طراحی و ساخت دستگاه ویسکومتر

فاطمه سلکی چشمه سلطانی[۱]، علی جعفری[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران (کرج)؛ solki.fatemeh.che@ut.ac.ir
۲- استاد مکانیک بیوسیستم ، دانشگاه تهران؛ jafarya@ut.ac.ir

چکیده

گرانروی یک ویژگی مکانیکی سیال می‌باشد که رفتار سیلان سیال را مشخص می‌کند. این خاصیت بر اساس نیروی مقاومت درونی یک سیال در برابر جاری شدن تعریف می‌گردد. گرانروی سیالات در صنعت با دو نوع دینامیکی و سینماتیکی شناخته می شود. گرانروی دینامیکی تابعی از تنش برشی و گرادیان سرعت می‌باشد و گرانروی سینماتیکی تابعی از گرانروی دینامیکی و چگالی سیال می‌باشد. خاصیت مکانیکی مذکور اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف، از جمله صنایع غذایی و فرآوری محصولات کشاورزی، آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و همچنین صنایع مرتبط با محصولات پتروشیمی و نفت و ... دارد که اندازه‌گیری این کمیت سیال را از با اهمیت می‌سازد. برای اندازه‌گیری این خاصیت از وسیله‌ای به نام گرانروی‌سنج استفاده می‌شود. در حال حاضر ویسکومترهای مورد استفاده در صنایع متعلق به شرکت‌های خارجی هستند. به منظور بومی‌سازی ساخت ویسکومتر در کشور؛ در تحقیق حاضر تلاش شده تا یک ویسکومتر استوانه چرخان طراحی و ساخته شود. مبنای محاسبه گرانروی در این ویسکومتر، گشتاور ناشی از دوران استوانه چرخان در درون سیال می‌باشد. مقدار دور شفت دوار موتور از ۰ تا ۳۰۰ دور در دقیقه قابل کنترل است. مقدار ولتاژ و آمپر به ترتیب با دقت ۰/۰۱ ولت و ۰/۰۱ میلی‌آمپر قابل اندازه‌گیری است. دستگاه ساخته شده نتایج نسبتا قابل قبولی در اندازه‌گیری ویسکوزیته سیالات را نشان می‌دهد. با استفاده از دستگاه ساخته شده آزمایشاتی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته عسل طبیعی در دما ۳۰ درجه صورت پذیرفت که نتایج قابل قبولی بدست آمد. استفاده از دستگاه ساخته شده برای آزمایشگاه‌های کنترل کیفی واحدهای تولیدی و همچنین مراکز تحقیقاتی قابل استفاده است.

کلمات کلیدی: گرانروی، گرانروی‌سنج، گشتاور، ولتاژ و آمپر

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

[۱] مسئول مکاتبات: فاطمه سلکی چشمه سلطانی، کرج پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران گروه مهندسی ماشین های کشاورزی. تلفن : ۰۲۶۳۲۸۰۱۰۱۱ نمابر:۰۲۶۳۲۸۰۸۱۳۸

Design and manufacture a viscometer device

Fatemeh Solki Cheshmeh Soltani[1], Ali Jafary[2]
1. Undergraduate Student in Mechanic Of Biosystems Engineering, University of Tehran (Karaj),
solki.fatemeh.che@ut.ac.ir
2. Professor in Mechanic of Biosystems Engineering, University of Tehran,
jafarya@ut.ac.ir

Abstract

Viscosity is a mechanical fluid characteristics that identifies the behavior of the fluids. This property is defined by the internal resistance of fluid to flow. The viscosity of fluids in industry is characterized by two types of dynamic and kinematic viscosity. Dynamic viscosity is a function of shear stress and gradient of velocity and kinematic viscosity is a function of dynamic viscosity and fluid density. That mechanical property has special importance in different industry such as food industry, processing of agricultural products, research lab, petrochemical industries,… .Use viscometer for determine this property. Nowadays the viscometer that we use in our country (Iran) are made by foreign countries. For localization the produce of viscometer in our country, in this research design and produce a rotational viscometer. The base of calculate the viscosity by this viscometer is the toque of spindle rotation in fluid. The speed range of motor shaft is 0-300 rpm. Voltage and electricity flow measured with 0.01 V and 0.01 mA accuracy. Present viscometer have been used for calculating the viscosity of honey at 30˚ C temperature and its results was almost good.. This viscometer can be used in qualitative control laboratory equipment, production units and research centers.

