نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

J. Energy Conversion
Volume: 12, Issue:3, 2025: 19-26

دوره ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، ص: ۲۶-۱۹

شبیه‌سازی و بررسی عوامل مؤثر برنیروی اصطکاک داخلی سیلندرهای پنوماتیک

عباس تقی‌پور[او*]

۱ *- دانشکده مهندسی ساخت و فناوری‌های صنعتی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران ، ab.taghipoor@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۵/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۱۲

چکیده

سیستم‌های پنوماتیکی نقش بسیار مهمی در بخش‌های مختلف صنعت وکشاورزی ازجمله سیستم‌های اتوماسیون صنعتی دارد. با سیرتکامل تدریجی سیستم‌های اتوماسیون، سرعت و دقت، قابلیت اطمینان، اصطکاک کم و عمرکاری طولانی برای عملگرهای پنوماتیکی ضروری می‌باشد. داشتن اطلاعات دقیق از ویژگی‌های اصطکاکی آب‌بندهای به‌کاررفته در عملگرهای پنوماتیکی سبب بهبود حرکت سیلندر، بهینه کردن نیروی مؤثر جک و جلوگیری از لغزش سیلندر می‌شود. بنابراین امکان دست‌یابی به حرکت نرم و یکنواخت سیلندر فراهم می‌شود که نتیجه آن دست‌یابی به دقت بیش‌تر مکانی سیستم‌های سرو پنوماتیکی می‌باشد. نیروی اصطکاک داخلی تأثیر معنی‌داری بر روی ویژگی‌های حرکت عضو متحرک در سیلندرهای پنوماتیک دارد. تعیین نیروی اصطکاک در سیلندرهای پنوماتیک به‌خصوص در مواردی‌که عضو متحرک آن با سرعت زیاد و شتاب بالا حرکت می‌کند, دشوار است. در این پژوهش در نظر است روش مناسبی جهت تعیین نیروی اصطکاک داخلی در سیلندرهای پنوماتیک ارایه گردد. از این‌رو نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی نیروی اصطکاک در این پژوهش، نشان‌گر این واقیعت است که اصطکاک در سیلندرهای پنوماتیک صرفاً به نوع ماده آب‌بند و نوع روان‌کار بستگی نداشته بلکه سرعت حرکت پیستون، فشار هوا در طرفین پیستون، زمان توقف پیستون از جمله پارامترهای مؤثر و تأثیرگذار بر روی نیروی اصطکاک در سیلندرهای پنوماتیک محسوب می‌شوند.

* **عهده‌دار مکاتبات:** ab.taghipour@iau.ir

واژگان کلیدی: پنوماتیک، سیلندر دوطرفه، نیروی اصطکاک، سرعت.

نحوه استناد به این مقاله عباس تقی‌پور. شبیه سازی و بررسی عوامل مؤثر برنیروی اصطکاک داخلی سیلندرهای پنوماتیک. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی**. ۱۴۰۴; ۱۲ (۳) : ۲۶-۱۹.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.561]

۱- مقدمه

امروزه در بخش کشاورزی و صنایع وابسته، از جمله صنایع تبدیلی و فرآوری محصولات کشاورزی، به‌صورت بسیار گسترده از سیستم‌های انتقال توان سیالی شامل هیدرولیک و پنوماتیک استفاده می‌شود. در سیستم‌های پنوماتیکی از عملگرها برای تبدیل انرژی هوای متراکم به کار مکانیکی استفاده می‌شود. به‌طورکلی عملگرهای پنوماتیکی به سه دسته عمده سیلندرهای خطی، سیلندرهای دورانی پیوسته(موتورهای پنوماتیکی) و سیلندرهای دورانی با زاویه دوران محدود تقسیم می‌شوند. سیلندرهای پنوماتیکی انرژی هوای متراکم را به حرکت خطی (رفت و برگشتی) تبدیل می‌کنند [۱]. تعمیرات ساده و آسان، هزینه راه اندازی نسبتاً کم، عملکرد مطمئن، ایمنی بالا، انتقال حرارت سریع و آسان، آلودگی بسیار جزیی، نسبت قطر به ابعاد مناسب، عملکرد سریع، شتاب بالا و انعطاف پذیری قابل توجه از جمله مزایای عملگرهای پنوماتیک بوده که موجب به‌کارگیری وسیع آنها در صنایع وکشاورزی شده است[۲]. لازم به ذکر است که عملگرهای پنوماتیک، در مقایسه با عملگرهای هیدرولیکی و الکترومکانیک، کم هزینه‌تر و ساده‌تر بوده و به فضای کم‌تری نیز نیاز دارند[۳]. از طرفی به دلیل تراکم‌پذیری هوا و حرکت غیریکنواخت عضو متحرک عملگرهای پنوماتیک امکان به‌کارگیری آن‌ها در کاربردهای دقیق تا حدودی وجود ندارد[۴].

