

طراحی، ساخت و آزمایش یک تونل باد عمودی برای اندازه‌گیری خواص آیرودینامیکی اجسام ریز

محمد هادی خوش تقاضا
استادیار
دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

رحیم مهدی‌زاده
دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

محمود پسندیده فر
استادیار
دانشکده مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

به منظور تعیین سرعت حد و ضریب بازدارندگی اجسام ریز (از جمله دانه‌های کشاورزی)، تونل باد عمودی بر اساس روش‌ها و معیارهای استاندارد، طراحی و ساخته شد. تونل دارای مقطع آزمایش مربعی به ابعاد 200×200 میلی‌متر و فن جریان محوری، با توان ۵۵۰ وات است. به منظور کاهش میزان غیریکنواختی و آشفتگی جریان در مقطع آزمایش از ۵ لایه توری و یک شبکه لانه‌زنبوری استفاده شد. همچنین به منظور سرعت دادن به جریان و نیز کمک به یکنواختی آن، نازل تونل باد با استفاده از روش مورل طراحی و ساخته شد. سرعت حد چند دانه کشاورزی با استفاده از این تونل اندازه‌گیری شد. معلوم گردید افزایش جرم دانه‌ها باعث افزایش سرعت حد بطور خطی می‌شود. مقدار متوسط سرعت حد دانه‌های گندم، عدس و ماش به ترتیب برابر $۲/۳۶$ ، $۷/۴$ و $۹/۵۹$ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. ضریب بازدارندگی این دانه‌ها نیز با استفاده از سرعت حد آنها محاسبه گردید. متوسط ضریب بازدارندگی برای گندم، عدس و ماش به ترتیب $۰/۹۲$ ، $۱/۲۱$ و $۰/۶۶$ تعیین شد. با توجه به این مقادیر مشخص گردید که این دانه‌ها به ترتیب شبیه استوانه، دیسک و کره‌اند. با مقایسه نتایج آزمایش با نتایج دیگر محققین میتوان نتیجه گرفت که تونل باد ساخته شده با دقت مناسبی قادر است سرعت حد اجسام ریز را اندازه‌گیری نماید.

کلمات کلیدی

تونل باد - نازل - سرعت حد - ضریب بازدارندگی

Design and Development of A Vertical Wind Tunnel for Measurement of Aerodynamic Properties of Small Material

R. Mehdizadeh
M.Sc
Tarbiat Moddares University

M. H. Khoshtaghaza
Assistant Professor
Tarbiat Moddares University

M. Pasadidefar
Assistant Professor
Ferdossi Mashad University

Abstract

To study the terminal velocity and drag coefficient of small material (like seeds) based on standard methods, a vertical wind tunnel was designed and constructed. The tunnel consists of square test section (200x200 mm) and an axial fan flow (with 550W power). In order to increase uniformity and laminar airflow in the test section, five layers of screen and a honeycomb net were utilized. For increasing the velocity and uniformity of the airflow, Morel method was used to design the nozzle of the tunnel. Terminal velocity of agricultural seeds (such as wheat, lentil and grass pea) was measured by this tunnel. Increasing the grain mass caused the terminal velocity to increase linearly. The average terminal velocity for wheat, lentil and grass pea was measured 7.36, 7.4 and 9.59 m/s respectively. Drag coefficient of the seeds was calculated from their terminal velocity. The average drag coefficient of wheat, lentil and grass pea was 0.92, 1.21 and 0.66 respectively. The results showed that wheat, lentil and grass pea behave like cylinder, disk and sphere material respectively. By comparing the results of experiment with the results of the other researchers, it can be concluded that the vertical wind tunnel can be used to measure precisely terminal velocity of small material.

Key words

wind tunnel- nozzle- terminal velocity- drag coefficient

مقدمه

از زمانیکه بشر به فکر پرواز در آسمان توسط اشیاء پرنده سنگین‌تر از هوا افتاد احساس کرد که برای ایجاد شرایط دینامیکی لازم در هوا، کم خطرتر و مقرون به صرفه‌تر اینست که یک تونل باد بسازد و مدلی از شیء مورد نظر را در داخل تونل باد در معرض جریان هوا قرار دهد. از زمان ساخت اولین تونل باد در سال ۱۸۷۱ تا کنون انواع تونل‌های باد با سرعت‌های مختلف و در اندازه‌های مختلف ساخته شده است. غالب تونل‌های باد ساخته شده به صورت افقی بوده، جسم مورد آزمایش در مقطع آزمایش ثابت شده و با تغییر پارامترهای سرعت جریان و اندازه جسم مقادیر ضریب بازدارندگی را برای گستره‌ای از اعداد رینولدز بدست می‌آورند. اما در مورد اجسام ریز (مثلاً دانه محصولات کشاورزی)، به علت کوچکی، نیروی بازدارندگی اعمالی بر آنها را نمی‌توان مستقیماً اندازه‌گیری نمود. لذا این مقادیر را از روی سرعت حدشان تعیین می‌کنند [۸]. در صورتیکه بتوان به کمک جریان هوا جسم را در راستای قائم معلق نمود در این حالت نیرو بازدارندگی اعمالی وارد بر جسم با وزن آن برابر شده و سرعت جریان هوا برابر سرعت حد جسم است. ضریب بازدارندگی (C_d) به کمک سرعت حد به صورت زیر بدست خواهد آمد [۴]:

$$C_d = \frac{2M \cdot g}{\rho \cdot V_t^2 \cdot A} \quad (1)$$

در این رابطه، M جرم جسم (kg)، g شتاب ثقل (m/s^2)، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، A سطح مؤثر جسم (m^2) و V_t سرعت حد (m/s) است. بنابراین تونل بادی که در این تحقیق طراحی و ساخته شد به طور عمودی بوده و به منظور تعلیق ذره و اندازه‌گیری سرعت حد اجسام ریز است. در این تحقیق تونل باد با توجه به آخرین اطلاعات و منابع موجود مطابق شکل ۱ طراحی و ساخته شد و به منظور آزمایش آن سرعت حد و ضریب بازدارندگی چند دانه اندازه‌گیری شده و نتایج بدست آمده با نتایج محققین دیگر مقایسه خواهد شد. تعیین سرعت حد و ضریب بازدارندگی دانه‌های محصولات کشاورزی به منظور طراحی بهینه وسایلی که با آنها سروکار دارند، مثل کمباین، دستگاه‌های انتقال دهنده هوایی غلات (نقاله‌های نیوماتیکی) و خشک‌کن غلات اهمیت بسزایی دارد. قابل توجه اینکه خواص آیرودینامیکی (سرعت حد و ضریب بازدارندگی) دانه‌ها با توجه به گونه‌های مختلف هر دانه در نقاط مختلف جهان با یکدیگر مقادیری فرق دارد و لذا در هر نقطه از جهان می‌بایست خواص آیرودینامیکی