Keywords: viscosity, viscometer, torque, voltage and ampere

مقدمه

ویژگی‌های چگالی و وزن مخصوص ظاهری معیاری برای بیان سنگینی سیال هستند اما این دو ویژگی به تنهایی رفتار سیلان سیال را مشخص نمی‌کند. به طور مثال آب و روغن چگالی و وزن مخصوص مشابهی دارند ولی رفتار آن‌ها در سیلان کاملا متفاوت است. برای بیان رفتار سیلان سیال از ویژگی‌ای به نام لزجت، گرانروی یا ویسکوزیته استفاده می‌شود (Munson et al.).

مقاومت یک سیال در برابر جاری شدن را ویسکوزیته می‌نامند. ویسکوزیته یک ویژگی مکانیکی مهم در هر سیال می‌باشد و بر اساس نیروی اصطکاک درونی سیال تعریف می‌شود (Leblanc et al., 1999). ویسکوزیته به دو نوع دینامیکی (مطلق) و سینماتیکی تقسیم می‌گردد. ویسکوزیته دینامیکی خاصیتی از سیال می‌باشد که تنش برشی و حرکت سیال را به یکدیگر مرتبط می‌سازد. ویسکوزیته سینماتیکی به صورت نسبت ویسکوزیته دینامیکی به چگالی سیال تعریف می‌گردد (Munson et al.).

سیالاتی که تنش برشی آن‌ها با آهنگ کرنش برشی (گرادیان سرعت) با تغییر شکل زاویه‌ای رابطه خطی دارند را سیال نیوتنی و سیالاتی که رابطه خطی ندارند را سیال غیرنیوتنی می‌نامند. روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته وجود دارد.

اندازه‌گیری درست و دقیق ویسکوزیته در بسیاری از کاربردهای صنعتی اساسی می‌باشد زیرا مقدار ویسکوزیته اندازه‌گیری شده قابلیت کنترل ماهیت جریان را دارد (Courbin et al., 2005). اندازه‌گیری ویسکوزیته سیالات در صنایع متفاوت از جمله صنایع غذایی، کشاورزی، خودروسازی، دارویی و پزشکی حائز اهمیت می‌باشد.

ویسکوزیته، مهم‌ترین عامل در ارزیابی کیفیت مواد خوراکی می‌باشد. سیالات در طی مراحل فرآوری از جمله حرارت دادن، مخلوط کردن، سرد کردن و مراحلی از این قبیل در صنایع غذایی، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند (Jafary and Tatar, 2018). دانستن مقدار ویسکوزیته و تغییرات آن برای سیال فرآوری شده در صنایع غذایی سبب انتخاب تجهیزات مناسب جهت انجام فرآیندهای مختلف مانند پمپ کردن، هم‌زدن، انتقال درون لوله‌ها و فرآیندهایی نظیر موارد ذکر شده و کنترل کیفیت محصول تولید شده می‌گردد (Ramzi et al., 2014). یکی کاربردهای اندازه‌گیری ویسکوزیته در صنایع غذایی، در کارخانه‌های فرآوری عسل می‌باشد. عسل در دماهای متفاوت دارای ویسکوزیته‌های مختلفی می‌باشد که این عامل در مراحل فرآوری و بسته‌بندی آن موثر می‌باشد.

یک عامل مهم در اندازه‌گیری ویسکوزیته عسل، اندازه‌گیری دما آن می‌باشد. زیرا با افزایش دما، ویسکوزیته عسل کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش ویسکوزیته، نیروی اصطکاک بین مولکول‌ها نیز کاهش می‌یابد (Gómez-DÍaz et al., 2009).

یکی دیگر از کاربردهای اندازه‌گیری ویسکوزیته در صنایع غذایی، در تولید لبنیات می‌باشد. اندازه‌گیری ویسکوزیته در کارخانه تولید لبنیات از

جمله ماست کیفیت آن را مشخص می‌کند. ویسکوزیته مطلوب در این محصول سبب کاهش آب اندازی و جدا شدن سرم می‌گردد. اندازه‌گیری ویسکوزیته و رسیدن به ویسکوزیته مطلوب در تولید انواع ماست‌ها از جمله ماست‌های کم‌چرب و ترکیبی، افزایش کیفیت محصول را به دنبال دارد (Amiri Aghdaei et al., 2010).

به منظور کاهش هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری ماشین‌های کشاورزی و راهسازی و بهره‌وری از این ماشین‌ها در زمان مشخص، نیاز به برنامه ریزی دقیق و منظم جهت تعمیر و نگهداری می‌باشد. اعمال یک برنامه پایش وضعیت امکان پیش‌بینی زمان وقوع خرابی، کاهش وقفه‌های زمانی در بهره برداری از ماشین‌ها، صرفه‌جویی‌های مالی و افزایش راندمان را می‌دهد. یکی از ابزارهای پایش وضعیت، پایش وضعیت روغن موتور این ماشین‌ها می‌باشند. آزمایش گرانروی مهم‌ترین روش و ابزار پایش و آنالیز وضعیت روغن می‌باشد (Poolad, 2013).

