



پیش بینی رفتار شناور شدن محصولات دانه‌ای به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی

رضا امیری چایجان^۱، سیدحسین پیمان^۲ و جمیل ملایی^۳

- ۱- استادیار مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
- ۲- استادیار مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت
- ۳- دانشجوی کارشناسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

amirireza@basu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، منحنی‌های مشخصه شناورسازی چهار محصول ذرت دانه‌ای، گندم، شاهدانه و نخود به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد پیش‌بینی قرار گرفت. برای به دست آوردن داده‌های آزمایشی، از یک سیستم بستر شناور غیرپیوسته آزمایشی استفاده شد. شش متغیر مستقل نوع محصول، چگالی ذره، تخلخل، کرویت، قطر متوسط هندسی و سرعت هوا برای پیش‌بینی افت فشار استاتیک ناشی از ستون محصولات مورد استفاده قرار گرفت. همچنین شاخص افت فشار شناور سازی نیز برای محصولات مذکور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که یک ساختار شبکه عصبی پس‌انتشار پیشرو با چهار لایه آموزشی و تعداد نرونهای ۱-۷-۶ قادر است منحنی‌های مشخصه شناورسازی محصولات را با ضریب همبستگی ۰/۹۷۶۷ و خطای مطلق $0/00086 \text{ Pa}$ پیش‌بینی کند. شاخص افت فشار به دست آمده در آزمایشها برای شاهدانه کمترین مقدار (۱/۱۸٪) و برای نخود بیشترین مقدار (۱۸/۱۰٪) به دست آمد.

کلمات کلیدی: گندم، نخود، حداقل سیال سازی، شبکه پس‌انتشار

مقدمه

پیش‌بینی رفتار شناورسازی محصولات دانه‌ای کشاورزی به منظور طراحی سیستم‌های انتقال و خشک‌کنها و کاربرد مناسب آنها دارای اهمیت می‌باشد. زمانی که جریان هوا با سرعت کم از بین بستر محصولات دانه‌ای به سمت بالا عبور می‌کند، بستر ثابت خواهیم داشت. با افزایش سرعت هوا، دانه‌ها از هم فاصله گرفته و شرایط حداقل شناوری حاصل می‌شود. در شرایط حداقل شناوری، فشار استاتیک بیشترین مقدار را در فرایند شناوری دارد و نیروی وزن بستر مواد با نیروی اصطکاک بین ذرات و هوا برابر می‌شود. با افزایش سرعت هوا، شرایط حباب‌سازی ایجاد می‌شود. در این شرایط، حبابهای گاز ایجاد شده باعث اغتشاش در بستر مواد می‌شود. با افزایش سرعت هوا، انتقال ذرات توسط جریان هوا صورت می‌گیرد. در این شرایط بخش عمده‌ای از ذرات انتقال می‌یابند و شرایط نسبتاً پایدار بر سیستم حاکم می‌شود (Brooker *et al.*, 1992; Kunii & Levenspiel, 1991).

پیش‌بینی مراحل سیال‌سازی برای کارکرد مناسب سیستم‌های شناوری حائز اهمیت می‌باشد. از سیستم‌های شناوری در کاربردهای متنوعی استفاده شده است. برخی از آنها عبارتند از: انتقال هوایی مواد (Marcus *et al.*, 1990)، خشک

کردن محصولات دانه‌ای، میوه‌ها و سبزیجات (DiMattia *et al.*, 1996; Soponronnarit *et al.*, 1996) و چای (Temple & Van Boxtel, 1999).

گزارش برخی محققین نشان می‌دهد که بهترین شرایط برای کارکرد سیستمها در شرایط بستر شناور، نقطه حداقل شناوری است (امیری چایجان و همکاران، ۱۳۸۸؛ Prasad *et al.*, 1994). در شرایط انتقال مواد دانه‌ای، بستر شناور فاز رقیق با بیشترین یکنواختی در سیستم وجود دارد. در بررسی رفتار مواد در شرایط بستر شناور، برخی خصوصیات فیزیکی مواد مانند کرویت، تخلخل، چگالی و قطر متوسط هندسی نقش مهمی دارند. این خواص در طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه بستر سیال نیز بسیار مهم هستند.