دانه‌های آن منطقه تعیین گردد. لذا با توجه به نوع کاربرد این تونل باد محدوده سرعت در داخل تونل باد مشخص می‌شود. سرعت هوا باید آنقدر باشد که بتواند این قبیل دانه‌ها که تحت تأثیر وزن خود بطرف پایین جذب می‌شوند را در هوا معلق نماید. با توجه به اینکه در این نوع تونل باد سرعت‌ها کمتر از ۲۰ متر بر ثانیه است (تونل باد از نوع مادون صوت است)، لذا مصرف انرژی چندان بالا نیست. تونل باد طراحی شده از نوع مدار باز می‌باشد بر خلاف تونل‌های باد افقی که اکثر آنها از نوع مدار بسته‌اند. به هر حال در قسمت بعدی روش طراحی و ساخت قسمت‌های مختلف این تونل باد بیان خواهد شد.

۱- طراحی و ساخت تونل باد

بطور کلی هر تونل باد از اجزاء زیر تشکیل شده است:

محرک هوا: این قسمت هوای مورد نیاز و سرعت لازم در تونل را فراهم می‌کند و بصورت فن‌های مکشی و یا دمشی در تونل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (قسمت F در شکل ۱).

مقطع آزمایش: در این ناحیه مدل مورد آزمایش و تجهیزات اندازه‌گیری مثل فشارسنج‌ها، نیروسنج‌ها و غیره قرار می‌گیرد (قسمت W در شکل ۱).

خطی ساز: نمایه سرعت جریان هوا در مقطع آزمایش باید دارای توزیع یکنواخت بوده و جریان در آن کمترین آشفتگی را داشته باشد. هوای ایجاد شده توسط فن به تنهایی یکنواخت نیست و این جریان برای استفاده در تونل مناسب نمی‌باشد. لذا به کمک توری‌ها و شبکه لانه زنبوری از غیر یکنواختی و آشفتگی جریان هوا کاسته می‌شود (قسمت‌های G و H در شکل ۱).

نازل: جریان هوا با حجم زیاد و سرعت پایین را از قسمت خطی ساز دریافت کرده و آن را با سرعت بالا و حجم پایین با حداقل آشفتگی ممکن در جریان به مقطع آزمایش تحویل می‌دهد (قسمت I در شکل ۱).
پخش کننده: این قسمت بعد از مقطع آزمایش قرار دارد و وظیفه آن کاهش سرعت جریان هوا و باعث تعلیق بهتر دانه می‌شود (قسمت A در شکل ۱).

۱-۱- طراحی مقطع آزمایش

اولین مرحله در طراحی تونل باد انتخاب شکل و اندازه مقطع آزمایش است. از یک طرف شکل آن باید به گونه‌ای باشد که جریان در آن کاملاً یکنواخت و نیز اندازه آن آنقدر زیاد باشد که با قرار گرفتن شیء مورد آزمایش در مقطع آزمایش تأثیری بر روی مشخصات جریان در بالا دست مقطع آزمایش نگذارد. از طرف دیگر انتخاب بهترین شکل مقطع (یعنی دایره) بخصوص با افزایش اندازه ابعاد مقطع آزمایش باعث بالا رفتن هزینه‌های ساخت می‌شود. در این ارتباط مروری بر تونل‌های باد ساخته شده توسط دیگران لازم بنظر می‌رسد. تابک و ولف از تونل بادی که مقطع آزمایش آن دایره با قطر ۲۰۰ میلیمتر بود برای اندازه‌گیری خواص آیرودینامیکی دانه پنبه استفاده نمودند [۹]. همچنین در تحقیق دیگری گوریال و اکالاهان از تونل بادی با مقطع آزمایش مستطیلی به ابعاد ۱۶۰×۱۲۰ میلیمتر جهت مطالعه خواص آیرودینامیکی گستره‌ای از دانه غلات استفاده نمودند [۴]. در مورد مقطع مستطیلی و یا دایروی همانطور که در بالا گفته شد و نیز پوپ و همکارانش اشاره می‌کنند شکل مقطع آزمایش بیشتر بر اساس شرایطی مثل سادگی و هزینه‌های ساخت انتخاب می‌شود [۶]. بعبارتی گرچه شکل دایروی بهتر است ولی چون ساخت قسمتهایی مثل نازل، پخش کننده و خطی سازها با مقطع دایروی کار بسیار مشکلی بود و هزینه‌های بالایی را طلب می‌کرد از این‌رو از مقطع مربعی با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلیمتر استفاده شد. در مورد مقطع آزمایش همانگونه که پوپ و هارپر اشاره می‌کنند طولی مساوی دو برابر بعد اصلی مقطع آزمایش انتخاب شده است [۷]. طول مقطع آزمایش باید آنقدر باشد که با توجه به نوسان نمودن ذرات مورد آزمایش در مقطع بتوان یک وضعیت تعادلی را ایجاد و مشاهده نمود. از طرف دیگر افزایش طول باعث افزایش افت‌ها و افزایش ضخامت لایه مرزی می‌شود. لذا این طول با توجه به تجربیات دیگران انتخاب شد (برای اطلاع بیشتر به مرجع ۱ مراجعه کنید).

