

اندازه‌گیری دبی جرمی شلتوک با استفاده از حسگر خازنی و مدل سازی

آن با رگرسیون چندگانه، ANN و ANFIS

محمد طهماسبی^۱، عبدالله گل محمدی^۲، رضا طباطبایی کلور^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱/۲۶)

چکیده

اندازه‌گیری دبی جرمی با استفاده از حسگرهای خازنی به عنوان روش ارزان و سریع توسعه یافته است. اما پیش‌بینی دبی جرمی به علت وابستگی پاسخ حسگر به عوامل مختلف و پیچیدگی اثر این عوامل دشوار است؛ لذا در این مطالعه پتانسیل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم استنتاج فازی (ANFIS) و تکنیک‌های رگرسیون چندگانه (MR) برای پیش‌بینی دبی جرمی شلتوک با استفاده از سنسور خازنی مورد بررسی قرار گرفت. بسامد، رطوبت و ولتاژ خروجی به عنوان متغیرهای ورودی و دبی جرمی به عنوان خروجی در توسعه مدل‌ها به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که ANN دارای بالاترین ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی است ($R^2 = 0.927$). ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی برای ANFIS برابر با ($R^2 = 0.909$) است. نتایج نشان می‌دهد که تکنیک‌های ANN و ANFIS به طور بالقوه می‌تواند برای پیش‌بینی دبی جرمی محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: حسگر خازنی، دبی جرمی، شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون چندگانه و ANFIS

مقدمه

تاکنون روش‌های مختلفی برای سنجش آنی عملکرد محصول در مقاله‌های علمی گزارش شده است و برخی از آن‌ها نیز به صورت تجاری در دسترس قرار گرفته است که به صورت خلاصه عبارتند از: حسگر چرخ پره دار (Schnug *et al.*, 1993)، هلیس حمل‌کننده لولایی (Wagner & Schrock, 1989)، حسگرهای فرا صوتی (Klemme *et al.*, 1992)، حسگر نیروی ضربه‌ای (Nazemsadat & Loghavi, 2013)، حسگرهای الکترومغناطیسی (Arslan *et al.*, 2000) اما به علت پیچیدگی و هزینه بالا، امکان استفاده از آن‌ها به صورت تجاری به سختی امکان پذیر است. بنابراین باید به دنبال روشی غیر مخرب، ارزان و ساده بود؛ حسگرهای خازنی از این نظر ایده‌آل به نظر می‌رسد. ارتباط خواص دی‌الکتریک محصولات کشاورزی با بسیاری از مؤلفه‌های کمی و کیفی محصول، سرعت بالای اندازه‌گیری (Nelson, 2006)، هزینه کم و کارایی فراوان (Soltani *et al.*, 2011)، استفاده از آن را به عنوان یک فناوری جدید و غیر

مخرب سنجش طیف وسیعی از ویژگی‌های کیفی (Berbert *et al.*, 2002) و کمی (Kumhala *et al.*, 2009) محصولات کشاورزی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است و کاربردهای این روش در مقالات متعدد گزارش شده است (Venkatesh & Raghavan, 2005; Nelson, 2008). عملکرد حسگرهای خازنی بر اساس این واقعیت است که ثابت دی‌الکتریک مخلوط هوا و مواد بین دو صفحه موازی، با تغییر در مقدار و خصوصیات مواد تغییر می‌یابد و موجب تغییر در مقدار بار ذخیره شده بر روی این صفحات می‌گردد (Stafford *et al.*, 1996). اولین گزارش‌ها در این زمینه به حدود ۸۰ سال پیش بر می‌گردد که (Debye, 1929) طی تحقیقاتی به منظور تعیین محتوای رطوبتی غلات بر پایه اندازه‌گیری مقاومت دی‌الکتریک و استفاده از جریان مستقیم انجام داد. در سال‌های بعد جریان متناوب نیز توسط نلسون (Nelson, 2006) مورد استفاده قرار گرفت. ادامه تحقیقات در این زمینه منجر به پیدایش کاربردهای دیگری از این روش در کشاورزی شده است.

در پژوهش‌های (Lawrence *et al.*, 2001) Eubanks *et al.*, (2001)Lawrence *et al.*, (2001) و Osman *et al.*, (2002) از سنسورهای خازنی به

* نویسنده مسئول : agolmohammadi42@gmail.com

(Vakil- Baghmisheh, 2002).

