

طراحی و ساخت پیکنومتر گازی جهت اندازه‌گیری حجم محصولات کشاورزی

مجید رهنما^۱ - محمد هادی خوش تقاضا^۲

چکیده

دستگاه پیکنومتر گازی حجم مواد و محصولات را با دقت زیاد می‌تواند اندازه‌گیری کند. این دستگاه دارای دو مخزن خالی، که یکی از مخازن با فشار مشخصی از گاز پر می‌شود. بعد از قرار دادن نمونه در داخل مخزن دیگر و تبادل گاز در مخازن، بوسیله شرایط نهایی فشار داخل مخازن، حجم نمونه با دقت مناسب اندازه‌گیری می‌شود. در این تحقیق ضمن طراحی و ساخت دستگاه پیکنومتر گازی برای محصولات دانه‌ای، تأثیر سه فشار اولیه ۵۵۰، ۶۵۰ و ۷۰۰ $mmHg$ با گاز هوا بر روی دقت و حساسیت دستگاه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. بیشترین دقت در فشار اولیه ۷۰۰ $mmHg$ با بزرگترین حجم نمونه $31/2\text{ cm}^3$ (خطای دقت برابر ۰/۹۳) بدست آمد. تکرارپذیری دستگاه نیز با افزایش حجم نمونه اولیه و فشار اولیه افزایش یافت. کمترین خطای تنظیم (۰/۵۸) در فشار اولیه ۷۰۰ $mmHg$ و حجم نمونه $31/2\text{ cm}^3$ بدست آمد. حساسیت دستگاه نیز با افزایش حجم نمونه و فشار اولیه بهتر شد. (در فشار اولیه ۷۰۰ $mmHg$ و حجم نمونه $31/2\text{ cm}^3$ برابر $1/2\text{ mmHg/cm}^3$ بود). در پایان حجم چند محصول دانه‌ای (گندم، ذرت و ارزن) به کمک این دستگاه اندازه‌گیری شد که در محدوده حجم ذکر شده این محصولات در منابع بود.

- ۱- عضو هیئت علمی دانشگاه شهید چمران اهواز- مجتمع عالی رامین
 ۲- استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۱- مقدمه:

طراحی مناسب و شایسته ماشین‌آلات کشاورزی برای درو، برداشت، ذخیره محصولات و تبدیل محصولات به مواد غذایی نیاز به شناخت خصوصیات فیزیکی محصولات دارد. از جمله این خصوصیات جرم حجمی دانه یا جرم حجمی توده محصول و همچنین درصد تخلخل آنها می‌باشد. یک روش معمول برای اندازه‌گیری حجم محصولات کشاورزی، روش جابجایی مایع است که با استفاده از تغییر حجم مایع در اثر ورود نمونه به داخل مایع، حجم نمونه اندازه‌گیری می‌شود. تشکیل حباب‌های هوا و نفوذ مایع به داخل نمونه ایجاد خطا در اندازه‌گیری می‌کند. در روش دیگر از جابجایی گاز برای اندازه‌گیری حجم محصولات استفاده می‌شود که مشکلات ذکر شده در روش جابجایی مایع را ندارد.

برای اندازه‌گیری جرم حجمی دانه‌های گندم و جو، چانگ (Chang, 1988) از گاز هلیوم که سریع به دمای تعادل می‌رسد و رفتاری مشابه گازهای ایده‌آل داشت، استفاده نمود. اورکلاید و رونی (Orr Clyde. And Ronnie, 1991) جهت محاسبه جرم مخصوص دانه، یک دستگاه پیکنومتر گازی ساخت. این دستگاه دارای یک سنسور در زیر مخزن نمونه جهت اندازه‌گیری وزن نمونه بود. باچلر و لینچ (Batchlor and Lynch, 1978) دستگاه پیکنومترگازی برای اندازه‌گیری تخلخل مواد پلیمری طراحی کردند. این دستگاه از یک اتاقک نمونه با حجم ثابت بعلاوه مخزن ذخیره با حجم مشخص که به یک مانومتر الکتریکی متصل بود تشکیل شده است. دستگاه ساخته شده شامل یک ترموکوپل بود که تغییرات دما را اندازه‌گیری کرده و به کامپیوتر می‌داد. ترنر (Turner, 1978) پیکنومتر گازی ساخت که حجم مخازن آن تغییر می‌کرد. دستگاه وی شامل دو مخزن که اساساً حجم‌های مساوی داشتند و دو پیستون که در داخل آنها حرکت رفت و برگشتی انجام می‌داد، بود. با حرکت پیستون‌ها فشار داخل مخازن تغییر می‌کرد و به وسیله این تغییر فشار، حجم نمونه که در داخل یکی از مخازن قرار می‌گرفت، اندازه‌گیری می‌شد.

اهداف از این مقاله شامل: طراحی و ساخت دستگاه پیکنومتر گازی، تعیین تأثیر تغییر فشار اولیه روی دقت دستگاه و تأثیر تغییر حجم مخازن نمونه و فشار روی دقت دستگاه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پیکنومتر گازی، تخلخل، حجم و حجم مخصوص

۲- مواد و روشها:

اساس کار دستگاه پیکنومتر گازی بر اساس قانون عمومی گازها استوار است. حجم نمونه را می‌توان بوسیله این قانون برای یک سیستم بسته با تعداد مولهای مشخصی از گاز موجود و با استفاده از تغییر پارامترهای وابسته به این سیستم، اندازه‌گیری نمود. از مشاهدات تجربی برای تغییر رفتار، حجم ویژه، دما و فشار برای گازهایی با چگالی کم معادله حالت زیر پیشنهاد شده است (Sonntag, 1998; Sengel, 1998).