از ماده شفاف پلگسی گلس برای ساخت مقطع آزمایش و به منظور مشاهده رفتار ماده در داخل آن استفاده شد. همچنین برای قرار دادن محصول بر روی توری که در ابتدای مقطع آزمایش قرار داده شده، در نزدیک ورودی مقطع آزمایش دریچه‌ای

به طول ۷ cm و عرض ۵ cm تعبیه شده است (شکل ۲).

۲-۱ - پخش کننده

این قسمت بعد از مقطع آزمایش قرار می‌گیرد و چون جسم مورد آزمایش می‌تواند در داخل این قسمت معلق شود بنابراین پخش کننده را حتی می‌توان به عنوان قسمتی از مقطع آزمایش در نظر گرفت. هر پخش کننده توسط نسبت سطوح ورودی و خروجی و زاویه معادل مخروط مطابق شکل ۳ مشخص می‌شود. زاویه انبساط پخش کننده θ ، باید به حدی باشد که پدیده جدایش لایه مرزی روی دیواره اتفاق نیافتد. اغلب محققین زاویه‌ای حدود ۳ درجه را انتخاب کرده‌اند [۲، ۳، ۴، ۸]. در کار حاضر نیز همین مقدار انتخاب شده است. به این ترتیب سرعت در هر مقطع از پخش کننده بر حسب فاصله از مقطع آزمایش قابل محاسبه است. طول پخش کننده باید آنقدر باشد که هوای بیرون از تونل باد بر روی هوای داخل آن تأثیر نگذارد. این طول اغلب حدود ۵ برابر متوسط ابعاد مقطع آزمایش در نظر گرفته می‌شود [۸]. لذا طول عمودی پخش کننده ۱ متر در نظر گرفته شد.

چون ماده مورد آزمایش در این قسمت نیز معلق می‌شود، باید محل تعلیق آن قابل رؤیت باشد. این قسمت نیز از ماده شفاف پلگسی گلس ساخته شد. همچنین برای مشخص بودن ارتفاع تعلیق جسم روی یکی از وجوه آن شاخصی به طول ۱ متر قرار داده شد. قابل ذکر اینکه توسط این پخش کننده حداقل سرعت ایجاد شده در هنگام خروج از پخش کننده برابر ۰/۴۳ سرعت هوا در ورودی پخش کننده است و لذا تولید صدای بسیار کمتری خواهد کرد [۱].

۳-۱ - نازل

تمامی تونل‌های باد دارای نازلی قبل از مقطع آزمایش و بعد از قسمت خطی ساز هستند. در واقع وظیفه نازل کاهش میزان غیر یکنواختی و آشفتگی جریان و افزایش سرعت جریان در مقطع آزمایش می‌باشد. مهمترین پارامتری که بر روی میزان کارایی نازل تأثیر گذار است، ضریب انقباض سطح، CR، (نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل) می‌باشد. دو پارامتر دیگر شکل پروفیل نازل و نیز طول آن است که روی یکنواختی پروفیل سرعت و نیز توسعه لایه مرزی مؤثر می‌باشد. روش محاسبه و انتخاب این پارامترها بر اساس روش محاسباتی مورل می‌باشد [۵]، که در این مورد کار بسیار عمیق و مفصلی ارائه داده است. شکل پروفیل نازل توسط موقعیت نقطه عطف هندسی و توان تابع آن مشخص می‌شود. او با محاسبات خود نشان داد که تابع توانی درجه سوم، نتایج مطلوبی ارائه می‌دهد و معادلات آن را به صورت زیر بیان نمود (شکل ۴):

$$f = 1 - \frac{1}{X^2} \left(\frac{x}{L} \right)^3 \quad \frac{x}{L} \leq X \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{(1-X)^2} \left(1 - \frac{x}{L} \right)^3 \quad \frac{x}{L} > X$$

که L طول نازل (m) و X نسبت فاصله نقطه عطف از ورودی نازل، x_m به L می‌باشد و f تابعی بدون بعد بر حسب x/L است. با معلوم بودن و داشتن قطر ورودی (D_1) و طول نازل، بکمک این معادلات پروفیل نازل مشابه شکل ۴ رسم میشوند. لازم به ذکر است که این محاسبات خاص مقاطع دایروی است ولی برای مقاطع مربعی نیز قابل استفاده است. همانگونه که در بالا اشاره شد اولین مرحله در طراحی نازل انتخاب بهترین نسبت CR می‌باشد. تجربیات مورل، پوپ و هارپر نشان می‌دهند که این نسبت بین ۴ تا ۹ باید باشد [۵ و ۷]. اگر CR کمتر از ۴ باشد تلفات زیاد شده و اگر از ۹ بیشتر باشد ابعاد فن بزرگتر می‌شود که مقرون به صرفه نیست. لذا در این جا از مقدار $CR=4$ استفاده شد [۵]. پس از انتخاب CR مهمترین معیارهای طراحی نازل یکنواختی جریان و جدایش لایه مرزی می‌باشد. میزان غیر یکنواختی پروفیل سرعت در خروجی نازل (Δu) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\ddot{u}_2 = \frac{(V - U_c)_2}{U_{2,\infty}} \quad (3)$$

که V سرعت در دیواره نازل (m/s)، U_c سرعت در مرکز جریان (m/s) و $U_{2,\infty}$ سرعت در پایین دست قسمت خروجی نازل می‌باشد (زیر نویس ۲ نیز اشاره به قسمت خروجی نازل دارد). مورل به صورت تجربی بدست آورد که جریان هوا پس از ورود به نازل و طی کردن فاصله x_i (نسبت به ورودی نازل) حداقل سرعت در نزدیکی دیواره ایجاد می‌شود همچنین قبل از خروجی نازل در فاصله x_e تا لبه خروجی حداکثر سرعت جریان در کنار دیواره ایجاد می‌شود. وی مقادیر x_i و x_e را به صورت بدون بعد ارایه داده و سپس ضرایب فشار حداکثر C_{pi} و حداقل C_{pe} مربوط به این دو نقطه را بدست آورده است. همچنین نتایج تجربی نشان داده که ضریب فشار متوسط با استفاده از متوسط ضرایب فشار نقاط دارای C_{pi} و C_{pe} می‌تواند بدست آید. گرادیان فشار توسط ضریب فشار متوسط تخمین زده می‌شود، لذا $\frac{dC_p}{dx} = \frac{C_{pi}}{s}$ که s فاصله بین نقاط دارای C_{pi} و C_{pe} می‌باشد. علاوه بر این فرض شده است که جدایش جریان در نزدیکی محلی اتفاق افتد که فشار حداکثر است. یعنی جائیکه ضریب فشار C_{pi} ۰/۹۵ باشد. خود مقدار C_{pi} با استفاده از معیار جدایی استراتفورد انتخاب می‌شود، که به صورت زیر بدست می‌آید [۵]:

$$C_{pi} = 0.7 \left(\frac{x_o + 0.9x_i}{s} \right)^{-1/3} (10^{-6} R_x)^{1/15} \quad (4)$$