امروزه راه‌کارهای متفاوتی برای استفاده از عملگرهای پنوماتیک در کاربردهایی که نیاز به دقت بالایی دارند استفاده می‌شود. کاهش اصطکاک بین آب‌بند عضو متحرک و دیواره داخلی سیلندر پنوماتیک و همچنین به‌کارگیری سامانه‌های سرو از جمله این راه‌کارها می باشد [۵]. تحلیل خصوصیات و ویژگی‌های سیستم انتقال توان پنوماتیک و خصوصیات حرکت سیلندر پنوماتیک به‌خصوص در مواردی‌که به‌طور مداوم حرکت رفت و برگشتی انجام می‌دهند یا در مواردی‌که چندین سیلندر پنوماتیک می‌بایست نسبت به هم عملی را انجام دهند (حرکت سیلندرها به هم وابسته باشد) اهمیت ویژه‌ای دارد. سیلندرها جزو عملگرهای خطی در مدارهای پنوماتیک بوده که امروزه در بسیاری از کاربردها به‌کار گرفته می‌شوند [۴]. هنگام حرکت پیستون در داخل سیلندر عوامل متعددی از جمله مقدار بار خروجی، اصطکاک، شتاب، مقاومت‌های جریان و فشار بر روی سرعت و کار سیلندر پنوماتیک تأثیر قابل توجهی دارند [۶]. در حالی‌که تعیین مقدار بار خروجی معمولاً ساده است، محاسبه عوامل دیگر ممکن است با مشکلاتی همراه باشد. به‌همین دلیل و با توجه به مشکلات پیش رو در تعیین پارامترهای عملکردی سیلندر پنوماتیک، بسیاری از طراحان، برای در نظر گرفتن مقاومت‌های اضافی که بعضی از آن‌ها در طی حرکت سیلندر، دائم در حال تغییر می‌باشند، حدود ۵۰ درصد به بار حقیقی استاتیکی اضافه می‌کنند [۷].

از بین پارامترهای معرفی شده در حرکت سیلندر پنوماتیک، نیروی اصطکاک لغزشی بین پیستون و دیواره سیلندر، تأثیر معنی‌داری بر روی حرکت و انتقال توان در سیلندرهای پنوماتیک دارد [۳]. از طرفی تعیین نیروی اصطکاک در سیلندرهای پنوماتیک به‌خصوص در سرعت و شتاب‌های بالای پیستون نسبتاً مشکل و دشوار است. از این‌رو تعیین نیروی اصطکاک عملگرهای پنوماتیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۵]. لذا در این پژوهش، با توجه به اهمیت موضوع روشی برای تعیین نیروی لازم جهت غلبه بر اصطکاک بین پیستون و دیواره سیلندر پنوماتیک ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در شکل (۱) نمای خارجی سیلندر پنوماتیک دوطرفه که در نظر است نیروی اصطکاک بین آب‌بندهای پیستون با جداره داخلی آن تعیین و اندازه‌گیری گردد نشان داده شده است. قطر پیستون این سیلندر پنوماتیک، ۳۲mm و کورس حرکت عضو متحرک آن ۱۵۰mm می‌باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.561]



شکل(۱): جک پنوماتیک دوطرفه

در شکل (۲) به‌منظور بررسی عملکرد جک پنوماتیک و تحلیل پارامترهای تأثیرگذار در حرکت آن، رابطه بین فشار ورودی، بار، سرعت و شتاب برای سیلندر پنوماتیک توسط نرم افزار Fluid Sim ترسیم شده است. تحریک سوپاپ کنترل جهت سبب حرکت سیلندر در مرحله رفت می‌گردد. در این نقطه می‌توان مشاهده کرد که مقدار هوا با فشار زیاد در سمت حلقوی سیلندر به‌دلیل راه یافتن به اتمسفر کاهش می‌یابد. به طریق مشابه نیز فشار در سمت پیستون سیلندر به سمت فشار کمینه رو به افزایش است. در طی این مرحله نیروی مقاوم در مقابل حرکت، بزرگ‌تر از نیروی مولد حرکت بوده و بنابراین جابه‌جایی مشاهده نمی‌شود.