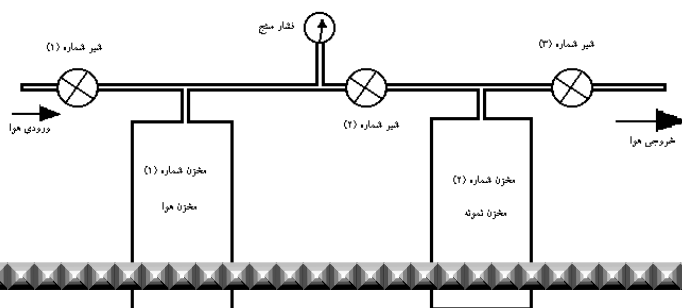
$$PV = n\bar{R}T \quad (1)$$

در رابطه فوق، V ، حجم (m^3)، P ، فشار (kPa)، T ، دما (K) و n ، تعداد مولهای گاز سیستم می‌باشد. در این رابطه \bar{R} ، ثابت جهانی گازها، برابر $\bar{R} = 8.3145 \text{ kJ/kmolK}$ است. از طرف دیگر با توجه به اینکه \bar{R} برای هر گاز مقدار ثابتی دارد، رابطه مشهور بویل (Boyle) و چارلز (Charles) برای سیستمی با تعداد مشخصی مولکول را می‌توان بدست آورد یعنی برای هر گاز داریم:

$$(2)$$

$$\frac{PV_1}{T_1} = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3}$$

در رابطه فوق، P_1 ، V_1 و T_1 به ترتیب فشار، حجم و



دمای سیستم با تعداد مشخص مولکول در حالت اول و P_1 ، V_1 و T_1 به ترتیب فشار، حجم و دمای سیستم در حالت دوم می‌باشد. شکل (۱) شمای کلی دستگاه پیکنومتر گازی را نشان می‌دهد. این دستگاه دارای دو مخزن با حجم مشخص می‌باشد (مخزن فشار یا مخزن شماره (۱) و مخزن نمونه یا مخزن شماره (۲)) که این دو مخزن بوسیله یک شیر با همدیگر در ارتباط می‌باشند (شیر شماره ۲). مخزن شماره یک بوسیله شیر شماره سه به هوای آزاد در ارتباط می‌باشد. مخزن هوا نیز بوسیله شیر شماره (۱) به ورودی هوا (خروجی کمپروسور) در ارتباط است. گاز یا هوای جو تحت فشار بعد از عبور از شیر شماره یک وارد مخزن شماره یک می‌شود. طرز کار دستگاه به این صورت است که ابتدا شیر شماره یک باز می‌شود. بنابراین مخزن هوا بوسیله گاز با فشار P_1 پر می‌شود، با فرض اینکه گاز مورد استفاده ایدال باشد، رابطه (۱) برای سیستم فوق برابر است با:

$$P_1 V_c = n_c \bar{R} T_c \quad (3)$$

که T_c ، V_c و P_1 به ترتیب، دما، حجم و فشار مخزن فشار (مخزن ۱) و n_a تعداد مولهای موجود در مخزن تحت فشار P_1 می‌باشد. نمونه مورد آزمایش را در مخزن شماره دو (مخزن نمونه) قرار می‌دهیم، داریم:

$$P_a (V_a - V_s) = n_a \bar{R} T_a \quad (4)$$

در این معادله، P_a ، V_a ، T_a و n_a بترتیب، فشار، حجم، دما و تعداد مولهای موجود در مخزن نمونه و V_s حجم نمونه می‌باشد. در رابطه فوق، P_a با فشار محیط برابر می‌باشد (در موقع قرار دادن نمونه به داخل مخزن، هوای داخل آن با فشار هوای جو به تعادل می‌رسد) و چون فشار بصورت نسبی بیان می‌شود، P_a برابر صفر در می‌آید. حال شیر شماره یک را بسته و شیر شماره دو را باز می‌کنیم تا فشار سیستم بعد از چند ثانیه به تعادل برسد. معادله شماره (۲) برای سیستم فوق بصورت زیر در می‌آید:

$$P_1 (V_a - V_s) + P_2 V_c = n_r \bar{R} T \quad (5)$$

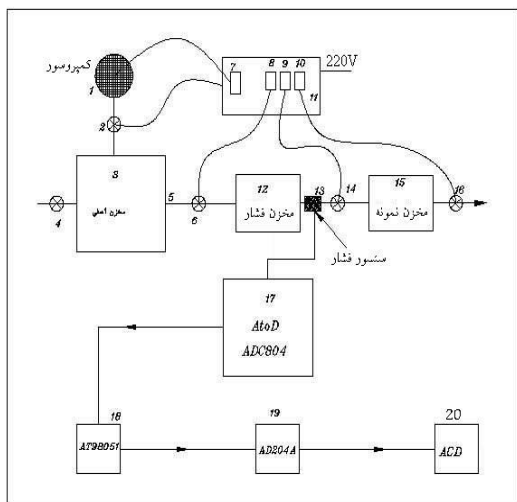
که P_2 فشار تعادلی سیستم، n_r تعداد کل مولهای سیستم می‌باشد که برابر $n_c + n_a$ است و T دمای سیستم که برابر T_c و T_a می‌باشد ($T_c = T_a = T$). با قرار دادن معادله‌های (۳) و (۴) در معادله (۵) و ساده کردن معادله، حجم نمونه V_s بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_s = V_a - \left(\frac{P_1 - P_2}{P_2} \right) V_c \quad (6)$$

در طراحی معمولاً حجم مخازن را برابر می‌گیرند ($V_a = V_c$). برای آزمایش صحت کار دستگاه هیچ نمونه‌ای در دستگاه پیکنومتر گازی قرار داده نمی‌شود و آزمایش فوق برای مخازن خالی انجام می‌گیرد بنابراین از رابطه (۶)، $2P_2 = P_1$ بدست می‌آید. که با قرائت دو مقدار فشار می‌توان به صحت کار دستگاه پی برد. دستگاه ساخته شده دارای قسمت‌های اصلی زیر می‌باشد (شکل ۲).