از جمله کاربردهای اندازه‌گیری ویسکوزیته در زمینه کشاورزی و دامپروری، تعیین ویسکوزیته مواد غذایی مورد استفاده طیور می‌باشد. با اندازه‌گیری و تعیین ویسکوزیته مواد خوراکی مورد استفاده طیور می‌توان مقدار آب مصرفی و فضولات دفعی را اندازه‌گیری کرد. این دو عامل از موارد تاثیرگذار در پرورش طیور در مرغداری‌ها می‌باشد (yaghobfar, 2005).

جهت اندازه‌گیری ویسکوزیته از وسیله‌ای به نام ویسکومتر استفاده می‌شود. برخی از انواع ویسکومترها به همراه کاربرد آن‌ها در جدول۱ ارائه شده است (Leblanc et al., 1999).

جدول ۱- نام برخی از ویسکومترها به همراه کاربرد و ویژگی‌های آن‌ها

Table 1. The name of some viscometers with their application and features

نام ویسکومتر	کاربرد و ویژگی‌ها
دوران دو استوانه (سیلندر) هم‌مرکز	مناسب جهت ویسکوزیته‌های پایین، سرعت برشی بالا، شعاع دو سیلندر نزدیک به هم می‌باشد به گونه‌ای که نسبت آن‌ها در حدود ۱ باشد.
دوران یک مخروط و بشقاب (صفحه)	تنش برشی همگن، مناسب جهت سیالات غیرنیوتنی و تنش‌های معمولی، نیاز به هماهنگی خوب، دارای مشکل در بارگذاری و بخار شدن گاز.
دوران دیسک‌های موازی	مانند دوران مخروط و بشقاب با این تفاوت که تنش برشی آن همگن نمی‌باشد، سرعت‌های مختلف با اختلاف ارتفاع، بارگذاری ساده
صفحات کشویی موازی	تنش برشی همگن، طراحی ساده، مناسب برای ویسکوزیته‌های بالا، بارگذاری دشوار.
سقوط جسم (توپ یا استوانه)	بسیار ساده، مناسب برای دما و فشار بالا، نیازمند سنسورهای مناسب برای سیالات کدر و مات، برای سیالات غلیظ مناسب نمی‌باشد.
جسم در حال نوسان در سیال	نیاز به وسایل ثابتی دارد، مناسب برای فلزات مایع با ویسکوزیته پایین.

مطالعات متفاوتی بر روی انواع ویسکومتر و نحوه محاسبه ویسکوزیته صورت گرفته است. برخی از آن‌ها عباتند از: در تحقیقی یک ویسکومتر سقوط توپ به منظور افزایش دقت و تعیین دامنه وسیعی از ویسکوزیته‌های سیالات نیوتنی مورد مطالعه قرار گرفت. این ویسکومتر به دوربین‌های خطی جهت جمع آوری داده مجهز گردید. در این روش یک توپ صلب با قطر و چگالی مشخص درون یک سیال نیوتنی، تحت تاثیر نیروی وزن رها شد و چگالی و ویسکوزیته سیال مورد بررسی قرار گرفت همچنین یک خط مسیر برای عبور توپ در نظر گرفته شد تا سرعت دوران در اثر سقوط قابل مشاهده باشد (Brizard et al., 2005).

در مطالعه‌ای دیگر از یک سنسور میکروآکوستیک جهت تعیین ویسکوزیته روغن موتور به صورت لحظه‌ای و نمایش آن استفاده گردید. این سنسورها در تماس کامل با روغن موتورهای مورد آزمایش بودند. این سنسورها به طور معمول دارای صفحات باریک پیزوالکتریک می‌باشند که الکترود را به دو سر آن هدایت می‌کند و باعث تشدید در قطعات می‌گردد. این پدیده باعث می‌شود یک فیلم نازک از روغن بر روی صفحات قرار بگیرد و با تغییرات الکتریکی ایجاد شده در اثر بارگذاری مقدار ویسکوزیته محاسبه می‌گردد (Agoston et al., 2005).

در مطالعه‌ای انجام شده در سال ۱۳۸۷، دانشکده مکانیک دانشگاه تهران در قالب طرح "تدوین دانش فنی طراحی و ساخت گرانروی‌سنج‌های استوانه‌ای" به دانش فنی نوع خاصی از گرانروی‌سنج‌های دورانی دست یافتند و نمونه‌ای از آن را ساختند.

