای بررسی فرآیند خشک کردن جوانه‌های جودوسر رشد

۴-۳- انتخاب بهترین مدل سیتیکی

یکی از روش‌های خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده از هوای داغ و آون است که باعث کاهش رطوبت و فعالیت آبی محصول شده و از رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری می‌کند [۲۰، ۲۲]. با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه در طی فرآیند خشک کردن جوانه‌های جودوسر و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به وسیله مدل‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پایس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی، لگاریتمی و درجه دوم، نتایج برای هر مدل

6- Root mean square error (RMSE)

5- Sum of squares due to error (SSE)

کرده با آب تیمارنشده، آب مغناطیسی شده و میدان مغناطیسی، توصیه می شود. در پژوهشی سینتیک خشک شدن گندم جوانه زده در دو خشک کن هوای داغ (با دمای ۷۰ درجه سلسیوس) و فروسرخ (توان ۲۵۰ وات) توسط امین اخلاص و همکاران (۲۰۲۳) بررسی شد. این پژوهشگران مدل پیچ را برای بررسی تغییرات نسبت

رطوبت گندم جوانه زده هنگام خشک شدن را توصیه کرده اند [۱۸].

Table 1- Calculated statistical parameters to verify the agreement of each mathematical model with the moisture ratio (MR) data

Model name	Wang and Singh	Henderson and Pabis	Approximation of diffusion	Page
Model equation	$MR=1+at+bt^2$	$MR= a\exp(-kt)$	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kbt)$	$MR=\exp(-kt^n)$
Model constants	$a=-0.0199$ $b=0.000097$	$a=1.022$ $k=0.0314$	$a=1$ $k=0.0309$ $b=-1.477$	$k=0.0242$ $n=1.065$
SSE ¹	0.0548	0.0041	0.0043	0.0037
r	0.9573	0.9968	0.9966	0.9971
RMSE ²	0.0649	0.0178	0.0189	0.0169

1- SSE: Sum of squares due to error; 2- RMSE: Root mean square error

Table 1- Continued from previous table

Model name	Newton	Midilli	Logarithmic	Quadratic
Model equation	$MR=\exp(-kt)$	$MR=a\exp(-kt^n)+bt$	$MR=a\exp(-kt)+c$	$MR=a+bx+cx^2$
Model constants	$k=0.0307$	$a=1.005$ $k=0.0198$ $n=1.135$ $b=0.0002$	$a=1.016$ $k=0.0323$ $c=0.0097$	$a=0.9165$ $b=-0.0176$ $c=0.00008$
SSE ¹	0.0048	0.0013	0.0038	0.0398
r	0.9963	0.9990	0.9970	0.9690
RMSE ²	0.0185	0.0109	0.0178	0.0576

1- SSE: Sum of squares due to error; 2- RMSE: Root mean square error

Table 2- The constants and coefficients of the Midilli model

Experimental treatments	a	k	n	b	SSE ¹	r	RMSE ²
Untreated water	1.0117	0.0363	0.9533	0.0014	0.0068	0.9955	0.0245
Magnetized water	1.0283	0.0260	1.1029	0.0012	0.0258	0.9870	0.0482
Magnetic field	1.0067	0.0257	1.0747	0.0004	0.0019	0.9992	0.0128

1- SSE: Sum of squares due to error; 2- RMSE: Root mean square error

برای بررسی توانایی مدل میدیلی، مقادیر نسبت رطوبت پیش بینی شده توسط این مدل و مقادیر نسبت رطوبت تجربی به دست آمده، در شکل ۶ کنار یکدیگر قرار گرفته اند. همان طوری که در این شکل مشاهده می شود، انطباق خوبی بین نسبت رطوبت تجربی و پیش بینی شده توسط مدل میدیلی وجود دارد؛ بنابراین، این مدل برای پیش بینی تغییرات نسبت رطوبت جوانه های جودوسر مناسب می باشد.