- ۱- مخزن اصلی ۲- کمپروسور ۳- لوله‌های رابط ۴- مخازن نمونه و فشار ۵- شیرهای برقی قطع و وصل برق ۶- مدار الکترونیکی دستگاه.

نحوه کار دستگاه به این صورت است که به کمک کلید شماره (۷) کمپروسور (۱) بکار افتاده و مخزن اصلی (۵) را پر از هوا تا فشار از پیش تعیین شده (مقدار فشاری که توسط کلید کنترل فشار تعیین شده است) می‌کند. در این موقع کلید قطع شماره (۲) برق مدار کمپروسور (۱) را قطع می‌کند. نمونه را در مخزن شماره (۱۵) قرار می‌دهیم و در مخزن را محکم می‌بندیم. شیر شماره (۶) را با استفاده از کلید مربوطه آن یعنی کلید شماره (۸) باز کرده و مخزن شماره (۱۲) را پر از هوا با فشار می‌کنیم. سپس شیر ذکر شده را بسته و با زدن دکمه مربوط به واحد پردازش دستور قرائت و ذخیره مقدار P_1 را از سنسور فشار (۱۳) می‌دهیم. بعد از داده برداری توسط مبدل، شیر برقی شماره (۱۴) توسط کلید شماره (۹) باز تا هوا وارد مخزن نمونه (۱۵) شود و بعد از بیست ثانیه فشار سیستم به فشار تعادلی P_2 می‌رسد. در این موقع نوسانات فشار ناشی از حرکت هوا از مخزن تحت فشار به مخزن نمونه ناچیز شده و آماده داده برداری توسط مبدل می‌باشد بنابراین دوباره دکمه مربوط به داده برداری زده شده و فشار P_2 توسط مبدل (۱۷)، اندازه‌گیری و داده‌برداری می‌شود. داده‌ها به واحد محاسبه (۱۸) فرستاده شده و حجم نمونه اندازه‌گیری می‌شود. حجم اندازه‌گیری



شکل (۲)

شده به واحد نمایش (۱۹) فرستاده و مقدار حجم توسط نمایشگر (۲۰) نشان داده می‌شود. برای تکرار آزمایش کافی است که شیرهای شماره (۱۴) و (۱۶) را توسط دگمه‌های شماره (۹) و (۱۰) باز کرده تا فشار مخازن به فشار اتمسفر برسد سپس هر سه شیر (۶)، (۱۴) و (۱۸) را بسته و مراحل فوق را دوباره تکرار می‌کنیم. بعد از مشخص کردن مقادیر دقیق حجم مخازن نمونه و فشار، لازم بود که مشخصات اصلی دستگاه اندازه‌گیری و تعیین شود. برای این منظور ابتدا سه نمونه فلزی که دارای حجم مشخصی بودند، انتخاب و برای تعیین مشخصات دستگاه تعیین حجم شدند. نمونه‌ها از جنس فولاد نرم (میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر) انتخاب و با استفاده از دستگاه تراش به شکل استوانه و به حجم $10/39$ سانتیمتر مکعب (دو نمونه به قطر 15mm و طول $58/85\text{mm}$) و $10/42$ سانتیمتر مکعب (به قطر 15mm و طول 59mm) در آمدند. برای تعیین مشخصات دستگاه، یک بار فقط یک نمونه $10/39$ سانتیمتر مکعبی و بار دیگر هر سه نمونه فلزی، با حجم کل $31/2$ سانتیمتر مکعب بوسیله دستگاه ساخته شده در سه فشار 550 ، 650 ، 700 میلی‌متر جیوه و با ده تکرار تعیین حجم شد. چون قدرت تشخیص فشارسنج مورد استفاده برابر $0/1$ میلی‌متر جیوه بود و برای اینکه این عدد در برابر فشار اولیه ناچیز باشد و درصد خطا کاهش یابد، تصمیم گرفته شد از ماکزیمم فشاری که فشارسنج می‌تواند اندازه‌گیری کند استفاده شود، بنابراین فشارهای فوق انتخاب شد. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. با استفاده از این جدول، مشخصات اصلی دستگاه تعیین شد. این مشخصات تعیین شده به قرار زیر می‌باشند:

۱- دقت (*Accuracy*): دقت اندازه‌گیری عبارت است از انطباق و نزدیکی مقدار کمیت اندازه‌گیری شده به مقدار واقعی آن کمیت.