R_x عدد رینولدز بر حسب x فاصله مکانی نسبت به نقطه شروع لایه مرزی متلاطم (قبل از ورود به نازل) و سرعت نقطه‌ای است که از آنجا فشار افزایش می‌یابد. x_o فاصله شروع لایه مرزی قبل از ورود به نازل و x_i فاصله از ورودی نازل تا نقطه حداکثر فشار می‌باشد و x_i ۰/۹ نسبت تخمینی برای جدایش جریان می‌باشد. مورل موقعیت نقطه عطف X را بر اساس رابطه زیر ارایه داده است:

$$X^{1/2} (1-X)^{-2/3} = F_e^{1/3} G_i^{-1/2} m^{1/2} (m-1)^{1/6} \quad (5)$$

که m نسبت قطر ورودی به قطر خروجی نازل است. F_e و G_i کمیات بدون بعدی هستند که بر حسب C_{pi} تعیین می‌شوند. برای این منظور به اشکال مربوطه در مراجع [۱ و ۵] مراجعه کنید. مقدار L/D_1 نسبت طول نازل به قطر ورودی آن بین ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ می‌تواند انتخاب شود که در اینجا $L/D_1=1$ انتخاب شده است. به این ترتیب برای طراحی نازل ابتدا باید x_i/D_1 محاسبه و آنگاه X از معادله (۵) بدست آید. نهایتاً x_i/D_1 از منحنی ارایه شده بر حسب CR و X تعیین می‌شود و مجدداً C_{pi} محاسبه شده و این سیکل تکرار می‌شود تا مقدار فرض x_i/D_1 و محاسبه شده مساوی باشند. در کار حاضر پس از چند بار سعی و خطا مقادیر زیر برای پارامترهای مختلف نازل بدست آمد:

$$C_{pi}=0.089, s/D_1=0.183, x_i/D_1=0.383m, X=0.451m, L=0.4D_1=$$

با قرار دادن مقدار X در معادله (۲) معادلات بیان کننده شکل پروفیل نازل بدست می‌آید. به منظور کاهش سر و صدای ناشی از فن، و نیز درست پیاده نمودن، معادله پروفیل نازل، آن را از چوب ساخته و سطح داخلی آن با پلاستیک پوشش داده شده است.

۲-۴- تعیین ضریب افت در مقاطع تونل باد

برای محاسبه افت فشار در قسمتهای تونل از روش واتندورف استفاده گردید [۱۱]. او نشان داد راه منطقی برای یافتن افت

در قسمتهای مختلف تونل باد تفکیک تونل به اجزاء تشکیل دهنده آن مثل: نازل، پخش کننده، مقطع آزمایش و ... است. ضریب افت به صورت نسبت فشار استاتیک به فشار دینامیک، در نظر گرفته شده برای اجزاء مختلف تونل جداگانه محاسبه شد و به کمک رابطه زیر این افتها به افت در مقطع آزمایش مربوط گردید:

$$K_o = K \cdot \left(\frac{D_o}{D}\right)^4 \quad (7)$$

در این رابطه، D_o ، قطر مقطع آزمایش، D ، قطر محل مورد نظر از تونل، K و K_o ضرایب افت در مقطع مورد نظر و مقطع آزمایش است. با محاسبه ضرایب افت در نقاط مختلف تونل برحسب مقطع آزمایش و به کمک رابطه زیر توان مورد نیاز تونل محاسبه می‌شود [7].

$$H = \frac{\sum_i^n (K_o)_i}{\eta} \times (q \cdot A \cdot V)_t \quad (8)$$

در این رابطه $\sum_i^n (K_o)_i$ مجموع کل افتها در مقطع آزمایش، η بازده فن، q ، A و V به ترتیب فشار دینامیک (N/m^2)، مساحت مقطع آزمایش (m^2) و سرعت جریان (m/s) در مقطع آزمایش و H توان (W) مورد نیاز تونل باد است. نحوه محاسبه ضرایب افت در مقاطع مختلف تونل در مرجع [1] بطور مفصل بیان شده است. در ادامه تنها ضرایب افت برای توری‌ها و شبکه لانه زنبوری بیان خواهد شد. برای محاسبه ضریب افت توری‌ها K_m ، پوپ و همکارانش رابطه زیر را پیشنهاد کرده‌اند [6]:

$$K_m = K_{mesh} K_{Rn} \sigma_s + \left(\frac{\sigma_s}{\beta_s}\right)^2 \quad (9)$$

در این رابطه، β_s تخلخل توری، σ_s صلبیت توری (که برابر $1 - \beta_s$ می‌باشد)، K_{mesh} فاکتور مش و K_{Rn} ضریبی است که با توجه به عدد رینولدز ($Re_w = \frac{V d_w}{\nu}$) توری‌ها به صورت زیر بدست می‌آید:

$$K_{Rn} = \begin{cases} 0.785 \left(1 - \frac{Re_w}{354}\right) + 1/01 & 0 \leq Re_w < 400 \\ 1 & Re_w \geq 400 \end{cases} \quad (10)$$