در مطالعه انجام شده در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، یک ویسکومتر خودکار لوله موئین طراحی و ساخته شد. در این ویسکومتر، مشخصات روغن موتور مورد آزمایش پس از رسیدن به یک دما ثابت در حمام روغن، ثبت می‌گردد و زمان عبور روغن از بین دو شاخص از پیش تعیین شده اندازه‌گیری می‌گردد. سپس مقدار ویسکوزیته سینماتیکی محاسبه می‌گردد (Poolad, 2013).

در مطالعه‌ای دیگر مقدار ویسکوزیته شیره خرما با استفاده از تکنیک پردازش تصویر محاسبه شد. در این روش از شکل ریزش شیره خرما در دما و غلظت‌های مشخص تصویربرداری شد و با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر و بکارگیری شبکه‌های عصبی، ویسکوزیته شیره خرما محاسبه گردید (Jafary and Tatar, 2018).

در کشور ما ویسکومترهای مورد استفاده، ساخت کشورهای خارجی می‌باشند. بدین سبب جهت خودکفایی داخلی و تامین نیازهای پژوهشی یک ویسکومتر بومی و داخلی بر مبنای استوانه چرخان، طراحی و ساخته شده است که در ادامه جزئیات روش طراحی و ساخت آن آمده است.

مواد و روش

همانطوریکه می دانیم ویسکوزیته دینامیکی رابطه بین تنش برشی و آهنگ کرنش برشی (گرادیان سرعت) می‌باشد که از (۱)، محاسبه می‌گردد. ویسکوزیته سینماتیکی نیز از (۲)، محاسبه می‌شود. (Munson et al.).

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (۱)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (۲)$$

در (۱)، τ تنش برشی، μ ویسکوزیته دینامیکی برحسب $\frac{N.s}{m^2}$ و $\frac{du}{dy}$ آهنگ کرنش برشی (گرادیان سرعت) می‌باشد. در (۲)، ν ویسکوزیته سینماتیکی ($\frac{m^2}{s}$)، μ ویسکوزیته دینامیکی و ρ چگالی سیال می‌باشد.

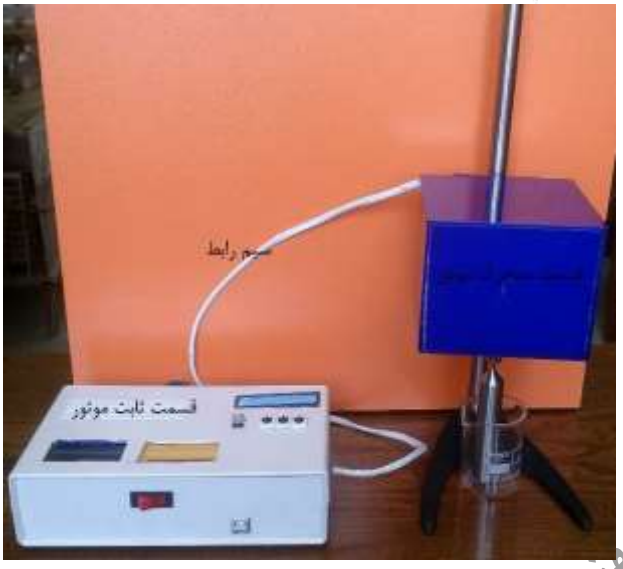
ویسکومتر طراحی و ساخته شده در این پژوهش از یک ویسکومتر خارجی با نام بروکفیلد و مدل DV-II+ الگو گرفته شده است. این ویسکومتر (ویسکومتر بروکفیلد)، یک ویسکومتر چرخشی می‌باشد که بر مبنای گشتاوری که در هنگام گردش در درون یک سیال ایجاد می‌کند، مقدار ویسکوزیته را به نمایش در می‌آورد. مقدار ویسکوزیته در ویسکومتر ساخته شده، نیز بر همین مبنا قابل محاسبه می‌باشد.

ویسکومتر ساخته شده در این پژوهش از چهار بخش اصلی، موتور، پایه، اسپیندل (استوانه‌ای که درون سیال دوران می‌کند) و رابط اتصال شفت موتور به محور اسپیندل تشکیل شده است. هر یک از ین بخش‌ها شامل قسمت‌های مختلفی می‌باشند.