نتایج پژوهشهای انجام شده بر روی شناورسازی ذرات چای نشان داد که بسیاری از پارامترهای شناورسازی مانند سرعت هوا و افت فشار استاتیک صفحات مختلف برای طراحی، کارکرد و کنترل سیستم خشک کن حائز اهمیت است (Temple & Van Boxtel, 1999). در این مطالعه، ثبت پیوسته سرعت هوا در ازای افت فشار ناشی از ارتفاع ستون مواد با رطوبت ۸ تا ۱۰ درصد مبنای تر و با ذرات چای با قطر متوسط هندسی ۰/۸۴ mm انجام شد. سرعت حداقل شناورسازی برای شرایط مختلف بین ۰/۳۵ و ۱/۲ m/s به دست آمد. در تحقیقی دیگر DiMattia و همکاران (1997) تغییرات فشار را بستر ذرات نوع D (ذرات با قطر متوسط هندسی بزرگتر از ۰/۰۰۱ m) بررسی کردند. محصولات دانه‌ای برنج دانه بلند، گندم، جو و نخود برای بررسی شرایط حباب‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج آنها نشان داد که دانه‌های بزرگ با کرویت کم باعث ایجاد حباب‌های بزرگ با ضربات محکم به جداره محفظه خشک‌کن می‌شوند. همچنین دستیابی به این مرحله از شناورسازی مواد نیاز به دبی هوای بسیار زیادی داشت.

برای بررسی اثرات خواص فیزیکی چند محصول دانه‌ای بر پایداری شناورسازی به کمک مدل والیس پژوهشی انجام شد (Khoshtaghaza & chayjan, 2007). نتایج نشان داد که کرویت دانه عامل مهمی در پایداری شناورسازی بود. بطوریکه ارزن با بیشترین کرویت، دارای بیشترین یکنواختی در شناورسازی بود. نتایج نشان داد که شاخص افت فشار شناورسازی با کرویت و جرم حجمی توده رابطه عکس داشت.

هدف این تحقیق عبارت است از پیش‌بینی رفتار شناور شدن محصولات دانه‌ای به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور کنترل سیستم شناورسازی محصولات دانه‌ای در بهترین حالت و جلوگیری از نوسان‌های شدید در سیستم‌های شناورسازی و همچنین تحلیل رفتار مواد دانه‌ای استفاده شده در آزمایشها با استفاده از شاخص افت فشار شناورسازی.

مواد و روشها

نمونه‌های آزمایشی و دستگاه شناور سازی

محصولاتی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، عبارتند از: ذرت دانه ای، گندم، شاهدانه و نخود. میانگین قطر هندسی محصولات انتخاب شده بیشتر از ۰/۰۰۱ m بود و دارای خصوصیات فیزیکی متفاوت بودند. خواص فیزیکی محصولات در جدول ۱ آورده شده است. خواص فیزیکی محصولات فوق به کمک روش‌های استاندارد انتخاب شدند (Stroshine & Haman, 1994; Mohsenin, 1990). از سی دانه برای محاسبه قطر متوسط هندسی و کرویت محصولات استفاده شد. از یک دستگاه بستر شناور برای شناورسازی عمق ۵ cm از محصولات استفاده شد (شکل ۱). از یک سیستم کنترل دور موتور برای تنظیم سرعت دمنده سانتریفوژی و دبی هوای مورد نیاز استفاده شد. قطر داخلی محفظه شناورسازی ۱۵ cm و ارتفاع آن ۳۰ cm بود.

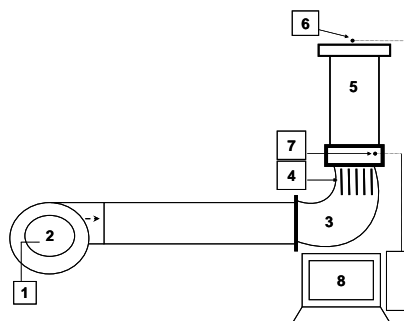
از یک دستگاه Standard ST-8897 برای اندازه‌گیری و ثبت فشار-سرعت هوا در طی انجام آزمایشهای شناورسازی محصولات استفاده شد. فشار استاتیک و سرعت هوا بترتیب برحسب پاسکال و متر بر ثانیه و قدرت تشخیص 10 Pa و 0.1 m/s اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب منحنی‌های مشخصه شناورسازی محصولات به دست آمد. افت فشار صفحه مشبک در شرایط محفظه خالی اندازه‌گیری شد. منحنی افت فشار-سرعت هوا برای این شرایط به دست آمد. معادله زیر به این داده‌ها برازش داده شد:

$$\Delta P_p = 0.0081V^2 - 0.017V \quad R^2 = 0.9948 \quad (1)$$

ΔP_p افت فشار ناشی از صفحه مشبک (Pa) و V سرعت هوا (m/s) است. پس از آن آزمایشها برای محاسبه افت فشار ناشی از ستون مواد انجام شد. بدین ترتیب که ابتدا فشار کل به دست آمده از معادله (1) کم کرده و مقدار به دست آمده، فشار ناشی از ستون مواد خواهد بود. بیشترین افت فشار ایجاد شده در سیستم متعلق به نقطه حداقل شناورسازی است (Kunii & Levenspiel, 1991). برای مطالعه رفتار سیال‌سازی محصولات دانه‌ای، به دست آوردن این نقطه در آزمایشهای شناورسازی مفید خواهد بود. آزمایشهای شناورسازی مواد در سه تکرار در عمق 5 cm انجام شد.

جدول ۱- برخی خواص فیزیکی محصولات مورد استفاده

نوع محصول	قطر متوسط هندسی (mm)	کرویت (%)	جرم حجمی توده (kg/m^3)	جرم حجمی ذره (kg/m^3)	تخلخل (%)	رطوبت (d.b.%)
ذرت دانه ای	۶/۰۴	۷۶/۸	۸۲۲	۱۱۸۱	۳۰/۴	
گندم	۳/۷۸	۵۰/۷	۸۰۸	۱۲۴۳	۳۴/۹	
شاهدانه	۳/۲۳	۷۷/۶	۵۶۱	۸۰۲	۲۹/۹	
نخود	۸/۴۱	۸۴	۷۵۰/۵	۱۲۵۰	۳۹/۹	

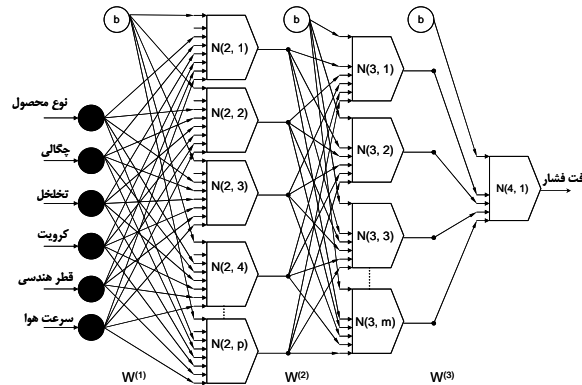


شکل ۱- نمای کلی دستگاه شناور سازی محصولات دانه‌ای (۱- اینورتر ۲- دمنده ۳- محفظه اختلاط ۴- شبکه یکنواخت کننده ۵- محفظه شناورسازی ۶- سنسور سرعت ۷- سنسور فشار ۸- رایانه)

طراحی شبکه عصبی مصنوعی و انجام آزمایشها

شبکه عصبی مصنوعی شامل پردازشگرهایی به نام نرون است که پس از یادگیری الگوهای آموزشی نگاشتی میان فضای ورودی (لایه ورودی) و فضای مطلوب (لایه خروجی) ارائه دهد. جهت جریان سیگنالها از لایه ورودی به سمت لایه خروجی است. در طی فرایند آموزش، وزن‌های ارتباطی بین لایه‌ها اصلاح می‌شود تا اختلاف مقادیر آزمایشی و پیش‌بینی به کمترین مقدار خود برسد. این وزن‌ها حافظه و دانش شبکه هستند. شبکه عصبی آموزش‌دیده برای پیش‌بینی الگوهای ناشناخته به کار رود (Heristev, 1998). در این پژوهش از شبکه‌های پس‌انتشار پیشرو استفاده شده است.

شبکه پس انتشار پیشرو (FFBP) شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی است. برای آموزش این شبکه از الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا استفاده می شود. در حالت پس انتشار، ابتدا وزن های لایه خروجی تعدیل می شود، زیرا برای هر یک از نرون های لایه خروجی، مقدار مطلوب وجود دارد و می توان به کمک آنها و قاعده های به هنگام سازی، وزن ها را تعدیل نمود. شکل ۲ توپولوژی شبکه پس انتشار پیشخور را نشان داده است. از الگوریتم آموزشی لونبرگ-مارکوارت برای بهنگام سازی وزن های شبکه FFBP استفاده شد.