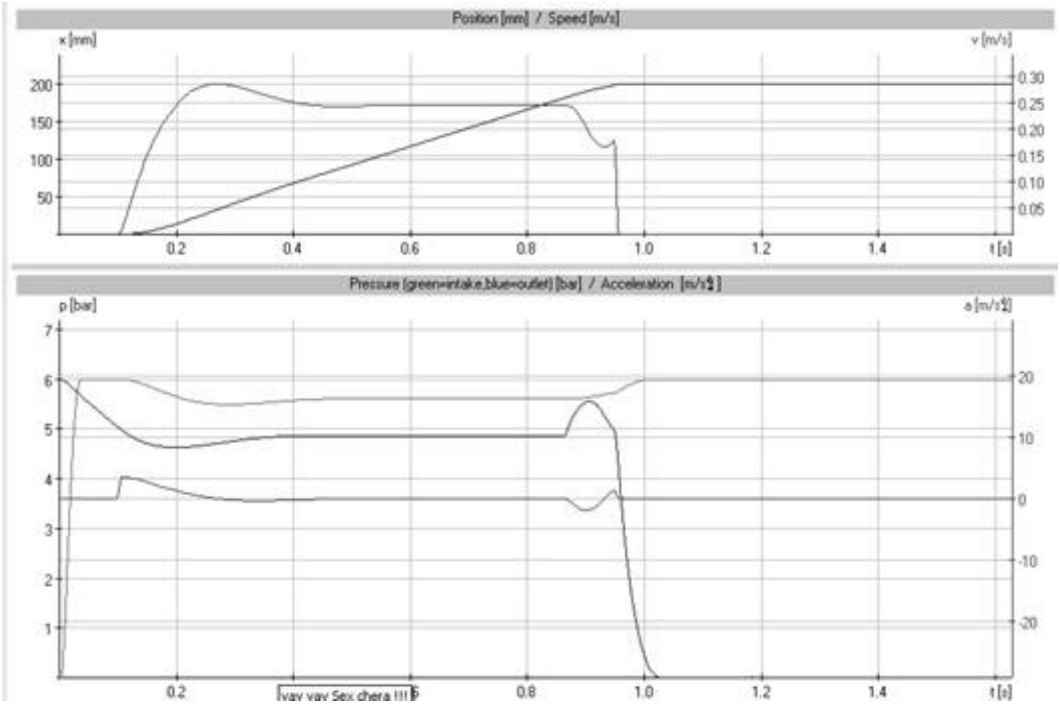
زمانی‌که این شرایط برعکس می‌شود (یعنی نیروی مولد حرکت، بیش‌تر از نیروی مقاوم در مقابل حرکت باشد) پیستون شروع به حرکت نموده و شتاب آن آغاز می‌شود. با شتاب گرفتن پیستون، هوا از سمت حلقوی خارج شده و پس فشار روی پیستون رو به افزایش می‌گذارد که به‌تدریج نرخ شتاب را کاهش می‌دهد. وقتی‌که نیروی مولد و مقاوم باهم مساوی شوند سرعت پیستون ثابت می‌شود. هنگامی‌که پیستون وارد مرحله ضربه‌گیری می شود، هوای خروجی محدود شده و سپس فشار افزون یافته‌ای را القا خواهد نمود. این افزایش پس‌فشار موازنه نیروها را بر هم زده و موجب کاهش شتاب پیستون می‌شود. همراه با افزایش سریع فشار در سمت حلقوی پیستون، افزایش در دمای هوا نیز وجود خواهد داشت که از کاهش انرژی جنبشی قطعات متحرک و افزایش اصطکاک هوا ناشی می‌شود.