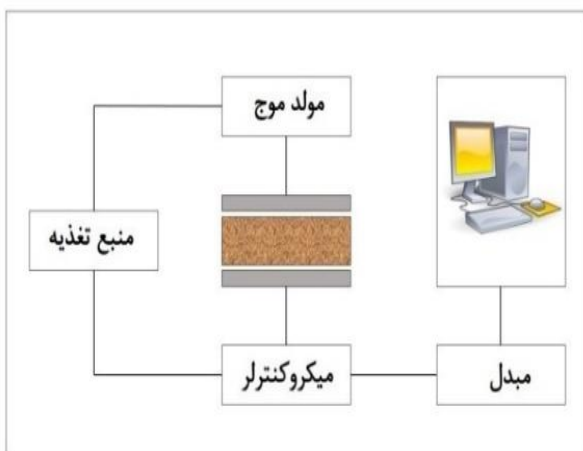
لذا در این مطالعه، شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS) برای پیش‌بینی ولتاژ خروجی یک حسگر خازنی با تغییرات دبی جرمی، رطوبت و بسامد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده با مدل آماری سنتی رگرسیون چند متغیره (MR) مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

طراحی سیستم اندازه‌گیری

به دلیل پایداری زیاد و عدم اکسید شدن آلومینیوم، صفحات حسگر با استفاده از دو صفحه آلومینیومی به ضخامت ۲ میلی‌متر و بر اساس حسگر ساخته شده توسط Kumhala et al (2009) با اندکی تغییر به سبب تغییر نوع و میزان محصول عبوری از بین صفحات حسگر، با ابعاد ۸۰ در ۱۰ سانتی‌متر ساخته شد. به منظور عدم تماس با قسمت‌های دیگر با دو پروفیل نایلونی به ابعاد ۲۵ سانتی‌متر طول و به عرض و ضخامت ۲ سانتی‌متر در دو سمت یک نقاله به طول ۲ متر و با فاصله ۳۰ سانتی‌متر قرار داده شد (شکل ۱). برای حرکت نوار نقاله از یک الکتروموتور دارای قدرت ۰/۵ اسب بخار و ۱۲۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. سرعت ابتدا توسط چرخ دنده و زنجیر به میزان یک چهارم کاهش یافت و سپس به وسیله اینورتور با تغییر بسامد دور مورد نظر تنظیم شد.

برای اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک، سامانه الکترونیکی مطابق شکل (۲) طراحی و ساخته شد.



شکل ۲. مدار اندازه‌گیری و ثبت ولتاژ خروجی خازن

در این سامانه با برقراری جریان از طریق مدار تغذیه، مولد موج فعال و یک جریان متناوب با موجی سینوسی را بر روی

طور گسترده‌ای برای تعیین رطوبت مواد استفاده نمودند. Stafford et al., (1996) از سنسورهای خازنی برای اندازه‌گیری جرم دانه استفاده کردند، آن‌ها گزارش دادند که معایب حسگر خازنی این است که سنسور به تنوع رطوبت دانه پاسخ داده و نسبت به توزیع مواد در داخل دستگاه حساس است. Kumhala et al., (2007) آزمایشات آزمایشگاهی دینامیکی با چمن علفزار طبیعی به منظور ارزیابی امکان تعیین جریان توده علوفه با استفاده از این سنسور انجام دادند و مشاهده نمودند که یک رابطه خطی نسبتاً قوی بین میزان تغذیه علوفه مرطوب عبوری از بین سنسور و بسامد ورودی حسگر خازنی وجود دارد. همچنین Kumhala et al., (2008) به منظور پیدا کردن رابطه‌ای بین عبور جریان توده‌ای مواد گیاهی از بین صفحه موازی یک سنسور خازنی و سیگنال خروجی آن آزمایشی اجرا نمودند، نتایج نشان داد رابطه خوبی بین میزان تغذیه مواد گیاهی عبوری از سنسور و بسامد ورودی حسگر خازنی وجود دارد. Kumhala et al., (2010) نشان دادند در اندازه‌گیری ظرفیت ذرت خرد شده با استفاده از سنسورهای خازنی تغییرات در محتوای رطوبت می‌تواند اندازه‌گیری ظرفیت خازنی به ویژه برای مواد با مقادیر کم رطوبت را تحت تأثیر قرار دهد.