در صد دور بودن از مقدار واقعی را به صورت درصدی از خطا بیان می‌کنند (مینائی، ۱۳۷۹؛ ملکی و دیبایی نیا، ۱۳۶۹).

$$(7) \quad \text{انحراف از مقدار واقعی (استاندارد)} \\ \text{مقدار واقعی (استاندارد)} = \frac{\text{انحراف از مقدار واقعی (استاندارد)}}{\text{مقدار واقعی (استاندارد)}} = (E\%) \text{ درصد خطای دقت}$$

مقدار این پارامتر برای سه فشار مورد آزمایش اندازه‌گیری شد. این مقادیر در جدول (۲) آورده شده است. نمودار این جدول در شکل (۴) آورده شده است. با توجه به این نمودار، با افزایش فشار، خطای دقت کاهش و در نتیجه دقت دستگاه برای هر دو نمونه، افزایش می‌یابد. با افزایش فشار اولیه (P_1) از 550mmHg به 700mmHg ، خطای دقت در نمونه $10/39\text{cm}^3$ به اندازه $1/35\%$ و در نمونه $31/2\text{cm}^3$ به اندازه $0/8\%$ کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۴) در فشار اولیه ثابت، دقت دستگاه، با افزایش حجم نمونه مورد آزمایش نیز افزایش می‌یابد. در فشار اولیه (P_1) 550mmHg ، با افزایش حجم نمونه اولیه از $10/39\text{cm}^3$ به $31/2\text{cm}^3$ خطای دقت به اندازه $2/22\%$ ، در فشار اولیه (P_1) 650mmHg به اندازه $1/44\%$ و در فشار اولیه (P_1) 700mmHg به اندازه $0/67\%$ کاهش می‌یابد.

۲- تنظیم (*Precision*) یا قابلیت تکرار (*Repeatability*): قابلیت تکرار یک دستگاه اندازه‌گیری عبارت است از نزدیکی ارقام حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف با یکدیگر در یک زمان کوتاه توسط یک شخص و یک دستگاه از همان کمیت مورد اندازه‌گیری. که این ویژگی را تنظیم نیز می‌گویند (مینائی، ۱۳۷۹؛ ملکی و دیبایی نیا، ۱۳۶۹). پس خطا در تنظیم عبارت است از مقدار انحراف از مقدار میانگین ارقام نشان داده توسط دستگاه و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$(8) \quad \text{انحراف ماکزیمم از مقدار میانگین} \\ \text{مقدار واقعی (استاندارد)} = \frac{\text{انحراف ماکزیمم از مقدار میانگین}}{\text{مقدار واقعی (استاندارد)}} = (R\%) \text{ در صد خطای تنظیم}$$

مقدار تنظیم برای دستگاه ساخته شده در جدول (۳) آورده شده است و در زیر آن نمودار مربوطه نیز در شکل (۵) رسم شده است. با توجه به شکل، خطای قابلیت تکرار با افزایش فشار اولیه کاهش می‌یابد. با افزایش فشار اولیه (P_1) از 550mmHg به 700mmHg ، خطای قابلیت تکرار یا تنظیم در نمونه $10/39\text{cm}^3$ به اندازه $0/1\%$ و در نمونه $31/2\text{cm}^3$ به اندازه $0/35\%$ کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۵) با افزایش حجم نمونه‌ها در یک فشار ثابت، قابلیت تکرار دستگاه نیز افزایش می‌یابد. در فشار اولیه (P_1) 550mmHg ، با افزایش حجم نمونه اولیه از $10/39\text{cm}^3$ به $31/2\text{cm}^3$ خطای تنظیم یا قابلیت تکرار دستگاه به اندازه $1/38\%$ ، در فشار اولیه (P_1) 650mmHg به اندازه $1/51\%$ و در فشار اولیه (P_1) 700mmHg به اندازه $2/63\%$ کاهش می‌یابد. با توجه به شکل تأثیر تغییر حجم نمونه مورد آزمایش بر قابلیت تکرار بیشتر از تأثیر افزایش فشار اولیه می‌باشد.

۳- قدرت تشخیص (*Resolution*): قدرت تشخیص یک دستگاه اندازه‌گیری عبارت است از قدرت نشان دادن عکس‌العمل در برابر تغییرات کوچک کمیت مورد اندازه‌گیری می‌باشد (ملکی و دیبایی نیا، ۱۳۶۹؛ مینائی، ۱۳۷۹). فشارسنج مورد استفاده در این دستگاه دارای عدم قطعیت^۱ (در بخش بعد توضیح داده شده است) $\pm 0/1$ میلی‌متر جیوه (mmHg) می‌باشد. خروجی این دستگاه در

نهایت باید حجم باشد نه فشار. بنابراین باید قدرت تشخیص این دستگاه بر حسب فشار را به قدرت تشخیص بر حسب حجم تبدیل کنیم. این کار به این صورت انجام گرفت که: ابتدا برای یک حجم مشخص نمونه و یک فشار اولیه P_1 ، مقدار P_2 را محاسبه می‌کنیم سپس مقدار P_2 را به مقدار $0/1$ افزایش می‌دهیم و مقدار حجم را محاسبه می‌کنیم اختلاف این دو حجم را برابر با مقدار تشخیص دستگاه در این فشار و حجم می‌باشد. پس به عنوان مثال با توجه به رابطه (۶)، برای نمونه‌ای به حجم $V_s = 20 \text{ cm}^3$ و فشار اولیه $P_1 = 700 \text{ mmHg}$ ، مقدار $P_2 = 365/5 \text{ mmHg}$ بدست می‌آید. حال مقدار P_2 را $0/1$ افزایش می‌دهیم عدد بعدی که فشارسنج با افزایش تدریجی حجم نمونه نشان خواهد داد برابر $365/6$ می‌باشد. بنابراین مقدار حجم نمونه برای این فشار P_2 و فشار اولیه قبلی ($P_1 = 700$)، طبق رابطه (۶) برابر $V_s = 20/17$ بدست می‌آید. پس قدرت تشخیص این دستگاه $0/17$ سانتیمتر مکعب در فشار اولیه $P_1 = 700$ و نمونه $V_s = 20$ سانتیمتر مکعب، می‌باشد. برای بیان قدرت تشخیص این دستگاه بر حسب حجم به صورت فرمولی بر حسب فشار، به طریق زیر عمل می‌کنیم:

$$V_{s1} = 634/11 - \frac{320/68P_1}{P_r} \quad (9)$$

$$V_{sr} = 634/11 - \frac{320/68P_1}{P_r^*}$$

مقدار $P_r^* = P_r + \varepsilon$ در نظر می‌گیریم. در این رابطه ε دقت فشارسنج می‌باشد و برای این فشارسنج برابر $0/1$ می‌باشد. قدرت تشخیص این دستگاه برابر است با:

$$\Delta V_s = |V_{s1} - V_{sr}| = 320/68 \times P_1 \left(\frac{1}{P_r} - \frac{1}{P_r + \varepsilon} \right) \quad (10)$$

$$\Rightarrow \Delta V_s = \frac{320/68 P_1}{P_r^* + \varepsilon P_r}$$

پس قدرت تشخیص این دستگاه متغیر و به حجم نمونه و فشار اولیه و به حساسیت فشارسنج بستگی دارد با توجه به این رابطه، برای یک نمونه با حجم ثابت، اگر فشار اولیه افزایش یابد، چون فشار P_2 نیز افزایش می‌یابد و P_2 بصورت توان دو در مخرج قرار دارد، مقدار ΔV_s کاهش می‌یابد و در نتیجه قدرت تشخیص دستگاه افزایش می‌یابد. برای یک فشار اولیه ثابت نیز با افزایش حجم نمونه، فشار P_2 نیز افزایش می‌یابد و بنابراین ΔV_s کاهش و قدرت تشخیص دستگاه زیاد خواهد شد. به عنوان مثال برای نمونه 20 سانتیمتر مکعبی، اگر فشار اولیه از 700 به 900 میلی‌متر مکعب افزایش دهیم، قدرت تشخیص از $0/17$ به $0/13$ خواهد رسید. حال اگر در فشار اولیه 600 mmHg حجم نمونه از 20 به 50 برسد، قدرت تشخیص از $0/196$ به $0/177$ سانتیمتر مکعب خواهد رسید.

۴- حساسیت (*Sensitivity*): حساسیت یک دستگاه عبارت است از تغییرات در خروجی دستگاه به تغییرات در ورودی دستگاه. حساسیت یک دستگاه اندازه‌گیری بر حسب رابطه بین تغییرات در کمیت مورد اندازه‌گیری و تغییرات در رقم اندازه‌گیری شده بصورت زیر بیان می‌شود (مینائی، ۱۳۷۹؛ ملکی و دیبایی نیا، ۱۳۶۹).

$$\text{حساسیت} = \frac{\text{تغییرات در خروجی}}{\text{تغییرات در ورودی}} = \frac{\text{تغییرات در عدد اندازه‌گیری شده}}{\text{تغییرات در کمیت مورد اندازه‌گیری}} \quad (11)$$

تغییرات در حجم نمونه که ورودی ما می‌باشد باعث تغییر فشار P_2 فشارسنج در یک فشار اولیه ثابت P_1 می‌شود. پس با توجه به فرمول فوق خروجی ما فشار P_2 و ورودی ما حجم V_s می‌باشد. لذا داریم:

$$\text{حساسیت} = \frac{\Delta P_2}{\Delta V_s} = \frac{\partial P_2}{\partial V_s}$$

$$V_s = 634/11 - 320/68 \frac{P_1}{P_r}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_s} = \frac{1}{\frac{\partial V_s}{\partial P_2}} = \frac{1}{\frac{\partial (634/11 - 320/68 \frac{P_1}{P_r})}{\partial P_2}} = \frac{1}{\frac{320/68 P_1}{P_r^2}} = \frac{P_r^2}{320/68 P_1}$$

در نتیجه:

$$\text{حساسیت} = \frac{P_r^2}{320/68 P_1} \quad (12)$$

به عنوان مثال، حساسیت دستگاه در فشار اولیه 700 میلی‌متر جیوه و حجم نمونه 20 سانتیمتر مکعب برابر است با:

$$V_s = 634/11 - 320/68 * (P_1/P_2) \Rightarrow 20 = 634/11 - 320/68 * (700/P_2) \Rightarrow P_2 = 365/53$$

$$P_2^* = 365/63 \Rightarrow V_s = 20/17$$

$$\text{حساسیت} = \frac{\partial P_2}{\partial V_s} = \frac{P_2^*}{320/68 P_1} = \frac{365/53^2}{320/68 * 700} = 0.0595 \text{ mmHg/cm}^3$$

با توجه به رابطه (۱۲)، حساسیت دستگاه وابسته به فشار ثانویه و فشار اولیه می‌باشد ولی چون فشار ثانویه وابسته به فشار اولیه و حجم نمونه می‌باشد، پس حساسیت دستگاه وابسته به فشار اولیه و حجم نمونه است. نمودارهای حساسیت دستگاه برای بعضی مقادیر فشار اولیه و حجم نمونه در شکل (۶) و (۷)، آورده شده است. همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود، حساسیت دستگاه در فشار اولیه ثابت (P_1)، با افزایش حجم نمونه افزایش پیدا می‌کند. این نوع عکس‌العامل مخصوص این دستگاه نیست بلکه عمومیت دارد و برای تمام دستگاه‌های که با این سیستم کار می‌کنند صادق است. همانطور که گفته شد با افزایش حجم نمونه در یک فشار اولیه ثابت، حساسیت دستگاه افزایش یافته و این افزایش نمایی می‌باشد. شکل (۷) نمودار حساسیت - فشار در حجم‌های ثابت برای دستگاه رسم شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود با افزایش فشار اولیه حساسیت بیشتر می‌شود. با توجه به شکل در می‌یابیم که بیشترین حساسیت در بیشترین سطح فشار اولیه (675 mmHg) و با حجم نمونه ۲۰۰ سانتیمتر مکعبی می‌باشد.