حال با درنظرگرفتن هوای خروجی از سمت حلقوی سیلندر، بیش‌ترین سرعت هوا در مجرای خروجی زمانی اتفاق می‌افتد که جریان هوا، صوتی باشد. جریان هوای صوتی جریانی است که سرعت آن برابر سرعت صوت باشد. از نظر تئوری زمانی‌که افت فشار برابر یا بیش‌تر از P_1 ۰/۵۳ باشد جریان به‌صورت صوتی خواهد بود.

در این پژوهش، طراحی مدار پنوماتیک به گونه‌ای انجام می‌گیرد که کنترل سرعت عملگر پنوماتیک، به‌روش کنترل جریان خروجی (Meter-out) انجام گیرد. روش کنترل سرعت عملگر پنوماتیک به‌روش کنترل جریان خروجی موجب ایجاد پس‌فشار در طرف مقابل عضو متحرک شده که تا حدی نوسانات بار سیلندر را جبران می‌کند. سرعت جریان خروجی را می‌توان با استفاده از یک سوپاپ کنترل جریان و یک سوپاپ یک‌طرفه در خط بین جک و سوپاپ کنترل جهت و یا با استفاده از یک محدودکننده که به دهانه خروجی سوپاپ کنترل جهت نصب می‌شود، کنترل نمود. یک سوپاپ کنترل جریان که در خط جریان نصب می‌شود در مقایسه با محدودکننده مجرای خروجی، کنترل دقیق‌تری روی جریان هوا انجام می‌دهد و می‌بایست در موقعیتی که کنترل دقیق نیاز است, مورد استفاده قرار گیرد. مدار پنوماتیکی مونتاژ شده در این طرح به‌گونه‌ای انجام گرفته است که در حرکت رو به جلو و در حرکت رو به عقب عضو متحرک، کنترل سرعت آن به صورت کنترل جریان خروجی صورت پذیرد.

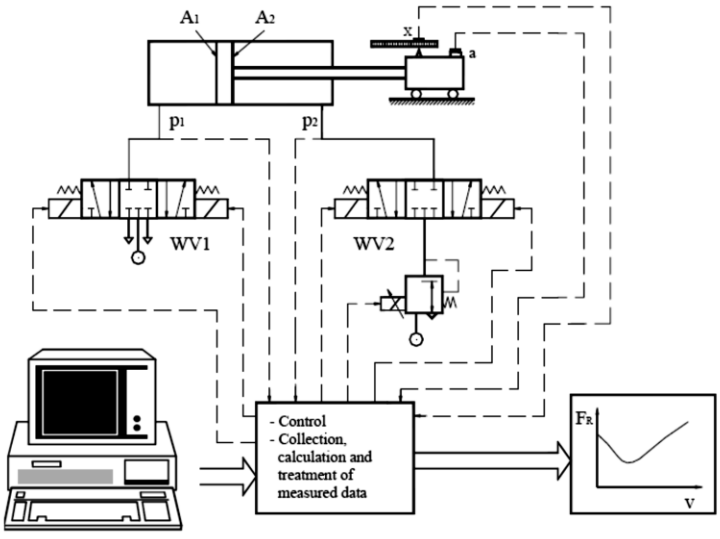
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.561]



شکل۲ : تغییرات فشار بر حسب زمان برای حرکت رو به جلوی عضو متحرک در جک پنوماتیک نشان داده شده در شکل ۱.

در شکل (۳) نحوه اندازه‌گیری نیروی اصطکاک سیلندر پنوماتیک نشان داده شده است. در این روش امکان اندازه‌گیری نیروی اصطکاک در سیلندرهای پنوماتیک معمول (به‌عنوان نمونه دوطرفه) و سیلندرهای پنوماتیک بدون میله وجود دارد. مطابق شکل (۳) از دو سوپاپ کنترل جهت ۵ دهانه ۳ وضعیته سولونوئیدی برای کنترل ورود و خروج هوای فشرده به محفظه‌های A_1 و A_2 استفاده شده است.