همان‌طور که اشاره شد استفاده از این حسگرها برای اندازه‌گیری دبی جرمی محصولات کشاورزی توسعه پیدا کرده است با این حال هنوز هم خطاهای اندازه‌گیری نسبتاً بالا است و عملکرد حسگر به شدت به عوامل مختلفی وابسته است و پیش‌بینی دبی جرمی به علت پیچیدگی اثر این عوامل بسیار دشواری است. در شرایطی که روابط بین پارامترهای مستقل و وابسته پیچیده باشد، بهترین انتخاب، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند است. در سال‌های اخیر، برخی از روش‌های شناختی نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم‌های فازی و سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS) جهت محاسبات تکمیلی با موفقیت همراه بوده است و تکنیک‌های جدید به نام محاسبات نرم و یا هوش محاسباتی توسعه یافته‌اند. امروزه از این تکنیک در بسیاری از زمینه‌ها از جمله طبقه‌بندی، تشخیص الگو، پیش‌بینی و مدل‌سازی فرآیندها در علوم مختلف بکار گرفته می‌شوند. مزیت روش شبکه عصبی یادگیری مستقیم از روی داده‌ها، بدون نیاز به برآورد مشخصات آماری آن‌ها است

از تبدیل به پروتکل RS-232 با استفاده از یک کانکتور ۹ پین به رایانه ارسال و با استفاده از نرم افزار MATLAB 2011a بر حسب میلی ولت بر روی رایانه ذخیره می‌شود تا بعداً مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

حسگر خازنی اعمال می‌کند، مقدار این جریان پس از گذشتن از حسگر با توجه به خصوصیات دی‌الکتریک ماده بین صفحات حسگر تغییر کرده و پس از یک سو شدن به میکروکنترلر فرستاده می‌شود. مقادیر محاسبه شده توسط میکروکنترلر پس



شکل ۱. سامانه طراحی شده در حین انجام آزمایش

بر پایه خشک، M_f رطوبت نهایی نمونه بر پایه خشک می‌باشد. بعد از رسیدن نمونه‌ها به سطوح رطوبتی مورد نظر، به منظور توزیع یکنواخت رطوبت در سراسر دانه، دانه‌ها برای مدت ۷۲ ساعت در دمای 5 ± 1 درجه سلسیوس درون یخچال نگهداری شدند (Aydin, 2002). پس از متعادل سازی به منظور از بین بردن اثرات دما بر مقادیر اندازه‌گیری شده، نمونه‌ها در دمای اتاق (25°C) نگهداری (Taghinezhad *et al*, 2012). قبل از انجام آزمایشات از هر سطح رطوبتی، سه نمونه تهیه و محتوای رطوبت ثانویه نمونه‌ها بر پایه خشک تعیین گردید.

جهت ایجاد سطوح مختلف دبی جرمی مطابق شکل ۱ مخزنی از جنس گالوانیزه منطبق با ابعاد نوار نقاله با سطح مقطع $30 \times 30 \text{ cm}$ و ارتفاع 30 cm و دارای یک درب کشویی در انتها طراحی و ساخته شد و با یک آزمایش اولیه میزان باز بودن دریچه برای خروج 20 Kg شلتوک با مقادیر $0/8$ ، $1/2$ ، $1/6$ ، 2 و $2/4$ کیلوگرم در ثانیه و از بین صفحات حسگر تعیین گردید.

روش آزمایش

تغییرات ظرفیت ولتاژ خروجی حسگر در 5 سطح جرمی ($0/8$ ، $1/2$ ، $1/6$ ، 2 و $2/4$ کیلوگرم در ثانیه) و 4 بسامد (100 ، 300 ، 500 و 700 کیلوهرتز)، 4 سطح محتوای رطوبتی (13 ، 16 ، 19 و 21 درصد بر مبنای خشک) و 3 سطح سرعت ($0/5$ ، $0/75$ و 1 متر بر ثانیه) با استفاده از نرم افزار MATLAB 2011a بر حسب میلی ولت بر روی رایانه ذخیره شد.

جهت بررسی صحت مقادیر بسامد جریان اعمالی و ولتاژ خروجی حسگر با استفاده از یک مولتی‌متر مدل ESCORT-3136A ساخت کشور تایوان با خطا اندازه‌گیری $0/02\%$ و $0/01\%$ به ترتیب برای اندازه‌گیری ولتاژ و بسامد، اندازه‌گیری شد و مشخص گردید که این سامانه حداکثر دارای اعوجاج بسامد 3 درصد و خطای محاسبه ولتاژ خروجی $2/5$ درصد است.