تخلخل توری‌ها تابعی از قطر سیم توری (d_m) و فاصله بین سیم‌های آن (w) بوده و به کمک رابطه زیر قابل محاسبه است [6]:

$$\beta_s = (1 - d_w / w) \quad (11)$$

چنانچه از چند لایه توری استفاده شود مجموع افت آنها منظور می‌شود. فاکتور مش (K_{mesh}) برای توری‌های فلزی صاف و نو ۱/۳ و مواد فلزی درجه ۲/۱ پیشنهاد شده است. بر این مبنا برای دو لایه توری فلزی با مش ۴۰ و سه لایه توری با مش ۵۰ جمعاً ضریب افتی معادل ۶/۴۱ بدست آمده است. ضریب افت توری در مقطع آزمایش از رابطه ۷ برابر ۰/۴ محاسبه گردید. برای محاسبه ضریب افت در شبکه لانه زنبوری رابطه زیر پیشنهاد شده [6]:

$$K_h = \lambda_h \left(\frac{l_h}{D_h} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (12)$$

که β_h تخلخل شبکه لانه زنبوری، l_h طول شبکه، D_h قطر هیدرولیکی سلولهای شبکه و λ_h ضریبی است که با توجه به عدد رینولدز شبکه ($Re_\delta = \frac{V\delta}{\nu}$)، از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\lambda_h = \begin{cases} 0.375 \left(\frac{\delta}{D_h} \right)^{0.4} Re_\delta^{0.1} & Re_\delta \leq 275 \\ 0.214 \left(\frac{\delta}{D_h} \right)^{0.4} & Re_\delta > 275 \end{cases} \quad (13)$$

در این رابطه δ ضخامت سلولهای شبکه لانه زنبوری است. نظر به اینکه شبکه لانه زنبوری از نی‌های آب میوه بطول mm ۶۰ و ضخامت mm ۰/۱ که قطر سلولهای آن mm ۶ است، ساخته شده‌اند. با توجه به مقدار محاسبه عدد رینولدز ($Re_\delta = 50$) از رابطه ۱۳ مقدار $\lambda_h = 0.049$ محاسبه گردید، که در نهایت از رابطه ۱۲ مقدار K_h معادل ۰/۷۴۲ بدست می‌آید. در نهایت ضریب افت شبکه لانه زنبوری در مقطع آزمایش از رابطه ۷ برابر ۰/۰۴۶ محاسبه گردید. به این ترتیب ضرایب افت فشار بر حسب آنچه در مقطع آزمایش داریم، بصورت جدول ۱ خلاصه می‌شود. پس از تعیین ضرایب افت در مقاطع مختلف تونل باد، با توجه به مجموع این مقادیر، ضریب افت کلی در تونل بدست آمده و با در نظر گرفتن راندمان ۶۰ درصد و ضریب اطمینان ۱/۴ فن جریان محوری با توان ۵۵۰ وات برای تأمین هوای مورد نیاز تونل انتخاب گردید. همچنین به منظور تغییر سرعت جریان هوا در مقطع آزمایش، از دیافراگم - که قبل از فن قرار می‌گیرد استفاده شد (شکل ۱). بر حسب میزان باز شدگی‌های مختلف دیافراگم، سرعت در بیش از ۲۰ نقطه در مقطع آزمایش توسط سیم داغ اندازه‌گیری شد و میانگین آنها به عنوان سرعت در مقطع آزمایش در نظر گرفته شد (شکل ۵).

به منظور اندازه‌گیری سرعت حد دانه، آن را در قسمت (B) تونل قرار داده، سپس دیافراگم تونل آنقدر باز شد که دانه در نقطه ای واقع در پخش کننده معلق شود. ارتفاع تعلیق ثبت و با مراجعه به شکل ۵ سرعت در مقطع آزمایش تعیین و نهایتاً سرعت در نقطه تعلیق مشخص گردید.

۳ - آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها

همانطوریکه قبلاً گفته شد، اجسام مورد آزمایش دانه‌های کشاورزی با توجه به کاربرد زیاد آنها می‌باشد. در این میان دانه‌های گندم، عدس و ماش به علت آنکه دارای شکل متفاوتند، برای اندازه‌گیری سرعت حدشان در نظر گرفته شدند. ۳۰۰۰ عدد دانه گندم، عدس و ماش را به طور تصادفی انتخاب نموده و هریک از آنها را توسط ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شد. وزن دانه گندم بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ گرم، عدس بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۹ و ماش بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۸ گرم متغیر بود. لذا دانه‌های گندم به سه دسته و عدس و ماش به چهار دسته با طول دسته ۰/۰۱ گرم تقسیم شد. از هر دسته ۲۰ عدد دانه به تصادف انتخاب شد. به کمک کولیس سه بعد اصلی شامل قطر بزرگ متوسط و کوچک هر دانه اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از حجم مایع جابجا شده، چگالی دانه‌ها محاسبه گردید (چگالی دانه گندم، عدس و ماش به ترتیب برابر ۱۲۶۷/۰۲، ۱۲۶۲/۳۸ و ۱۲۹۹/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد). با استفاده از سه بعد اصلی هر دانه قطر معادل دانه‌ها به منظور محاسبه سطح مؤثر دانه‌ها تعیین گردید. میانگین قطر معادل دانه‌های گندم، عدس و ماش به ترتیب برابر ۳/۷۲، ۴/۷۱ و ۴/۴۳ میلیمتر تعیین شد. جزئیات کامل اندازه‌گیری‌های مربوط به این دانه‌ها در مرجع [۱] موجود است.

۴ - نتایج

در طی آزمایش، شرایط ایده‌آل تعلیق دانه‌ها حاصل نشد، زیرا دانه‌ها دارای شکل نامتقارن بودند. در هر لحظه قسمتی از دانه در برابر جریان هوا قرار می‌گرفت. در صورتیکه قسمتی از دانه که دارای کمترین سطح است، در مقابل جریان هوا قرار می‌گرفت در بخش‌های پایینی تونل معلق می‌شد و اگر قسمتی از دانه که دارای سطح مؤثر بیشتری بود در برابر جریان قرار می‌گرفت، دانه در بخش‌های بالایی تونل معلق می‌شد. در بین دانه‌ها، ماش به علت تقارن بیشتری که در شکل داشت، رفتار متعادل‌تری از خود در تونل نشان می‌داد. این وضعیت نیز توسط دیگر محققین گزارش شده است [۲، ۳، ۴ و ۹]. به همین علت سرعت حد برای هر دانه ۵ بار اندازه‌گیری شد و میانگین آن به عنوان سرعت حد هر دانه در نظر گرفته شد. مقدار متوسط سرعت حد دانه‌های گندم، عدس و ماش برابر $۷/۳۶$ ، $۷/۴$ و $۹/۵۹$ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد.