شکل ۲- فرایند بهنگام سازی توسط شبکه پس انتشار پیشرو

عوامل متعددی در فرایند شناورسازی مواد دانه ای و چگونگی رفتار این مواد مؤثرند. برخی از این عوامل عبارتند از: نوع محصول، چگالی ذره، تخلخل، کرویت، قطر متوسط هندسی و سرعت هوا. این عوامل در شرایط آزمایشگاهی اندازه گیری یا اعمال شده و به عنوان ورودی های شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شدند. تحت شرایط مذکور، شبکه عصبی مصنوعی با شش نرون لایه ورودی (نوع محصول، چگالی ذره، تخلخل، کرویت، قطر متوسط هندسی و سرعت هوا) و یک نرون لایه خروجی (افت فشار) طراحی شد. در این تحقیق از نرم افزار Neural Network Toolbox MATLAB (Ver. 4.1) استفاده شد. توابع آستانه مختلفی برای یافتن حالت بهینه آن مورد ارزیابی قرار گرفت که عبارتند از: تابع سیگموئید لگاریتمی، تابع خطی، تابع تانژانت هایپربولیک سیگموئید.

برای آموزش، ابتدا حدود ۳۰٪ داده ها به طور تصادفی برای فرایند ارزیابی جدا شد، به طوری که ۲۰ داده برای آموزش و ۴۵ داده برای آزمون شبکه انتخاب شدند. برای یافتن شبکه ای با توپولوژی مناسب به کمک الگوریتم های آموزشی، از معیار خطای مربعات میانگین استفاده می شود که هدف کمینه شدن خطای مذکور است که با رابطه (۲) تعریف می شود:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{p=1}^M \sum_{i=1}^N (S_{ip} - T_{ip})^2 \quad (2)$$

که در آن MSE خطای مربعات میانگین در مرحله آموزش، S_{ip} خروجی شبکه در نرون i ام و الگوی p ام، T_{ip} خروجی هدف در نرون i ام و الگوی p ام، N تعداد نرون های خروجی و M تعداد الگوهای آموزشی است. برای بهینه کردن توپولوژی های یافته شده در مرحله قبل نیز از معیارهای خطای میانگین مطلق و انحراف معیار خطای میانگین مطلق استفاده شد که روابط آنها به صورت زیر است:

$$E_{MA} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T |S_k - T_k| \quad (3)$$

که در آن S_k خروجی شبکه در مرحله ارزیابی داده ها، T_k مقادیر خروجی مطلوب الگوها، E_{MA} خطای میانگین مطلق و SD_{EMA} انحراف معیار خطای میانگین مطلق است. مقدار خطای متوسط آموزش برای شبکه‌های پس‌انتشار پیشرو به همراه الگوریتم‌های یادگیری و توپولوژیهای مختلف بررسی شد.

برای بررسی پایداری شناورسازی محصولات مورد آزمایش از شاخص زیر استفاده شد:

$$I_{PL} = \frac{P_{mf} - P_{\min}}{P_{mf}} \times 100 \quad (4)$$

که در آن I_{PL} شاخص افت فشار (درصد)، P_{mf} فشار حداکثر و P_{\min} فشار حداقل در فرایند شناورسازی می باشد.