آماده سازی نمونه‌ها

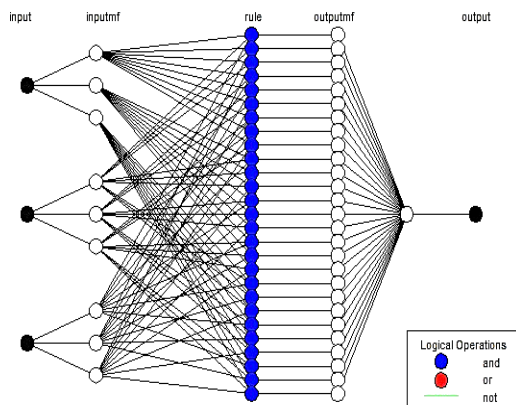
در این مطالعه، ابتدا شلتوک ارقام پژوهش از مزارع پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری طبرستان واقع در شهرستان ساری دریافت و دانه‌ها قبل از شروع آزمایش، پاک و اجسام خارجی آن از قبیل خاک، پوشال و دانه‌های آسیب دیده، جداسازی و با قرار دادن سه نمونه از آن‌ها در یک خشک‌کن آزمایشگاهی در درجه حرارت 101 ± 1 درجه سلسیوس به مدت 24 ساعت و بر اساس روش استاندارد وزنی به شماره S352.3 رطوبت اولیه آن‌ها بر پایه خشک محاسبه شد (ASAE, 1994). سپس برای رسیدن نمونه‌ها به سطوح رطوبتی بالاتر مطابق رابطه (۷) مقدار لازم آب به دانه‌ها اضافه شد (Balasubramanian, 2002).

$$Q = \frac{W_i(M_f - M_i)}{100 - M_f} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که Q : جرم آب اضافه شده بر حسب کیلوگرم، W_i : جرم اولیه نمونه بر حسب کیلوگرم، M_i : محتوای رطوبتی اولیه نمونه

ایجاد مدل‌ها

به منظور ایجاد یک رابطه پیش بینی بین پارامترهای به دست آمده در این مطالعه، در مرحله اول، تجزیه تحلیل آماری با استفاده از SPSS16 انجام شد. روابط بین ولتاژ خروجی حسگر با پارامترهای دیگر مورد بررسی و پارامترهای دارای ارتباط معنادار با دبی جرمی انتخاب شدند. با توجه به نتایج حاصل، متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل رگرسیونی، ورودی شبکه عصبی و عصبی-فازی، عبارتند از: رطوبت، بسامد و ولتاژ خروجی.



شکل ۳. معماری مدل ANFIS برای پیش بینی ولتاژ خروجی حسگر

مقدار	پارامتر مورد استفاده
تابع گاوسی	نوع MF
۳	تعداد MF ها
۱۵۸	تعداد گره
خطی	نوع تابع خروجی
۶۴	تعداد پارامترهای خطی
۲۴	تعداد پارامترهای غیرخطی
۸۸	تعداد پارامترها

مدل‌های رگرسیونی چندگانه (MR)

رگرسیون یک روش قدرتمند آماری به منظور کسب اطلاعات بیشتر در مورد رابطه بین یک یا چند متغیر مستقل و پیش بینی یک متغیر وابسته است. فرم کلی یک رابطه رگرسیون چندگانه به صورت $y = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + c$ است. در این رابطه $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ضرایب رگرسیون و پارامتر c یک مقدار ثابت به نمایندگی از مقدار y است. با استفاده از نرم افزار SPSS16 تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه به منظور یافتن ارتباط بین دبی جرمی با رطوبت، بسامد و ولتاژ خروجی حسگر انجام شد.

جدول ۲. خلاصه نتایج رگرسیون چندگانه برای پیش بینی دبی جرمی

متغیرهای مستقل	ضرایب	انحراف معیار	T	سطح معنی داری
ضریب ثابت	۱/۴۸۴	۰/۰۶۹	۲۱/۴۷۷	۰/۰۰۰
ولتاژ خروجی (V)	۰/۰۰۶	۰	۴۱/۷۱۱	۰/۰۰۰
بسامد (f)	-۰/۰۰۱	۰	-۲۳/۱۵۸	۰/۰۰۰
رطوبت (M)	-۰/۰۲۷	۰/۰۰۴	-۶/۹۵۷	۰/۰۰۰
تعداد داده‌های آموزش			۳۶۰	
تعداد داده‌های اعتبارسنجی			۱۸۰	
تعدادی قوانین فازی			۶۴	