۴-۱ - تأثیر جرم روی سرعت حد

به منظور بررسی اثر جرم روی سرعت حد دانه‌ها، آنالیز واریانس روی داده‌های بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری SPSS انجام شد. نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که وزن تأثیر معنی‌داری روی سرعت حد دانه‌ها دارد. تغییرات سرعت حد بر حسب جرم دانه‌ها در شکل ۶ آمده است. مطابق شکل با افزایش جرم دانه‌ها سرعت حد بطور خطی افزایش می‌یابد. روابط خطی که این تغییرات را بیان می‌کنند در جدول ۲ آمده است. علت افزایش سرعت حد در اثر افزایش جرم دانه‌ها را می‌توان با توجه به معادله (۱) توجیه کرد. با وجود آنکه جرم دانه عدس از ماش بیشتر است اما با توجه به شکل ۶ سرعت حد دانه عدس کمتر از سرعت حد دانه ماش است. دلیل این امر را می‌توان به خاطر زیاد بودن سطح مؤثر دانه عدس نسبت به ماش دانست. نتایجی که محققین دیگر در مورد دانه گندم بدست آورده‌اند، در جدول ۳ آمده است. نوع گونه گندم در این تحقیقات ذکر نشده است، اما میانگین سرعت حد گندم ($۷/۳۶$ متر بر ثانیه) در این تحقیق هماهنگی مناسبی را با نتایج این محققین نشان می‌دهد. گوریال و اکالاهان نیز سرعت حد دانه عدس به جرم $۰/۰۷۸$ گرم را برابر $۸/۳$ متر بر ثانیه تعیین کردند که در این تحقیق سرعت حد برای عدس در گستره وزنی $۰/۰۷$ تا $۰/۰۸$ گرم برابر $۸/۱$ متر بر ثانیه بدست آمد.

۴-۲ - محاسبه ضریب بازدارندگی دانه‌ها

ضریب بازدارندگی دانه‌ها با استفاده از رابطه ۱ و عدد رینولدز بر اساس قطر معادل دانه‌ها محاسبه شد (جدول ۴). در گستره عدد رینولدز ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ مقدار ضریب بازدارندگی استوانه، دیسک و کره به ترتیب برابر ۱، $۱/۲۷$ و $۰/۴۴$ است. با توجه به جدول ۴ ضریب بازدارندگی گندم، عدس و ماش به ترتیب برابر $۰/۹۲$ ، $۱/۲۱$ و $۰/۶۶$ است. با مقایسه این ضرایب با ضریب بازدارندگی کره، استوانه و دیسک معلوم می‌شود که گندم شبیه استوانه، عدس شبیه دیسک و ماش شبیه کره است. گوریال و اکالاهان ضریب بازدارندگی دانه گندم به جرم $۰/۰۳$ گرم را برابر $۰/۸۵$ و ضریب بازدارندگی دانه عدس به جرم $۰/۰۷۸$ گرم را برابر ۱ تعیین کرده‌اند. که هماهنگی مناسبی بین مقادیر تعیین شده در این تحقیق با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سایر محققین وجود دارد.

۵ - جمع بندی

- ۱- افزایش جرم باعث افزایش سرعت حد دانه‌ها به طور خطی می‌شود.
- ۲- با توجه به ضریب بازدارندگی دانه‌ها، معلوم گردید دانه گندم، عدس و ماش بیشتر شبیه استوانه، دیسک و کره‌اند.
- ۳- با مقایسه نتایج آزمایش با نتایج دیگر محققین میتوان نتیجه گرفت که تونل باد ساخته شده با دقت مناسبی قادر است سرعت حد اجسام ریز را اندازه‌گیری نماید.

تشکر و قدردانی

در پایان لازم است از دانشگاه تربیت مدرس که مقدمات انجام این تحقیق و گروه ماشینهای کشاورزی دانشگاه فردوسی که در انجام ساخت دستگاه همکاری نمودند، تشکر و قدردانی گردد

فهرست علائم

| | | | |
|--|-----------------------|--|---------------------|
| سرعت در پایین دست قسمت خروجی نازل (m/s) | U_{∞} | سطح (m ²) | A |
| سرعت هوا در مرکز جریان (m/s) | U_c | ضرایب فشار حداکثر و حداقل (بدون بعد) | C_{pe} و C_{pi} |
| سرعت هوا در دیواره نازل (m/s) | V | ضریب انقباض سطح (بدون بعد) | CR |
| سرعت حد (m/s) | V_t | قطر مقطع آزمایش و ورودی نازل (m) | D_1, D_0 |
| نسبت فاصله نقطه عطف از ورودی نازل به طول نازل (بدون بعد) | X | شتاب ثقل (m/s ²) | g |
| فاصله نقطه عطف از ورودی نازل (m) | x_m | توان (W) | H |
| | | ضریب افت در مقطع آزمایش و نقاط مختلف تونل (بدون بعد) | K, K ₀ |
| | | طول نازل (m) | L |
| | | نسبت قطر ورودی به قطر خروجی نازل (بدون بعد) | m |
| چگالی هوا (kg/m ³) | ρ | جرم جسم (kg) | M |
| تخلخل توری و شبکه لانه زنبوری | β_h و β_s | فشار دینامیک (N/m ²) | q |
| صلبیت توری (که برابر $1-\beta_s$ می باشد)، بازده فن | σ_s | عدد رینولدز (بدون بعد) | Re |
| ضریب شبکه لانه زنبوری | λ_h | غیر یکنواختی پروفیل سرعت در خروجی نازل (بدون بعد) | \ddot{u}_r |

فهرست علائم یونانی

جدول (۱) ضرایب افت فشار در مقاطع مختلف تونل باد نسبت به مقطع آزمایش.