موتور

در این ویسکومتر، موتور از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول (قسمت متحرک)، قسمتی می‌باشد که بر روی پایه قرار گرفته و قابلیت جابه‌جایی (بالا و پایین) بر روی آن را دارد و اسپیندل به آن متصل می‌گردد. قسمت دوم (قسمت ثابت)، قسمتی می‌باشد که در آن بخش‌های کنترل دور، ولتاژ و جریان در آن قرار گرفته است. بخش اول یا همان قسمت ثابت موتور، شامل یک موتور DC و اینکودر می‌باشد. موتور به همراه اینکودر درون یک قاب با قابلیت جابه‌جا شدن بر روی پایه قرار گرفته است. این قسمت از موتور توسط یک سیم رابط به قسمت ثابت موتور که بخش کنترل آن می‌باشد، متصل می‌گردد (شکل۱). قسمت ثابت موتور شامل برد آردوینو، ماژول درایور، پاورسوئیچینگ، ولت‌متر، آمپرمتر و LCD می‌باشد که تمام این قطعات به همراه دیگر قطعات الکترونیکی درون یک قاب قرار گرفته شده است (شکل۲).

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران



شکل ۱- قسمت‌های اصلی موتور

Figure 1. Main part of the motor

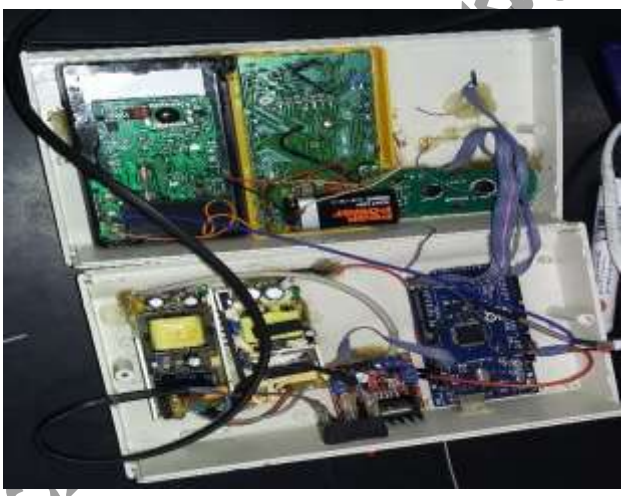


Figure 2. The interior part of fixed fart of motor

شکل ۲- بخش داخلی قسمت ثابت موتور

تعداد دوران شفت موتور (دور موتور) توسط برنامه نوشته شده در نرم‌افزار آردوینو کنترل می‌گردد. نحوه به دست آوردن دور موتور بدین صورت می‌باشد که اینکودر تعداد دوران شفت موتورDC را در هر دقیقه شمارش می‌کند و پس از تحلیل داده‌های جمع آوری شده توسط اینکودر در برد آردوینو که شامل برنامه‌های نوشته شده برای کنترل دور می‌باشد، دور موتور را محاسبه کرده و در نهایت بر روی صفحه LCD نمایش می‌دهد. دور موتور به صورت مکانیکی توسط دو کلید فشاری موجود بر روی قاب، قابل تنظیم می‌باشد.

مشخصات فنی موتور مورد استفاده در این ویسکومتر، در جدول ۲ بیان شده است.

جدول۲. مشخصات فنی موتور

Table 2. Technical specifications of the motor

The name of parts	Value (unit)
Input voltage of the device	220 (V)
Voltmeter accuracy	0.01 (V)
Ampere meter accuracy	0.01 (mA)
Motor shaft range	0-300 (rpm)
Motor shaft diameter	4 (mm)

توان لازم برای به حرکت درآوردن شفت دوار موتور با استفاده از گشتاور و سرعت زاویه‌ای شفت دوار، از (۳) محاسبه می‌گردد. همچنین مقدار توان مصرفی با استفاده از مقدار ولتاژ و جریان عبوری از (۴) قابل محاسبه می‌باشد (B.L. & A.K. Theraja).

$$P = T\omega \quad (۳)$$

$$P = VI \quad (۴)$$

با استفاده از (۳) و (۴)، مقدار گشتاور تولید شده شفت دوار طبق (۵) قابل محاسبه می‌باشد.

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{VI}{2\pi n} \quad (۵)$$

پایه

یکی از بخش‌های مهم ویسکومتر ساخته شده، پایه آن می‌باشد که خود از دو قسمت مجزا تشکیل شده است. یک قسمت پایه برای قرارگیری بر روی سطح مورد نظر (شکل ۳، الف) و قسمت دیگر یک میلگرد استیل۳۰۴، با ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و قطر ۱۶ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۳، ب). موتور و اسپیندل بر روی این میله قرار می‌گیرند.