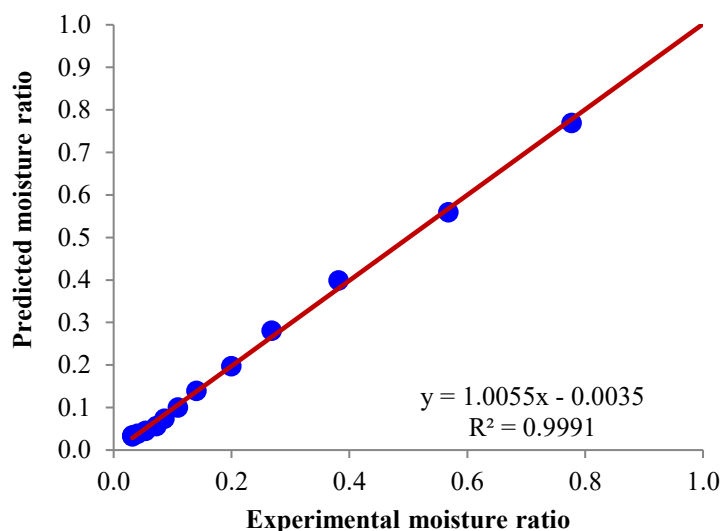


Figure 6- Comparison of fitted data by Midilli model with experimental results of moisture ratio.

مقادیر آبیگری مجدد جوانه‌های رشد کرده با آب تیمارنشده و آب مغناطیسی‌شده نبود ($p > 0.05$). امین‌اخلاص و همکاران (۲۰۲۳) آبیگری مجدد گندم جوانه‌زده خشک‌شده در دمای ۷۰ درجه سلسیوس را در محدوده ۲۱۴/۴۶ درصد تا ۲۱۸/۲۱ درصد گزارش کردند که نشان می‌دهد آبیگری مجدد گندم جوانه‌زده خشک بیشتر از جودوسر جوانه‌زده خشک است [۱۸]. در پژوهشی صالحی و همکاران (۲۰۲۴) آبیگری مجدد جوانه‌های عدس خشک شده در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که آبیگری مجدد جوانه‌های عدس خشک‌شده در خشک‌کن هوای داغ بیشتر از خشک‌کن فروسرخ است و متوسط آبیگری مجدد جوانه‌های عدس خشک‌شده در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ به ترتیب ۳۰۴/۵۲ درصد و ۲۲۶/۲۷ درصد بود [۲۱].

۳-۵- آبیگری مجدد

شکل ۷ آبیگری مجدد جوانه‌های خشک‌شده جودوسر رشد کرده در شرایط مختلف (آب تیمارنشده، آب مغناطیسی‌شده و میدان مغناطیسی) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، جوانه‌های خشک‌شده جودوسر رشد کرده در میدان مغناطیسی به صورت معناداری آبیگری مجدد کمتری نسبت به دو نمونه دیگر دارند ($p < 0.05$). این موضوع می‌تواند به دلیل خروج سریع‌تر رطوبت از این جوانه‌ها هنگام خشک‌کردن باشد که در نتیجه آن بخشی از لوله موینه‌های داخلی و حفرات سطحی دانه‌ها آسیب دیده و جمع شده و باعث کاهش ظرفیت آبیگری مجدد دانه خشک می‌شود. متوسط آبیگری مجدد محاسبه‌شده برای جوانه‌های جودوسر رشد کرده با آب تیمارنشده، آب مغناطیسی‌شده و میدان مغناطیسی به ترتیب برابر ۱۸۲/۹۳ درصد، ۱۸۴/۴۰ درصد و ۱۶۷/۲۷ درصد بود. از نظر آماری اختلاف معناداری بین

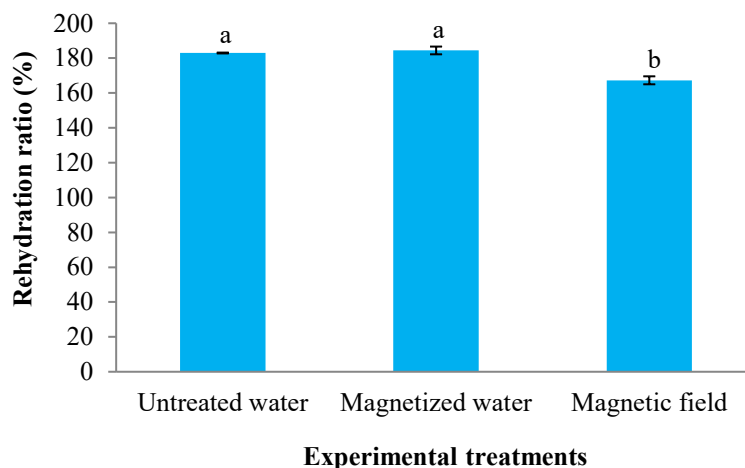


Figure 7- Effect of experimental treatments on the rehydration ratio (%) of dried sprouted oats.