۵- عدم قطعیت: عدم قطعیت عبارت است از مقدار احتمالی خطا و بسته به شرایط آزمایش ممکن است به مقدار زیادی تغییر کند (مینائی، ۱۳۷۹؛ ملکی و دیبایی نیا، ۱۳۶۹). عدم قطعیت پارامتر مورد اندازه‌گیری که تابعی از متغیرهای مستقل X_1, X_2, \dots, X_n کند (مینائی، ۱۳۷۹؛ ملکی و دیبایی نیا، ۱۳۶۹). عدم قطعیت پارامتر مورد اندازه‌گیری که تابعی از متغیرهای مستقل X_1, X_2, \dots, X_n کند (مینائی، ۱۳۷۹؛ ملکی و دیبایی نیا، ۱۳۶۹).
($R = R(X_1, X_2, \dots, X_n)$) باشد، برابر است با:

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial R_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial R_2} W_2 \right)^2 + \dots \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

که W_R عدم قطعیت پارامتر مورد اندازه‌گیری باشد و W_2, W_1 و ... عدم قطعیت متغیرهای مستقل باشد، آنگاه

$$W_2 = \pm 0.1 \text{ و } W_1 = \pm 0.1 \text{ و } V_s = R = V_s(P_1, P_2) = 634/11 - 320/68 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

$$\frac{\partial V_s}{\partial P_2} = \frac{320/68 P_1}{P_2^2} \text{ و } \frac{\partial V_s}{\partial P_1} = \frac{-320/68}{P_2} \Rightarrow$$

$$W_R = \left[\left(\frac{-320/68}{P_2} \times 0.1 \right)^2 + \left(\frac{320/68 P_1}{P_2^2} \times 0.1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$W_R = \frac{320/68}{P_2^2} (P_1^2 + P_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

برای مثال عدم قطعیت نمونه ۲۰ سانتیمتری با فشار اولیه ۷۰۰ میلیمتر جیوه، برابر با مقدار ± 0.19 می‌باشد، یعنی $V_s = 20 \pm 0.19$ می‌باشد نمودار مربوط به عدم قطعیت بعضی مقادیر حجم نمونه در فشارهای مختلف در شکل (۸) رسم شده است. همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود با افزایش فشار اولیه و همچنین حجم نمونه اولیه عدم قطعیت دستگاه کاهش می‌یابد. مثلاً در فشار 50 mmHg ، با افزایش حجم نمونه از ۲۰ به ۱۰۰، عدم قطعیت از ۱.۱٪ به ۰.۱۹٪ کاهش می‌یابد و همچنین در یک حجم ثابت مثلاً 50 cm^3 ، با افزایش فشار از 550 mmHg به 700 mmHg ، عدم قطعیت دستگاه از ۰.۲۲٪ به ۰.۱۷٪ کاهش می‌یابد. پس با توجه به شکل (۸)، برای نتیجه بهتر در آزمایشات بهتر است که فشار اندازه‌گیری بالا و حجم نمونه نیز تا حد امکان بزرگ باشد.

نتایج و بحث:

برای یک سنسور فشار با قدرت تشخیص مشخص هر چه فشار اولیه دستگاه پیکنومترگازی بیشتر باشد، دقت دستگاه و حساسیت دستگاه افزایش می‌یابد. البته این افزایش فشار محدود به مدت زمان به تعادل رسیدن فشار در زمان باز شدن شیر بین مخازن فشار و نمونه، دمای محیط و نوع گاز می‌باشد. دهانه لوله‌های رابط باید کوچک باشند. اما این کوچکی دهانه لوله‌های رابط محدود به مدت زمان به تعادل رسیدن فشار اولیه به فشار تعادلی در حالت ثانویه می‌باشد. اگر دهانه لوله رابط خیلی کوچک باشد تغییرات دما زیاد، مدت زمان به تعادل رسیدن زیاد و نوسانات فشار زیاد خواهد بود. با توجه به داده‌های موجود در جدول (۲)، مقدار در صد خطای دقت برای حجم نمونه $10/39 \text{ cm}^3$ در هر سه فشار با هم مساوی و برابر ۲.۴۵۳٪ می‌باشد. این مقادیر برای حجم نمونه $32/2 \text{ cm}^3$ در فشارهای ۵۵۰، ۶۵۰ و ۷۰۰ میلیمتر جیوه بترتیب برابر ۰.۱۷، ۰.۱۶ و ۰.۱۵۶٪ بدست آمد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار در صد خطا کم و در نتیجه دقت دستگاه زیاد می‌شود. همچنین برای نمونه‌های بزرگتر دقت زیادت‌تر می‌شود. با توجه به داده‌های موجود در جدول (۲)، مقدار در صد خطا برای تنظیم دستگاه در سه فشار اولیه ۵۵۰، ۶۵۰ و ۷۰۰ میلیمتر جیوه