(الف) (a)

(ب) (b)

Figure 3. The base part of viscometer

شکل ۳- قسمت پایه ویسکومتر

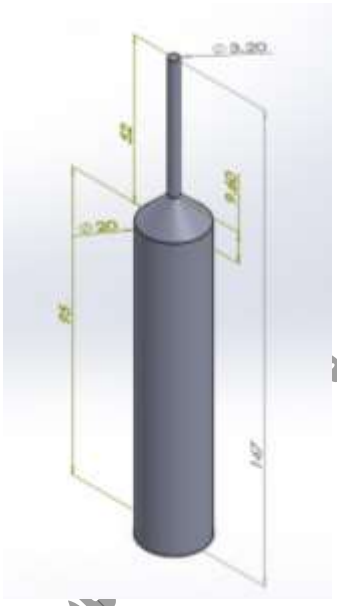
اسپیندل

بر طبق کاتالوگ دستگاه ویسکومتر اصلی (بروکفیلد)، اسپیندل‌ها به دسته دیسکی و سیلندری تقسیم می‌گردند که هر یک از این اسپیندل‌ها دارای انواع متفاوتی می‌باشند که هریک جهت اندازه‌گیری دامنه خاصی از ویسکوزیته مناسب هستند. در ساخت ویسکومتر حاضر، اسپیندل نوع سیلندری با شماره LV #1 مد نظر قرار داده شد و به دلیل محدودیت در ساخت مشابه قطعه، تغییرات در طرح آن اعمال گردید.

اسپیندل ویسکومتر ساخته شده، از یک قطعه میلگرد استیل ۳۰۴ با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری و قطر ۲۰ میلی‌متری ساخته شده است. طرح این اسپیندل ابتدا در نرم‌افزار solid works 2014 طراحی شد (شکل ۴، الف). سپس قطعه مطابق با طرح رسم شده آن در برنامه، تراشکاری شد (شکل ۴، ب).

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

(ب) (**b**)



(الف) (**a**)

Figure 4. spindle

شکل ۴- اسپیندل

رابط اتصال شفت موتور به محور اسپیندل

برای دوران اسپیندل توسط شفت موتور، باید این دو قطعه به یکدیگر متصل شوند. جهت اتصال اسپیندل به شفت موتور از یک قطعه رابط استفاده می‌گردد. این قطعه از پنج قسمت تشکیل شده است و جنس آن از آلیاژ برنج می‌باشد. این قسمت‌ها عبارتند از: یک مغزی که دو سر آن رزوه شده، دو عدد سه نظام یکی با قطر ۳/۲ میلی‌متر برای اتصال به محور اسپیندل و یکی با قطر ۴ میلی‌متر برای اتصال به سر شفت موتور و دو مهره برای نگه‌داری سه نظام‌ها بر روی مغزی (شکل ۵).