| مقطع | مقطع آزمایش | بخش کننده | نازل | توری ها | شبکه لانه زنبوری | ناحیه بالای بخش کننده | مجرای فن | توری مقطع آزمایش |
|------------|-------------|-----------|--------|---------|------------------|-----------------------|----------|------------------|
| K_0 | ۰/۰۴۲۶ | ۰/۱۰۶۶ | ۰/۰۱۰۸ | ۰/۴ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۱۱ | ۰/۰۰۲۳ | ۰/۶۱ |
| درصد تلفات | ۳/۴۹۱ | ۸/۷۳۷ | ۰/۸۸۸ | ۳۲/۷۸ | ۳/۷۷ | ۰/۰۹ | ۰/۱۸۸ | ۵۰ |

جدول (۲) روابط خطی حاصله برای تغییرات سرعت حد (m/s) بر حسب جرم دانه ها (g).

| دانه | روابط خطی | R^2 |
|------|------------------------|-------|
| گندم | $V_t = 35m + 6/1417$ | ۰/۹۸۶ |
| عدس | $V_t = 89/24m + 1/152$ | ۰/۹۷۵ |
| ماش | $V_t = 44/8m + 6/9.2$ | ۰/۸۵۷ |

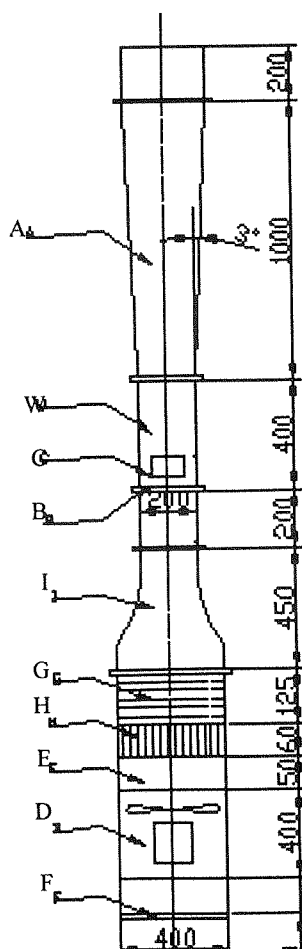
$$V_t: \text{سرعت حد (m/s)} \quad m: \text{جرم دانه (g)}$$

جدول (۳) مقادیر سرعت حد گندم (m/s) اندازه گیری شده در این تحقیق در مقایسه با دیگر محققین.

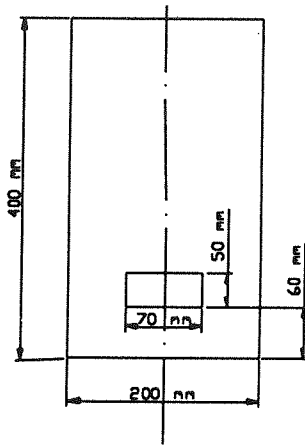
| در این تحقیق | Shellard and Macmillan (1978) | Bilanski and Lal (1965) | Uhl and Lamp (1966) | Gorial and O'callaghan (1990) |
|--------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------|
| ۶/۸-۸/۶۳ | ۸ | ۸/۹ | ۵/۷-۹ | ۶/۵-۱۰ |

جدول (۴) مقادیر میانگین سرعت حد و ضریب بازدارندگی با توجه به دسته‌های وزنی مختلف و قطر معادل دانه‌ها.

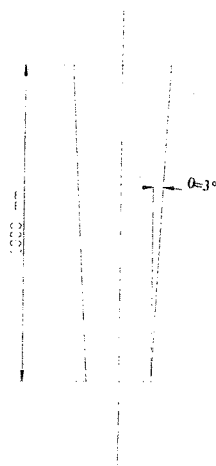
| عدد رینولدز | ضریب بازدارندگی | سرعت حد (m/s) | قطر معادل (mm) | دسته‌های وزنی (g) |
|-------------|-----------------|---------------|----------------|-------------------|
| ۱۶۱۵ | ۰/۹۱ | ۷/۰۴ | ۳/۳۵ | ۰/۰۲-۰/۰۳ |
| ۱۸۷۹ | ۰/۹۴ | ۷/۳۲ | ۳/۷۵ | ۰/۰۳-۰/۰۴ |
| ۲۱۵۷ | ۰/۹۲ | ۷/۷۴ | ۴/۰۷ | ۰/۰۴-۰/۰۵ |
| ۱۷۸۵ | ۱/۶۴ | ۵/۹۸ | ۴/۳۶ | ۰/۰۵-۰/۰۶ |
| ۲۱۹۰ | ۱/۲۹ | ۶/۹۴ | ۴/۶۱ | ۰/۰۶-۰/۰۷ |
| ۲۶۸۴ | ۰/۹۹ | ۸/۱ | ۴/۸۴ | ۰/۰۷-۰/۰۸ |
| ۲۹۵۷ | ۰/۹۲ | ۸/۵۷ | ۵/۰۴ | ۰/۰۸-۰/۰۹ |
| ۲۵۱۴ | ۰/۶۸ | ۹/۰۹ | ۴/۰۴ | ۰/۰۴-۰/۰۵ |
| ۲۶۷۰ | ۰/۷۳ | ۹/۰۳ | ۴/۳۲ | ۰/۰۵-۰/۰۶ |
| ۳۱۱۹ | ۰/۶۳ | ۹/۹۷ | ۴/۵۷ | ۰/۰۶-۰/۰۷ |
| ۳۳۶۸ | ۰/۶۳ | ۱۰/۲۷ | ۴/۷۹ | ۰/۰۷-۰/۰۸ |