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه‌های عصبی با توانایی قابل توجه خود در استنتاج نتایج از داده‌های پیچیده و غیر دقیق می‌توانند در استخراج الگوها و شناسایی روندهای بسیار پیچیده‌ای که شناسایی آن‌ها برای انسان‌ها و کامپیوتر بسیار دشوار است، مورد استفاده قرار گیرند (Simpson, 1990). ایجاد یک شبکه عصبی خوب برای یک کاربرد خاص بسیار مهم است. معمارهای مختلفی برای ایجاد یک شبکه مطلوب وجود دارد. یکی از معماری متداول که جهت طبقه بندی و یا رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد پرسپترون لایه چند (MLP) است (Kenneth et al. 2001; Cohen & Intrator, 2002; Lim et al. 2000).

بررسی کارایی مدل‌ها

برای ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدل‌های توسعه یافته در این مطالعه، از شاخص‌های آماری ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE)، شاخص عملکرد (VAF) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - p_i)^2}{N}} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$VAF = \left| 1 - \frac{var(d_i - p_i)}{d_i} \right| \times 100 \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - d_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{p} - d_i)^2} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

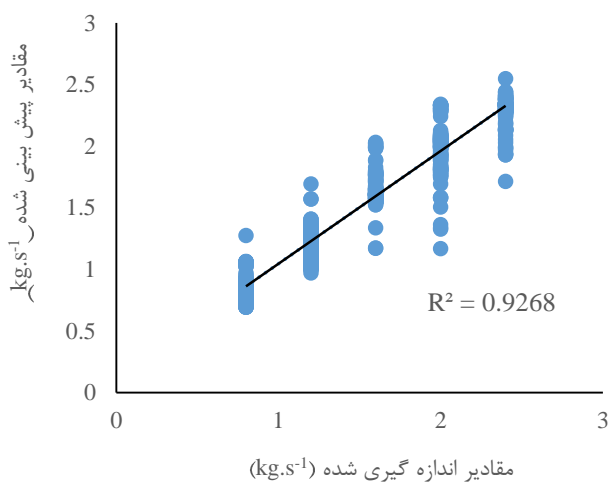
که، d_i و p_i به ترتیب مؤلفه i ام مقادیر واقعی و پیش‌بینی

در این مطالعه ابتدا کلیه داده‌ها نرمال و به سه مجموعه شامل آموزشی (۵۰٪ داده‌ها)، آزمون (۲۵٪ داده‌ها) و اعتبارسنجی (۲۵٪ داده‌ها) تقسیم شدند. سپس با استفاده از نرم افزار Matlab2015b یک پرسپترون چند لایه با سه لایه متشکل یک لایه ورودی (با ۳ نورون)، سه لایه پنهان (به ترتیب دارای ۱۰، ۳ و ۱ نورون) و یک لایه خروجی ایجاد گردید. پارامترهای شبکه به شرح زیر تنظیم گردید: نرخ یادگیری: ۰/۰۳، ثابت مومنتوم: ۰/۰۳، توابع یادگیری شبکه: از تابع trainlm و تابع فعالیت (انتقال) برای تمام لایه: tansig

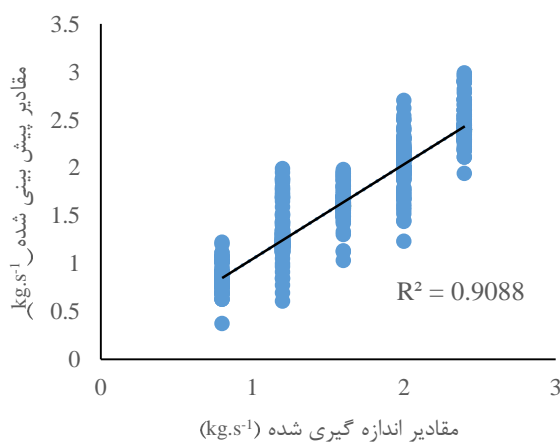
جرم با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت، مدل از قدرت پیش بینی بسیار بالایی ($R^2=0/927$) برخوردار است.

مدل استنتاج عصبی - فازی سازگار (ANFIS)

با توجه به همبستگی متقابل بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری (شکل ۶) مدل ANFIS ایجاد شده با $R^2=0/909$ قادر به پیش بینی دبی جرمی است.