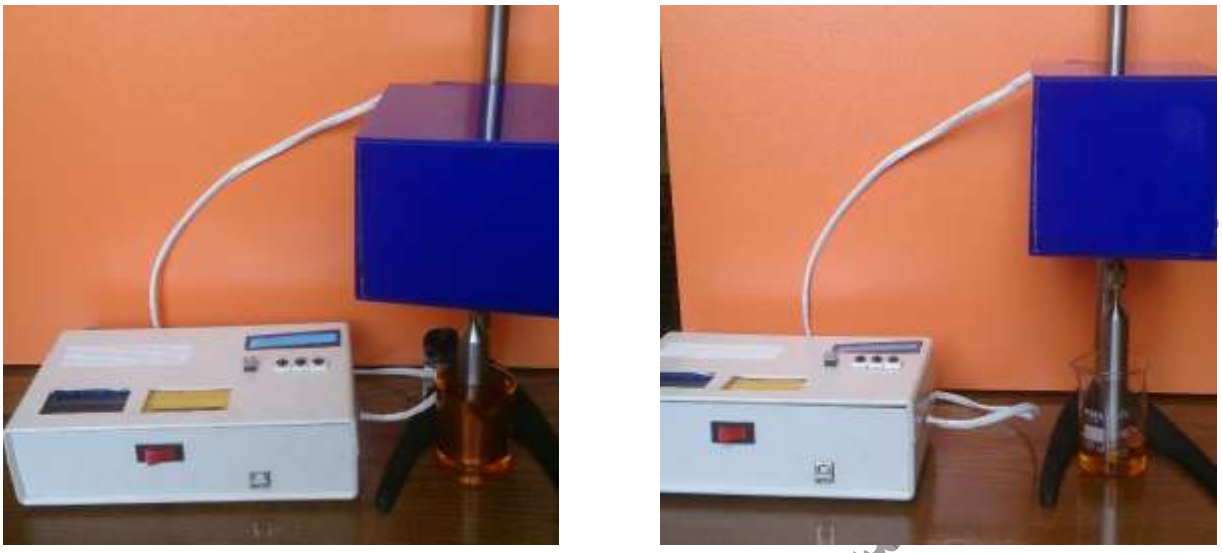
Figure 5. Interface piece

شکل ۵- قطعه رابط

محاسبه ویسکوزیته

قسمت متحرک موتور، بر روی پایه قرار داده شد. اسپیندل توسط قطعه رابط به قسمت متحرک موتور متصل گردید. بشر به صورت هم مرکز با اسپیندل قرار گرفت. دور موتور بر روی یک دور ثابت، تنظیم شد. آزمایش در سه نوبت انجام گرفت و در هر مرحله مقدار دور، ولتاژ و جریان به مدت ۱۰ ثانیه ثبت گردید. سپس داده‌های جمع‌آوری شده در نرم‌افزار excel وارد شد و میانگین آن‌ها محاسبه گردید. سیال مورد استفاده در این پژوهش که برای واسنجی دستگاه ویسکومتر ساخته شده استفاده گردید، عسل بسته‌بندی شرکت سانتین می‌باشد. نوبت اول آزمایش در هنگام دوران اسپیندل در هوا و نوبت دوم و سوم در هنگام دوران اسپیندل در درون عسل انجام شد. حجم بشر استفاده شده برابر با ۱۰۰ میلی‌لیتر و قطر آن ۵ سانتی‌متر می‌باشد.

آزمایش انجام شده در نوبت دوم و سوم با دو مقدار متفاوت عسل در دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در نوبت دوم سطح تماس اسپیندل با عسل (ارتفاع موثر) ۱ سانتی‌متر (شکل ۶، الف) و در نوبت سوم سطح تماس عسل با اسپیندل ۵/۵ سانتی‌متر (شکل ۶، ب) در نظر گرفته شد.



(ب) (b) (الف) (a)

Figure 6. Two different part of the experiment

شکل ۶- دو بخش متفاوت آزمایش

جدول ۳- میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده

Table 3. The average of measured values

Level of experiment	Voltage (V)	Electricity flow (mA)	Rotational speed (rpm)
First	1.716	29.404	29.04
Second	1.708889	29.56667	25.48148
Third	1.654483	33.45862	24.58621

با استفاده از اختلاف جریان و ولتاژ، گشتاور لازم جهت دوران در درون سیال را محاسبه می‌نماییم. مقدار گشتاور را با مقدار تنش برشی ناشی از دوران اسپیندل در درون سیال را برابر در نظر می‌گیریم. با استفاده از روابط ذکر شده، مقدار ویسکوزیته را محاسبه می‌گردد.

نتایج و بحث

در پژوهش انجام شده یک ویسکومتر استوانه چرخان طراحی و ساخته شده است. در این ویسکومتر با اندازه‌گیری مقدار ولتاژ و جریان عبوری، مقدار گشتاور قابل محاسبه می‌باشد. به علت اندازه‌گیری الکتریکی ولتاژ و جریان، ویسکومتر ساخته شده امکان اندازه‌گیری دقیق ویسکوزیته را فراهم می‌کند. با استفاده از گشتاور محاسبه شده و روابط ذکر شده، مقدار ویسکوزیته دینامیکی قابل محاسبه می‌باشد. همچنین با دانستن چگالی سیال مورد نظر، ویسکوزیته سینماتیکی قابل محاسبه می‌باشد.

مطابق با کاتالوگ ویسکومتر بروکفیلد، برای اندازه‌گیری ویسکوزیته در دامنه‌های متفاوت، نیاز به استفاده از اسپیندل‌های مختلف می‌باشد. در این پژوهش از یک مدل اسپیندل الگو برداری شده و یک نمونه اسپیندل ساخته شده است.

ویسکوزیته به مواردی از جمله دما و فشار بستگی دارد. در سیالات مایع با افزایش دما، مقدار ویسکوزیته کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری ویسکوزیته در صنایع مختلفی از جمله صنایع غذایی، کشاورزی، آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و همچنین در صنایع مرتبط با نفت و پتروشیمی کاربرد دارد.

در پژوهش حاضر ویسکوزیته عسل در دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید. مقدار ویسکوزیته در نوبت دوم یعنی هنگامی که اسپیندل با ۱ سانتی‌متر از عسل در تماس بود برابر با ۰/۰۹۲ Pa.S و در نوبت سوم یعنی هنگامی که اسپیندل با ۵/۵ سانتی‌متر از عسل در تماس بود برابر با Pa.S ۶/۹۷ محاسبه شد. در مطالعه‌ای انجام شده توسط سایر پژوهشگران مقدار ویسکوزیته عسل در دماهای مختلف ۲۵ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد مقدار ویسکوزیته عسل بین ۰/۴۲۱ Pa.S تا ۲۳/۴۰۵ Pa.S محاسبه گردید (Yanniotis et al., 2006).