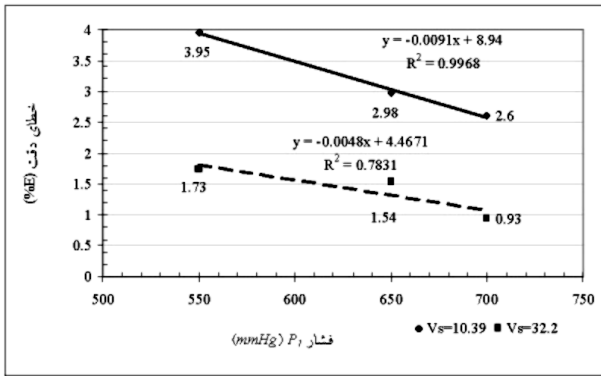
بترتیب برای حجم نمونه cm^3 ۱۰/۳۹ برابر ۲/۲، ۱۴۰/۱۱۶ و ۲/۱۵۴ و برای حجم نمونه cm^3 ۳۲/۲ خیلی کم و برابر ۰/۵۹، ۰/۵۰ و ۰/۵۷ بدست آمد. همانطور که مشاهده می شود تنظیم دستگاه با افزایش حجم نمونه و فشار اولیه افزایش می یابد. قدرت تشخیص این دستگاه متغیر و به حجم نمونه و فشار اولیه بستگی دارد که با افزایش فشار اولیه و حجم نمونه بهتر می شود. برای حجم نمونه cm^3 ۲۰ با افزایش فشار اولیه از $mmHg$ ۷۰۰ به $mmHg$ ۹۰۰ قدرت تشخیص از cm^3 ۰/۱۷ به cm^3 ۰/۱۳ خواهد رسید. همچنین در فشار $mmHg$ ۶۰۰ قدرت تشخیص دستگاه موقعی که حجم نمونه از ۲۰ به ۵۰ سانتیمتر مکعب افزایش پیدا می کند، از cm^3 ۰/۲ به cm^3 ۰/۱۸ کاهش پیدا می کند. عدم قطعیت دستگاه با افزایش فشار و حجم نمونه کاهش پیدا می کند. برای حجم نمونه cm^3 ۵۰ با افزایش فشار اولیه از $mmHg$ ۵۵۰ به $mmHg$ ۷۰۰، عدم قطعیت به اندازه ۰/۱۷٪ کاهش یافت. در فشار ثابت $mmHg$ ۷۰۰ با افزایش حجم نمونه از cm^3 ۲۰ به cm^3 ۱۰۰ عدم قطعیت از ۰/۱۲٪ به ۰/۱۹٪ رسید. همانطور که در شکل (۶) دیده می شود حساسیت دستگاه در یک فشار ثابت با افزایش حجم نمونه افزایش پیدا می کند. این نوع عکس العمل مخصوص این دستگاه نیست بلکه عمومیت دارد. و برای تمام دستگاه های که با این سیستم کار می کنند صادق است. همچنین با توجه به شکل افزایش فشار P_1 مقدار حساسیت افزایش یافته است. با توجه به شکل در می یابیم که بیشترین حساسیت در فشار اولیه ۹۰۰ میلیمتر جیوه و با حجم نمونه ۲۰۰ سانتیمتر مکعبی می باشد. شکل (۷) نمودار حساسیت فشار دستگاه رسم شده است. همانطور که دیده می شود با افزایش فشار اولیه حساسیت بیشتر می شود و با توجه به این شکل و شکل بالا در می یابیم که بهترین حالت موقعی است که فشار اولیه بالا و حجم نمونه نیز بالا باشد. پس برای یک نمونه کوچک بهتر است که از ماکزیمم فشار اولیه استفاده کنیم حساسیت دستگاه بالا رفته تا اندازه گیری دقیق تر باشد.

نتیجه گیری:

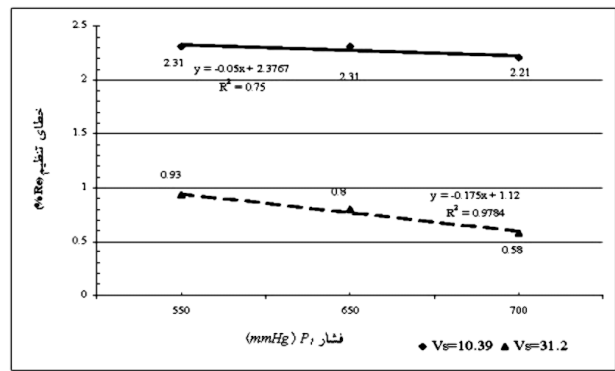
۱- به کمک دستگاه پیکنومتر گازی با دقت بیشتری می توان حجم مواد را اندازه گیری نمود. ۲- بوسیله دستگاه پیکنومتر گازی میتوان حجم مواد را به سرعت اندازه گیری نمود. برای بدست آوردن دقت زیاد می توان نمونه های بزرگتری را برای اندازه گیری انتخاب نمود. ۳- برای بدست آوردن دقت زیاد می توان فشار اولیه سیستم را زیاد گرفت. البته نباید این فشار برای هوا از ۴ مگا پاسکال بیشتر شود. ۴- با افزایش حجم نمونه و فشار اولیه تنظیم دستگاه بهتر می شود. ۵- این دستگاه می تواند حجم محصولات و مواد را با دقت مناسب اندازه گیری نماید.