شکل ۵. همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده دبی جرمی در مدل



شکل ۶. همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده دبی جرمی در مدل ANFIS

مقایسه مدل‌ها

نتایج مربوط به شاخص‌های مورد استفاده جهت مقایسه مدل‌ها و انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر پیش‌بینی شده دبی جرمی به ترتیب در جدول ۳ و شکل ۷ ارائه شده است. در

شده و \bar{p} میانگین مقادیر پیش‌بینی شده است. هرچه مقدار VAF و R^2 بالاتر و RMSE کوچک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی بهتری از رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته خواهد داشت (Rostampour et al, 2013).

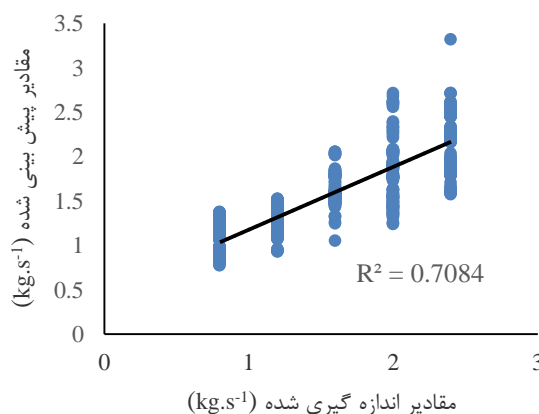
نتایج و بحث

در این مقاله، استفاده از رگرسیون چندگانه (MR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)، جهت پیش‌بینی دبی جرمی شلتوک با استفاده از حسگر خازنی، تشریح و مقایسه شد. با توجه به نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل رگرسیون ساده، بین ولتاژ خروجی حسگر با دبی جرمی، رطوبت محصول و بسامد ولتاژ ورودی حسگر رابطه معنی‌دار آماری وجود دارد. بنابراین از مدل‌های رگرسیون چندگانه (MR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)، برای پیش‌بینی دبی جرمی با استفاده از سه ورودی و یک خروجی استفاده شد.

مدل‌های رگرسیونی چندگانه (MR)

خلاصه نتایج رگرسیون چندگانه (MR) برای پیش‌بینی دبی جرمی و همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده دبی جرمی در مدل MR به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از این مدل می‌توان رابطه بین دبی جرمی و پارامترهای مورد بررسی را با استفاده از رابطه ۵ پیش‌بینی نمود ($R^2=0/708$).

$$MF=1.484+0.006\times V-0.001\times f-0.027\times M \quad (\text{رابطه ۵})$$



شکل ۴. همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده دبی جرمی در مدل MR

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده دبی

نتیجه می توان گفت که:

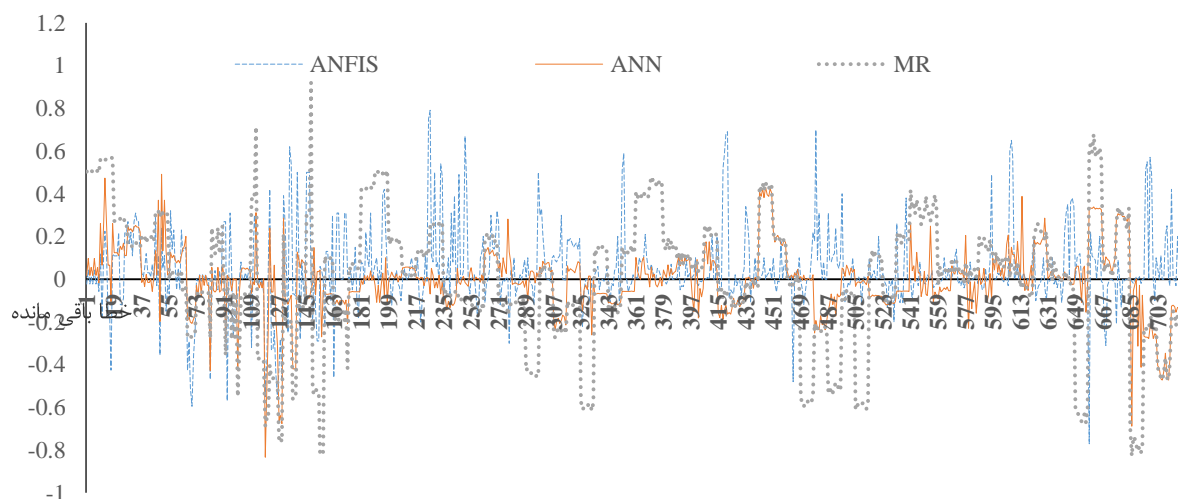
رگرسیون چندگانه (MR) با توجه به مقادیر به دست آمده برای شاخص های عملکردی ($R^2=0/708$ ، $VRF=70/84\%$ و $RMSE=0/305$) دارای کمترین دقت جهت پیش بینی دبی جرمی بود.