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$).

استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن جوانه‌های جودوسر رشد کرده با آب تیمارنشده، آب مغناطیسی شده و میدان مغناطیسی، توصیه می‌شود. بیشترین مقدار آبیگری مجدد محصول خشک مربوط به جوانه‌های رشد کرده در آب تیمارنشده و آب مغناطیسی شده بود؛ البته از نظر آماری اختلاف معناداری بین درصد آبیگری مجدد جوانه‌های رشد کرده در این دو نوع آب نبود ($p > 0.05$).

۵- تشکر و قدردانی

هزینه‌های انجام این پژوهش از محل پژوهانه به شماره ۴۰۲۱۷۴، تأمین شده از سوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا، پرداخت شده است. لذا نویسندگان از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا به خاطر حمایت مالی و معنوی از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر آب مغناطیسی شده و میدان مغناطیسی بر رشد جودوسر و سینتیک خشک شدن جوانه‌های آن مورد مطالعه قرار گرفت. جهت مغناطیسی کردن آب و تهیه آب مغناطیسی شده از دستگاه تولیدکننده آب مغناطیسی-قلیایی استفاده شد. سرعت رشد دانه‌هایی که درون میدان مغناطیسی قرار داشتند بیشتر بود و آب مغناطیسی همراه با میدان مغناطیسی باعث افزایش سرعت رشد و افزایش وزن دانه‌های خیس خورده و جوانه‌ها شد. جوانه‌های رشد کرده در حضور میدان مغناطیسی، رطوبت بیشتری داشتند و سریعتر هم رطوبت خود را از دست دادند. جوانه‌های جودوسر رشد کرده در میدان مغناطیسی با سرعت بیشتری رطوبت خود را از دست دادند و مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای این جوانه‌ها بیشتر بود. بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک کردن جوانه‌های جودوسر، مدل میدیلی بود و

۶- منابع

- [1] Jnawali, P., Kumar, V., Tanwar, B. 2016. Celiac disease: Overview and considerations for development of gluten-free foods, *Food Science and Human Wellness*. 5, 169-176.
- [2] Salehi, F. 2019. Improvement of gluten-free bread and cake properties using natural hydrocolloids: A review, *Food Science & Nutrition*. 7, 3391-3402.
- [3] Tomar, M., Singh, P. 2024. Oat (*Avena sativa*): Production to Plate, 1st Edition ed., CRC Press,
- [4] Sciarini, L. S., Bustos, M., Vignola, M. B., Paesani, C., Salinas, C., Perez, G. T. 2017. A study on fibre addition to gluten free bread: Its effects on bread quality and in vitro digestibility, *Journal of Food Science and Technology*. 54, 244-252.
- [5] Inglett, G. E., Chen, D., Liu, S. X. 2015. Physical properties of gluten-free sugar cookies made from amaranth-oat composites, *LWT - Food Science and Technology*. 63, 214-220.