از آزمایش انجام شده می‌توان به این نتیجه رسید که هر چه ارتفاع سطح درگیر اسپیندل با عسل بیشتر باشد، سرعت دورانی اسپیندل کاهش

می‌یابد و این کاهش سرعت دورانی باعث افزایش مقدار اختلاف ولتاژ و جریان می‌گردد و امکان محاسبه دقیق‌تر ویسکوزیته را فراهم می‌کند. علت تفاوت در اندازه‌گیری ویسکوزیته، نوع عسل مورد مطالعه، شرایط انجام آزمایش و مقدار رطوبت موجود در عسل می‌باشد.

کیفیت و سلامت محصولات غذایی تولید شده در کارخانه‌های صنایع غذایی به ویسکوزیته مواد فرآوری شده بستگی دارد از این رو استفاده از یک ویسکومتر با دقت مطلوب در کارخانه‌های صنایع غذایی ضروری می‌باشد. همچنین کنترل ویسکوزیته روغن موتور ماشین‌های کشاورزی و سنگین به صورت دوره‌ای باعث عمر مفید ماشین‌های مورد استفاده در کشاورزی و افزایش راندمان آن‌ها می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه انجام شده به منظور بومی سازی ساخت ویسکومتر در داخل کشور، یک ویسکومتر استوانه چرخان طراحی و ساخته شده است. مبنای محاسبه ویسکوزیته در این ویسکومتر، گشتاور حاصل از دوران اسپیندل در درون سیال می‌باشد. برای محاسبه ویسکوزیته، مقادیر ولتاژ، جریان و سرعت دورانی موتور به مدت ۱۰ ثانیه ثبت گردید. سپس میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، محاسبه گردید و با روابط ذکر شده مقدار ویسکوزیته محاسبه گردید. برای بررسی دقت دستگاه مقدار ویسکوزیته عسل در دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. مقادیر ویسکوزیته عسل ۶/۹۷ Pa.S محاسبه گردید. سطح تماس اسپیندل با عسل ۵/۵ سانتی‌متر اندازه گیری شد. در منابع موجود مقدار ویسکوزیته عسل در دمای ۳۰ درجه در حدود 7Pa.S ارائه شده که با نتایج حاصل از اندازه گیری دستگاه ساخته شده انطباق بسیار بالایی دارد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از آزمایشگاه های برق و الکترونیک و آزمایشگاه فیزیک گروه مهندسی ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران که در انجام این تحقیق همکاری و مساعدت لازم را داشته اند؛ کمال تشکر و سپاسگزاری ابراز می گردد.

منابع

Agoston A., Ötsch C. and Jakoby B. (2005). Viscosity sensors for engine oil condition monitoring- Application and interpretation of results. *Sensors and Actuators*. 327-332.

Amiri Aghdaei S.S., Aalami M., Khomeiri M. and Rezaei R. (2010). Effect of Basil seed mucilage (*Ocimum basilicum* L.) on the physicochemical and sensory characteristics of low fat yogurt. *Food scientists and technologists*. 2(4). (Persian)

Brizard M., Megharfi M., Verdier C. and Mahe E. (2005). Design of a high precision falling ball viscometer. *Review of Scientific Instrument, American Institute of Physics*. 76(2), pp. 025109.

Courbin L., Cristobal G., Winckert M. and Panizzia P. (2005). Design of a low cost Zimm-Crothers viscometer: From theory to experiment. *American Association of Physics Teachers*. 73(9).

Gómez-DÍaz D., Navaza J.M. and Quintăns-Riverio L.C. (2009). Effect of temperature on the viscosity of honey. *International of food properties. 12*, 396-404.

Jafary A., Tatar A. (2018). Use the image processing technique in the estimation of fluid viscosity. (Case study: Date nectar). *Agricultural machinery*. 8(2). (Persian)

Leblanc G.E., Secco R.A. and Kostic M. (1999). Viscosity measurement.

Munson B.R., Young D.F., Okiishi T.D. and Huebsch W.W. (2002). Fundamentals of Fluid Mechanics, (Six edition), John Wiley & Sons Inc.

Poolad P. (2013). Design and fabrication of an automatic engine oil viscometer. MSc. University of Tehran. (Persian)

Ramzi R., Kashani-Nejad M., Sadeghi Mahonak A. and Razavi M.A. (2014). Effect of temperature on honey viscosity. *21st national congress of food science and technology.* (Persian)

Theraja B.L. and Theraja A.K. (2004). A text book of electrical technology. Choghazardi M., Sharab. (Persian)

Yaghobfar A. (2005). Determine of feedstuffs viscosity in Poultry diet. *Agriculture research.* 4(1). (Persian)

Yanniotios S., Skaltsi S. and Karaburnioti S. (2006). Effect of moisture content on the viscosity of honey at different temperature. *Journal of food engineering. 72(4),* 372-377.