مدل ANFIS برای پیش بینی دبی جرمی پیش بینی قابل اطمینان تری ($R^2=0/927$ ، $VRF=70/84\%$ و $RMSE=0/305$) در مقایسه با مدل رگرسیون چندگانه داشت.

جدول ۳. شاخص عملکردی مدل ها

مدل	RMSE	(%) VAF	R^2
MR	0/305	70/84	0/708
ANN	0/153	92/66	0/927
ANFIS	0/182	90/16	0/909

نتایج نشان داد که در بین سه مدل مورد استفاده، مدل



شکل ۷. انحراف مقادیر پیش بینی شده توسط مدل MR، ANN و ANFIS از مقادیر اندازه گیری شده

بررسی و پارامترهای دارای ارتباط معنادار با ولتاژ خروجی انتخاب شدند. با توجه به نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل رگرسیون. متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل رگرسیون، ورودی شبکه عصبی و عصبی-فازی، عبارتند از: ولتاژ خروجی، رطوبت و بسامد. مقایسه شاخص های $RMSE$ ، VAF و R^2 نشان داد که مدل ANN نسبت به مدل های ANFIS و رگرسیون چندگانه عملکرد بهتری برای پیش بینی دبی جرمی دارد. هرچند مدل ANFIS نیز دقت نسبتاً قابل قبولی به منظور پیش بینی دبی جرمی شلتوک داشت. بنابراین به نظر می رسد امکان برآورد دبی جرمی شلتوک با استفاده از مدل محاسبات نرم افزاری وجود دارد. انجام تحقیقاتی از این دست می تواند در طراحی سامانه برخط جهت اندازه گیری و پیش بینی دبی جرمی در طی فرآیند برداشت و فرآوری شلتوک موثر باشد. هرچند نیاز به مطالعات بیشتر در سطوح دیگر عوامل مورد بررسی و ارقام دیگر شلتوک احساس می شود.

به منظور پیش بینی دبی جرمی، مدل ANN با استفاده از سه ورودی و یک خروجی استفاده شد و با مقادیر $0/909$ ، $90/16$ و $0/182$ به ترتیب برای R^2 ، VAF و $RMSE$ قابل اطمینان ترین پیش بینی را نشان داد.

انحراف مقادیر اندازه گیری شده از مقادیر پیش بینی شده دبی جرمی نشان داد که انحراف مقادیر پیش بینی شده در مدل ANN ($0/83$ تا $+0/49$) کم تر از رگرسیون چندگانه ($-0/77$ تا $+0/79$) و ANFIS ($0/82$ تا $+0/92$) بود. در نتیجه، ANFIS می تواند بهترین پیش بینی دبی جرمی را فراهم سازد.

نتیجه گیری

در این تحقیق از ANN، ANFIS و MR به منظور توسعه مدل هایی که قادر به پیش بینی دبی جرمی با استفاده از خروجی یک حسگر خازنی را فراهم سازد، مورد استفاده قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، نخستین گام انتخاب متغیرهای ورودی بود. روابط بین ولتاژ خروجی حسگر با پارامترهای دیگر مورد

REFERENCES

- Abraham, A. (2005). Adaptation of Fuzzy Inference System Using Neural Learning. *Fuzzy Systems Engineering. Series Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 181, 53-83.
- Arslan, S., Inanc, F., Gary. J. M. & Colvin. T. S. (2000). Grain flow measurements with x-ray techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*. 26, 65-80.