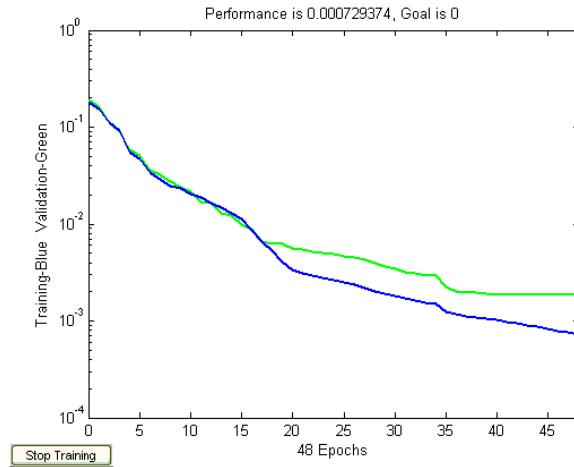
نتایج و بحث

نتایج بررسی تاثیر الگوریتم‌های یادگیری، توابع آستانه مختلف و بهینه‌سازی شبکه مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن بود که الگوریتم‌های یادگیری لوببرگ-مارکوارت به همراه تابع آستانه LOGSIG عملکرد بهتری نسبت به توابع آستانه دیگر دارد. بطوری که از بین توپولوژیهای بکار رفته، توپولوژی ۶-۷-۷-۱ با ارائه $R^2 = 0/9741$ ، $MSE = 0/00073$ و خطای مطلق $0/00086$ kPa بهترین عملکرد را داشت. این توپولوژی با ۴۸ چرخه آموزش به مقدار بهینه خود رسید. همچنین در الگوریتم‌های BR بالاترین ضریب همبستگی و کمترین خطای مطلق میانگین به ترتیب برابر $0/9722$ و $0/00097$ kPa در ۳۵ چرخه آموزش برای توپولوژی ۶-۸-۶-۱ به دست آمد. بنابراین می‌توان دریافت که بهترین نتایج مربوط به الگوریتم یادگیری LOGSIG و توپولوژی ۶-۷-۷-۱ است (جدول ۲).

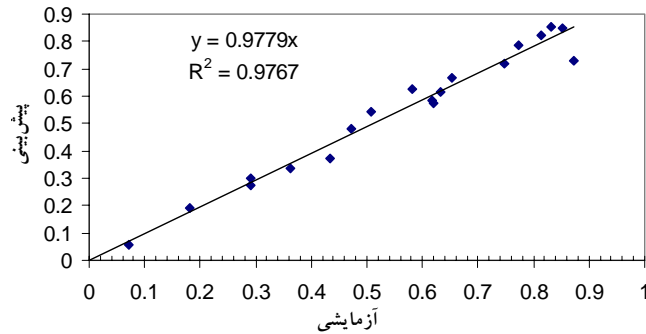
جدول ۲- مقادیر خطای آموزش برای مقادیر مختلف تعداد لایه ها و نرون ها و توابع آستانه مختلف

چرخه آموزش	E_{MA} (kPa)	R^2	MSE	تعداد لایه ها و نرونها	تابع آستانه	الگوریتم یادگیری
۳۰	۰/۰۰۱۳۱	۰/۹۴۹۳	۰/۰۰۳۳۷	۶-۷-۶-۱	TANSIG	LM
۴۸	۰/۰۰۰۸۶	۰/۹۷۶۷	۰/۰۰۰۷۳	۶-۷-۷-۱	LOGSIG	
۳۵	۰/۰۰۰۹۷	۰/۹۷۲۲	۰/۰۰۳۴۸	۶-۸-۶-۱	TANSIG	BR
۴۱	۰/۰۰۱۰۹	۰/۹۶۱۵	۰/۰۰۵۵۴	۶-۶-۶-۱	LOGSIG	

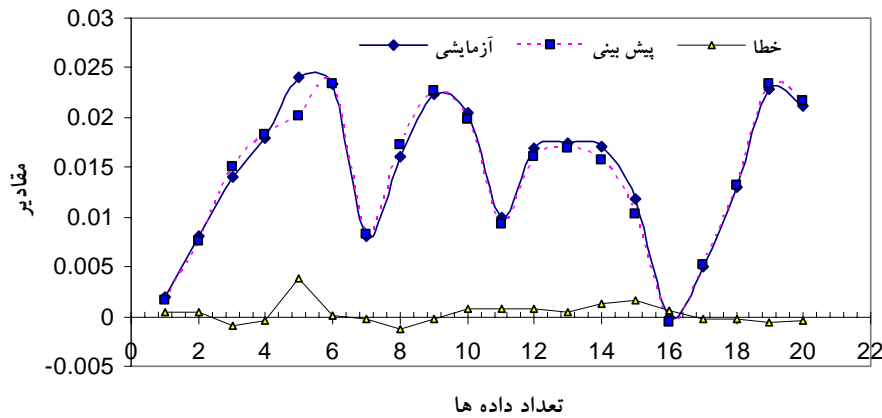
چگونگی یادگیری شبکه بهینه طراحی شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. خطای RMSE این شبکه در بهترین شرایط $0/00073$ بدست آمد که کمترین مقدار خطا در بین توپولوژیهای ارزیابی شده است. ضریب همبستگی برای شبکه بهینه انتخاب شده برابر $0/9767$ به دست آمد (شکل ۴). با توجه به اینکه تاکنون روشی برای پیش‌بینی عملکرد محصولات دانه ای در شرایط بستر ثابت و سیال ارائه نشده بود، روش مذکور می‌تواند برای این شرایط به عنوان روشی جدید به شمار رود که با دقت مناسبی قادر است منحنی مشخصه شناورسازی مواد دانه‌ای را پیش‌بینی کند. زیرا توپولوژی بهینه شبکه عصبی توانسته است افت فشار را با خطای مطلق متوسط $0/86$ پاسکال پیش‌بینی کند که با توجه به تغییرات شدید در رفتار شناورسازی مواد بسیار مناسب است (شکل ۵). از طرفی خطای واقعی ناچیز بیانگر عملکرد مناسب و عدم وراآموزی شبکه بهینه است. همه خطاهای واقعی کمتر از 5 Pa است (شکل ۵).