- [6] Ekström, L. M., Bok, E. A. H., Sjöö, M. E., Östman, E. M. 2017. Oat β -glucan containing bread increases the glycaemic profile, *Journal of Functional Foods*. 32, 106-111.
- [7] Talebi Najaf Abadi, S., Sharifi, A., Absalan, A. A. 2020. Effect of germination process on nutritional value changes and some mung bean physicochemical properties, *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*. 8, 211-224.
- [8] Zahir, M., Fogliano, V., Capuano, E. 2021. Soybean germination limits the role of cell wall integrity in controlling protein physicochemical changes during cooking and improves protein digestibility, *Food Research International*. 143, 110254.
- [9] Cao, H., Wang, C., Li, R., Guan, X., Huang, K., Zhang, Y. 2022. Influence of sprouted oat flour substitution on the texture and in vitro starch digestibility of wheat bread, *Food Chemistry: X*. 15, 100428.
- [10] Holysz, L., Szczes, A., Chibowski, E. 2007. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions, *Journal of Colloid and Interface Science*. 316, 996-1002.
- [11] Pang, X., Deng, B. 2008. Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field, *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*. 51, 1621-1632.
- [12] Esmaeilnezhad, E., Choi, H. J., Schaffie, M., Gholizadeh, M., Ranjbar, M. 2017. Characteristics and applications of magnetized water as a green technology, *Journal of Cleaner Production*. 161, 908-921.
- [13] Aliverdi, A., Karami, S., Hamami, H. 2021. The effect of irrigation with magnetized water on the symbiosis between soybean and rhizobium, *Journal of Water and Soil*. 35, 95-106.
- [14] Podleśny, J., Pietruszewski, S., Podleśna, A. 2004. Efficiency of the magnetic treatment of broad bean seeds cultivated under experimental plot conditions, *International Agrophysics*. 18, 65-71.
- [15] Al-Akhras, M. A. H., Al-Quraan, N. A., Abu-Aloush, Z. A., Mousa, M. S., AlZoubi, T., Makhadmeh, G. N., Donmez, O., Al jarrah, K. 2024. Impact of magnetized water on seed germination and seedling growth of wheat and barley, *Results in Engineering*. 22, 101991.
- [16] Khudiar, K., Ali, A. M. 2012. Effect of magnetic water on some physiological aspects of adult male rabbits. in: Proceeding of the Eleventh Veterinary Scientific Conference, 120-126.
- [17] Salehi, F., Goharpour, K., Razavi Kamran, H. 2023. Effects of ultrasound and microwave pretreatments of carrot slices before drying on the color indexes and drying rate, *Ultrasonics Sonochemistry*. 101, 106671.
- [18] Amin Ekhlās, S., Pajohi-Alamoti, M. R., Salehi, F. 2023. Effect of ultrasonic waves and drying method on the moisture loss kinetics and rehydration of sprouted wheat, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 20, 159-168.
- [19] Salehi, F., Satorabi, M. 2021. Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums, *International Journal of Fruit Science*. 21, 519-527.
- [20] Khodadadi, M., Masoumi, A. 2025. Recent drying technologies used for drying poultry litter (principles, advantages and disadvantages): A comprehensive review, *Poultry Science*. 104, 104677.
- [21] Salehi, F., Razavi Kamran, H., Goharpour, K. 2024. Influence of ultrasonic pretreatment on the drying rate of lentil sprouts in hot-air and infrared dryers, *Food Research Journal*. 34, 31-43.
- [22] Khodadadi, M., Masoumi, A., Sadeghi, M. 2024. Drying, a practical technology for reduction of poultry litter (environmental) pollution: methods and their effects on important parameters, *Poultry Science*. 103, 104277.



Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage: www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Effect of magnetized water on oat growth and drying kinetics of its sprouts for use in gluten-free product formulation

Kimia Samary¹, Fakhreddin Salehi^{2*}, Akbar Aliverdi³, Amir Daraei Garmakhany⁴

¹ MSc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

^{2*} Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

³ Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

⁴ Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Resources, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2024/12/27

Accepted: 2025/1/27

Keywords:

Effective moisture diffusivity coefficient, Magnetic field, Midilli model, Rehydration.

DOI: 10.22034/FSCT.22.163.190.

*Corresponding Author E-

F.Salehi@basu.ac.ir

ABSTRACT

One of the methods proposed in agriculture for optimal water use is to pass irrigation water through a magnetic field. The use of this magnetized water promotes seed germination and increases crop yields. Sprouted oat is a gluten-free product that contains various vitamins and nutrients, and its powder can be used to improve the quality of various foods. In this study, the effects of untreated water, magnetized water, and magnetic field on the oat growth and drying kinetics of its sprouts were investigated and modeled. A magnetic-alkaline water generator was used to magnetize water and generate magnetized water. The effect of different treatment on the effective moisture diffusivity coefficient of oat sprouts during drying was calculated and the rehydration of their dried sprouts was measured. The results of this study showed that oat seeds placed in the magnetized water and magnetic field increased their weight when soaked and also grew faster. Oat sprouts grown in the magnetic field lost moisture faster and dried faster due to their higher moisture content. The average effective moisture diffusivity coefficients calculated for oat sprouts grown by untreated water, magnetized water, and magnetic field mediums were $7.31 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $9.14 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, and $15.22 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectively. To study the drying kinetics of oat sprouts, various mathematical models were fitted to the experimental data, and overall, the Midilli model was chosen as the best model due to the highest fit and lowest error. The calculated rehydration of oat sprouts grown by untreated water, magnetized water, and magnetic field mediums was 182.93%, 184.40%, and 167.27%, respectively.