- ASAE Standards. (1994). S352.2. Moisture measurement ungrounded grains and seeds. St. Joseph, MI, ASAE.
- Aydin, C., Ogut, H. & Konak, M. (2002). Some physical properties of Turkish Mahaleb. *Biosystems Engineering*, 82 (3), 231-234.
- Balasubramanian, D. (2002). Physical properties of raw cashew nut. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78, 291-297.
- Berbert, P. A., Queiroz, D.M. & Melo, E.C. (2002). Dielectric properties of common bean. *Biosystems Engineering*, 83 (4), 449-462.
- Cohen, S. & Intrator, N. (2002). Automatic model selection in a hybrid perceptron/radial network. *Information Fusion*, 3 (4), 259-266.
- Debye, P. (1929). *Polar Molecules*, Dover Publication, Inc, New York.
- Eubanks, J. C. & Birrell, S. J. (2001). Determining moisture content of hay and forages using multiple frequency parallel plate capacitors. *ASAE Paper*. 011072.
- Jang, J. S. R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23 (3), 665-685.
- Kenneth, J., Wernter, S. & MacInyre, J. (2001). Knowledge extraction from Radial Basis Function networks and Multi-layer Perceptron's. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 1 (3), 369-382.
- Klemme, K. A., Schumacher, J. A. & Donell, D. P. (1992). Results and advantages of a especially variable technology for crop yield. *ASAE Paper*, 921651.
- Kumhala, F., Kviz, Z., Kmoch, J. & Prosek, V. (2007). Dynamic laboratory measurement with dielectric sensor for forage mass flow determination. *Research in Agricultural Engineering*, 53 (4), 149-154.
- Kumhala, F., Prosek, V. & Blahovec, J. (2009). Capacitive throughput sensor for sugar beets and potatoes. *Biosystems engineering*, 102, 36-43.
- Kumhala, F., Prosek, V. & Kroulik, M. (2008). Parallel Plate Mass Flow Sensor for Forage Crops and Sugar Beet. *ASAE Paper*, 084700.
- Kumhala, F., Prosek, V. & Kroulik, M. (2010). Capacitive sensor for chopped maize throughput measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1 (70), 234-238.
- Lawrence, K. C., Funk, D. B. & Windham, W. R. (2001). Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans. *Transaction of ASAE*, 44 (6), 1691-1696.
- Lim, T. S., Loh, W. Y., Tim, L. & Shih, Y. S., (2000). A comparison of prediction accuracy, complexity, and training time of thirty-three old and new classification algorithm. *Machine Learning*, 40(3), 203-238.
- Nazemsadat, S. M. R. & Loghavi, M. (2013). Design, Development and Evaluation of a Mass Flow Sensor for Grain Combine Harvesters. *Journal of Agricultural Machinery*. 32, 71-84. (in Farsi)
- Nelson, S. O. (2006). Agricultural applications of dielectric measurements. *IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation*, 16, 688-702.
- Nelson, S. O. (2008). Dielectric properties of agricultural products and some applications. *Research in Agricultural Engineering*, 54, 104-112.
- Osman, A. M., Savoie, P., Grenier, D. & Theriault, R. (2002). Parallel-plate capacitance moisture sensor for hay and forage. *ASAE Paper*, 021055.
- Rostampour, V., Motlagh, A. M., Komarizadeh, M. H., Sadeghi, M., Bernousi, I. & Ghanbari, T. (2013). Using Artificial Neural Network (ANN) technique for prediction of apple bruise damage. *Australian Journal of Crop Science*, 7(10), 1442-1448.
- Schnug, E. D. M., Murphy, E., Evans, S. Haneklaus. & Lamp, J. (1993). Yield mapping and application of yield maps to computer-aided local resource management: P. C. Robert, R. H. Rust and W. E. Larson, Ed., *Proceedings of Soil Specific Crop Management*, 87-93.
- Simpson, P. K. (1990). *Artificial Neural Systems: Foundations, Paradigms, Applications, and Implementations*. Pergamum Press, New York.
- Soltani, M., Alimardani, R. & Omid, M. (2011). A Feasibility Study of Employing a Capacitance Based Method in Banana Ripeness Recognition. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 42 (1), 21-27. (In Farsi)
- Stafford, J. V., Ambler, B., Lark, R. M. & Catt, J. (1996). Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 14 (2-3): 101-119.
- Taghinezhad, J., Alimardani, R. & Jafari, A. (2012). Development of a Capacitive Sensing Device for Prediction of Water Content in Sugarcane Stalks. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 44, 61-68.
- Vakil-Baghmisheh, M.T. (2002). *Farsi Character recognition using artificial neural networks*, Ph. D. dissertation, University of Ljubljana, Slovenia.
- Venkatesh, M. S. & Raghavan, G. S. V. (2005). An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian Biosystems Engineering*, 47 (7), 15-30.
- Wagner, L. E. & Schrock, M. D. (1989). Yield determination using a pivoted auger flow sensor. *Transactions of the ASAE*, 32 (2), 409-413.