شکل ۳- چگونگی فرایند یادگیری شبکه بهینه

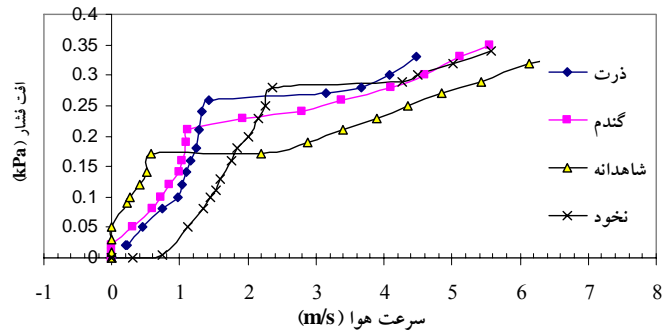


شکل ۴- افت فشار استاتیک پیش بینی شده با روش شبکه عصبی مصنوعی در مقابل مقادیر واقعی آن برای داده های آزمون



شکل ۵- مقادیر پیش بینی، آزمایشی و خطای واقعی افت فشار ناشی از ستون مواد

شاخص افت شناورسازی محصولات دانه‌ای در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به منحنی افت فشار ناخالص محصولات آزمایشی در شکل ۶ مقادیر افت فشار برای شاهدانه کمترین مقدار (۱/۱۸٪) و برای نخود بیشترین مقدار (۱۸/۱۰٪) به دست آمد. با توجه به خواص فیزیکی محصولات دانه‌ای می‌توان دریافت که افزایش کرویت باعث کاهش افت فشار شده و اندازه بزرگتر دانه‌ها باعث ناپایداری بیشتر می‌شود.



شکل ۶- افت فشار ناخالص ناشی از ستون مواد

جدول ۳- شاخص افت فشار محصولات مورد استفاده

شاخص افت فشار (%)	نوع محصول
۹/۸۰	ذرت دانه ای
۷/۱۷	گندم
۱/۱۸	شاهدانه
۱۸/۰۹	نخود

مراجع

- امیری چایجان ر، خوش تقاضا م.ه.، منتظر غ.ع.، مینایی س. و علیزاده م.ر. (۱۳۸۸). تخمین ضریب تبدیل شلتوک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در خشک‌کن بستر سیال. علو و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳(۴۸)، ۲۹۹-۲۸۵.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., and Hall, C.W. (1992). *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*, 1st ed., Van Nostrand Reinold, USA.
- DiMattia, D.G.; Ammyotte, P.R., and Hammdullahpur, F. (1997). Slugging characteristics of group D particles in fluidised beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 75: 452-459.
- Heristev, R.M. (1998). *The ANN Book*. GNU Public License. Available on (<ftp://ftp.funet.fi/pub/sci/neural/books/>).
- Khoshtaghaza, M.H. and Chayjan, R.A. (2007). Effect of some physical properties on fluidization stability of grain products. *Biosystems Engineering*, 98: 192-197.
- Kunii, D. and Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*, 2nd ed., Stoneham: Butterworth-Heinemann, USA.
- Marcus, R.D.; Leung, L.S.; Klinzing, G.E. and Rizk, F. (1990). *Pneumatic Conveying of Solids*. Chapman & Hall, London, UK.
- Prasad, B.V.S.; Chandra, P.K. and Bal, S. (1994). Drying parboiled rough rice in stationary, semi-fluidised and fluidised conditions. *Transactions of the ASAE*, 37(2): 589-594.

- Soponronnarit, S.; Champ, B.R.; Highley, E. and Johnson, G.I. (1996). Fluidised bed paddy drying, Grain Drying in Asia: Proceeding of an International Conference held at the FAO Regional Office for Asia and the Pacific, pp 201–209. Bangkok, Thailand
- Stroshine, R. and Haman, D. (1994). Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products. Purdue University, West Lafayette, USA
- Temple, S.J.; Van Boxtel, A.J.B. (1999). Fluidisation of tea. Journal of Agricultural Engineering Research, 74: 5–11.