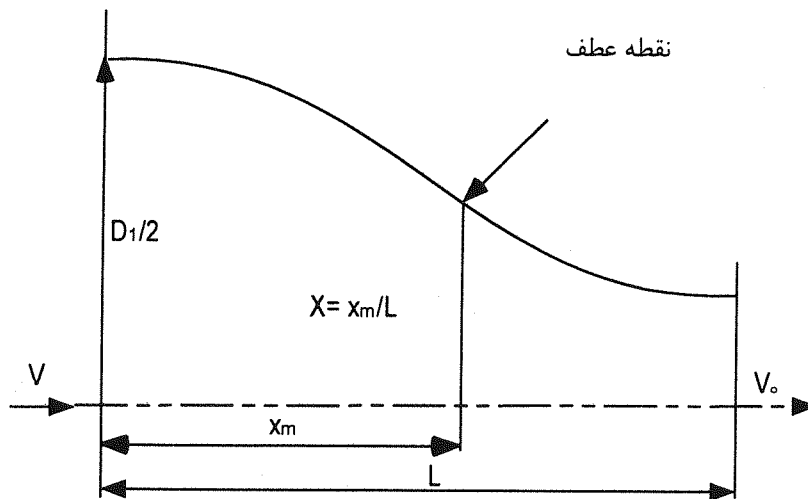
شکل (۱) نمایی از تونل باد طراحی و ساخته شده. (A) پخش کننده، (B) توری برای قرار گیری جسم روی آن، (C) دریچه، برای قرار دادن محصول روی توری، (D) فن جریان محوری (E) مقطع انعطاف پذیر، (F) دیافراگم، (G) ۵ لایه توری با مش ریز، (H) شبکه لانه زنبوری، (I) نازل، (W) مقطع آزمایش.



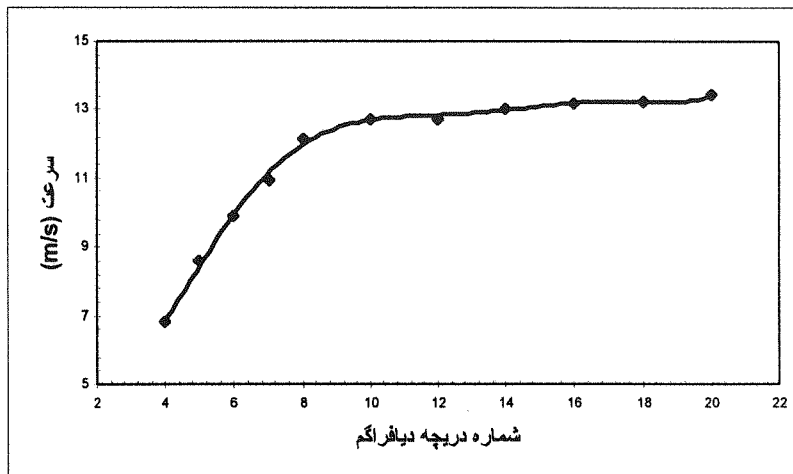
شکل (۲) نمایی از مقطع آزمایش تونل باد.



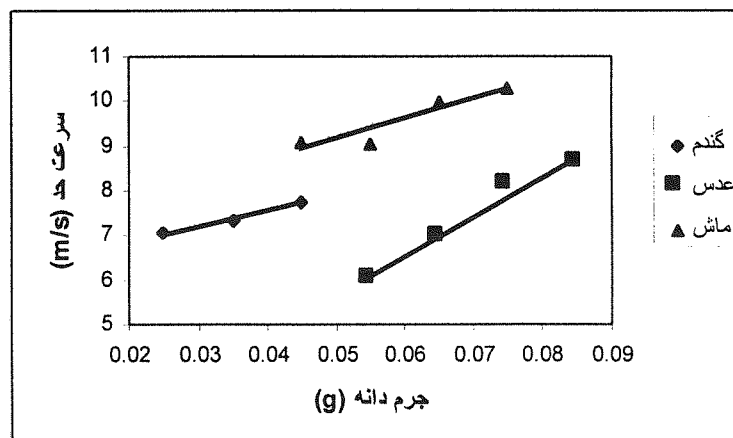
شکل (۳) نمایی از پخش کننده تونل باد



شکل (۴) نمایی از پروفیل نازل تونل باد.



شکل (۵) تغییرات سرعت در مقطع آزمایش بر حسب باز شدگی‌های مختلف دریچه دیافراگم.



شکل (۶) تغییرات سرعت حد دانه‌های گندم، عدس و ماش بر حسب جرم دانه‌ها.

زیر نویس‌ها

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| 1- Drag coefficient | 5- Diffuser |
| 2- Terminal velocity | 6-Screen solidity |
| 3- Drive section | 7-Hot wire |
| 4- Nozzel (Contraction con) | 8-Particle density |

مراجع

- ۱- مهدی‌زاده، ر. طراحی و ساخت تونل باد جهت اندازه‌گیری خواص آیرودینامیکی محصولات کشاورزی. پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸۲ص. (۱۳۷۹).
- [2] Allen, A.W. and K.C. Watts, Properties of cowpeas. Journal of Agricultural Engineering Research, 68:159-167, (1997).
- [3] Bilanski, W.K. and R. Lal, Behavior of threshed materials in a vertical wind tunnel. Transaction of the American Society of Agricultural Engineering. 8:411-413, (1965).
- [4] Gorial, B.Y. and J.R. O'callaghan, Aerodynamic properties of grain/straw materials. Journal of Agricultural Engineering Research, 46:275-290, (1990).
- [5] Morel, T. Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contractions. Journal of Fluids Engineering, June 1975, 225, (1975).

- [6] Pope, A., J.B. Barlow, and W.H. Rae, Low-Speed Wind Tunnel Testing. New York: Wiley, USA, (1999).
- [7] Pope, A. and J.J. Harper, Low-Speed Wind Tunnel Testing. New York: Wiley, USA, (1984).
- [8] Shellard, J.E. and R.H. Macmillan, Aerodynamic properties of threshed wheat materials. Journal of Agricultural Engineering Research, 23: 273-281, (1978).
- [9] Tabak, S. and D. Wolf, Aerodynamic properties of cotton seeds. Journal of Agricultural Engineering Research, 70: 257-265, (1998).
- [10] Uhl, J. B. and B. J. Lamp, Pneumatic separation of grain and straw mixtures. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, 9(2): 244-246, (1966).
- [11] Wattendorf, F.L. Factors influencing the energy ratio of return flow wind tunnels. Paper presented at the Fifth International Congress for Applied Mechanics. Cambridge. (1938)