فهرست منابع و مآخذ:

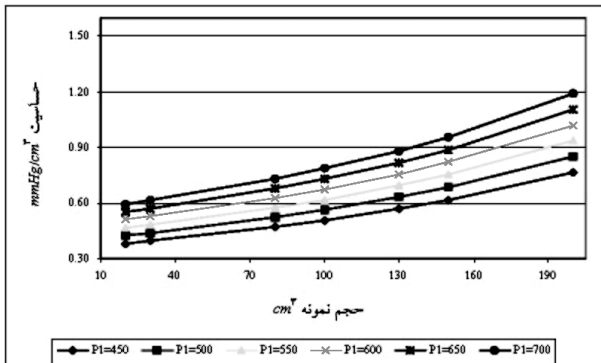
- ملکی، م و دیبایی نیا، ب. (۱۳۶۹). روشهای اندازه گیری در مهندسی. (تألیف هولمن). چاپ اول. انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان.
- مینایی، س. (۱۳۷۹). ابزار و روشهای اندازه گیری. جزوه درسی. دانشگاه تربیت مدرس. دانشکده کشاورزی. گروه مکانیک.
- Batchelor, R. L. and Lynch, T. J. (1978). Pycnometer. United States Patent, No. 4,095,473.
- Cengel, A. Y. and Boles, A. M. (1998). Thermodynamics an Engineering Approach. 3th edn. Tom Casson.
- Chang, C. S. (1988). Measuring density and probity of grain kernels using a gas pycnometer. American Association of Cereal Chemists, 65: 13-15.
- Orr Clyde, D. and Ronnie, W. (1991). Gas comparison pycnometer. United States Patent, No. 5,074,140.
- Sonntag, R. E. (1998). Fundamentals of Thermodynamics. 5th edn. Michigan. Wiley, U. S. A.
- Stroshine, R. (1998). Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products. Department of Agricultural and Biological Engineering Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Turner, P. L. (1978). Method and Apparatus for Determining the Volume of a Condensed Material Sample. United States Patent, No. 4,112,738.



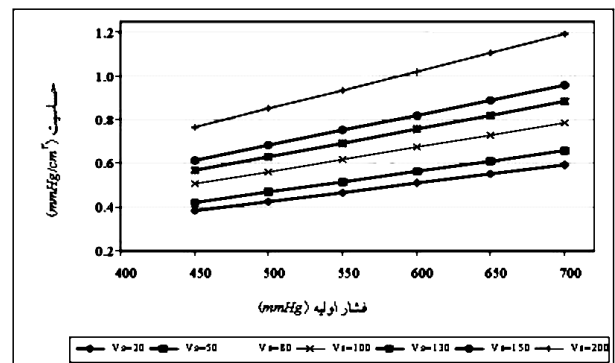
شکل ۴: درصد خطای دقت برای دستگاه ساخته شده.



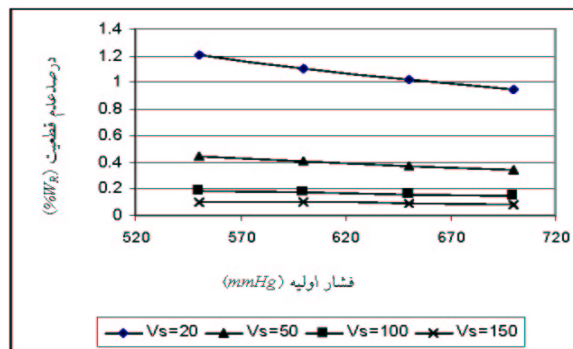
شکل ۵: نمودار درصد خطای مربوط به قابلیت تکرار دستگاه.



شکل ۶: نمودار حساسیت - حجم در فشارهای اولیه (Pi) ثابت



شکل ۷: نمودار حساسیت - فشار در حجمهای ثابت



شکل ۸: نمودار درصد عدم قطعیت - فشار در حجمهای متفاوت

جدول شماره (۱): داده‌های بدست آمده از تعیین حجم دو نمونه در سه فشار مختلف.

V_s (cm^3)	P_i ($mmHg$)	P_f ($mmHg$)	P_i/P_f	V_s محاسبه شده (cm^3)
۱۰/۳۹	۵۵۰	۲۸۲/۹	۱/۹۴۴۲	۱۰/۵۶
۱۰/۳۹	۶۵۰	۳۳۴/۳	۱/۹۴۴۵	۱۰/۴۶
۱۰/۳۹	۷۰۰	۳۶۰/۰	۱/۹۴۴۶	۱۰/۴۳
۳۱/۲	۵۵۰	۲۹۲/۷	۱/۸۷۹۳	۳۱/۴۵
۳۱/۲	۶۵۰	۳۴۵/۹	۱/۸۷۹۴	۳۱/۴۳
۳۱/۲	۷۰۰	۳۷۲/۴	۱/۸۷۹۷	۳۱/۳۱

جدول شماره (۲): مقادیر درصد خطای دقت و تنظیم برای سه فشار ۷۰۰، ۶۵۰، و ۵۵۰ میلی‌متر جیوه.

P_i	V_s (cm^3)	V_{max} (cm^3)	V_{ave} (cm^3)	خطای دقت	خطای تنظیم
۵۵۰	۱۰/۳۹	۱۰/۸	۱۰/۵۶	۳/۹۵	۲/۳۱
	۳۱/۲	۳۱/۷۴	۳۱/۴۵	۱/۷۳	۰/۹۳
۶۵۰	۱۰/۳۹	۱۰/۷	۱۰/۴۶	۲/۹۸	۲/۳۱
	۳۱/۲	۳۱/۶۸	۳۱/۴۳	۱/۵۴	۰/۸
۷۰۰	۱۰/۳۹	۱۰/۶۶	۱۰/۴۳	۲/۶	۲/۲۱
	۳۱/۲	۳۱/۴۹	۳۱/۳۱	۰/۹۳	۰/۵۸