شکل۳ : اندازه گیری نیروی اصطکاک سیلندر پنوماتیک

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.561]

ارسال جریان برق به هریک از سولونوئیدها توسط واحد کنترل انجام می‌گیرد. از طرفی بار مطابق شکل (۳) به‌طور مطمئنی به میله سیلندر پنوماتیک متصل می‌شود. از حس‌گر شتاب a برای تعیین شتاب حرکت بار یا میله جک پنوماتیک و از یک حس‌گر تعیین موقعیت X برای تعیین محل قرارگیری عضو متحرک و بار متصل به آن استفاده می‌شود. هم‌چنین فشار در مجاری P_1 و P_2 توسط حس‌گرهای فشار اندازه‌گیری و به واحد کنترل ارسال می‌شود. در اثر تحریک سوپاپ WV_1 و ارسال هوای فشرده به سطح A_1 سیلندر پنوماتیک، هوای فشرده موجود در محفظه A_2 از طریق مجرای P_2 و سوپاپ کنترل جهت WV_2 به محیط ارسال می‌گردد. بدین ترتیب نیروی حاصل از اعمال فشار هوا به سطح A_1 تمایل به حرکت رو به جلوی پیستون عملگر پنوماتیکی را دارد. از طرفی نیروی حاصل از اعمال فشار هوا در سمت حلقوی سیلندر پنوماتیک بر سطح A_2، نیروی اصطکاک بین پیستون و سیلندر، نیروی اصطکاک مقاوم و نیروی اینرسی، در برابر حرکت رو به جلوی پیستون مقاومت ایجاد می‌کنند. بدین ترتیب رابطه زیر در خصوص تحلیل نیروی پیستون سیلندر پنوماتیک صادق است:

$$\sum F = 0 \Rightarrow P_1A_1 - P_2A_2 - ma - F_L - F_R = 0 \quad (۱)$$

در این رابطه:

P_1 و P_2 : به‌ترتیب فشار هوا در سمت کامل و حلقوی سیلندر پنوماتیک, A_1 و A_2 : به‌ترتیب مساحت پیستون در سمت کامل و حلقوی, m : جرم بار, a : شتاب, F_R : نیروی اصطکاک, F_L : نیروی مقاوم بار است.

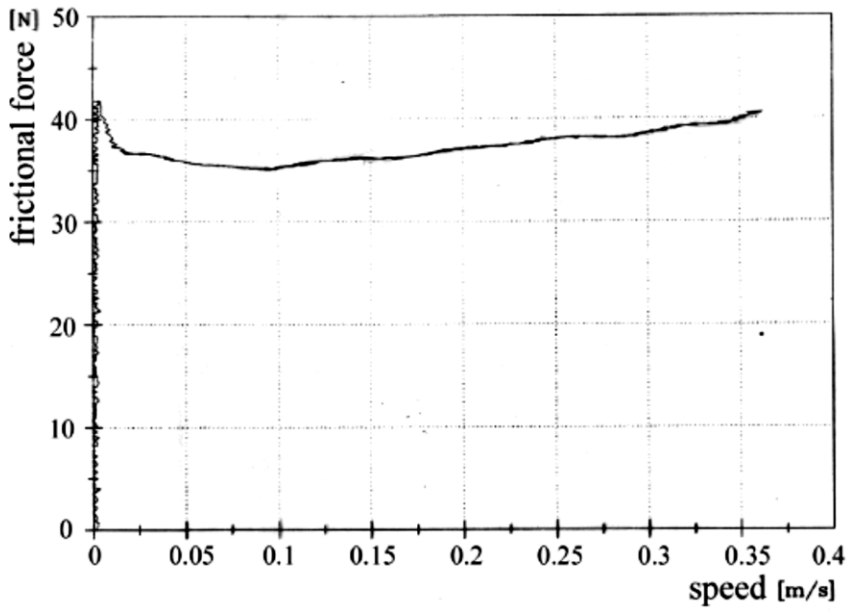
به‌منظور اندازه‌گیری مناسب و دقیق نیروی اصطکاک بین پیستون و سیلندر، از اعمال بار به میله سیلندر پنوماتیک اجتناب می‌گردد. بدین ترتیب نیروی اصطکاک بین پیستون و دیواره سیلندر پنوماتیک از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$F_R = P_1A_1 - P_2A_2 - ma \quad (۲)$$

در صورت معلوم‌بودن P_1 و P_2 توسط حس‌گر فشار و هم‌چنین شتاب توسط حس‌گر شتاب، نیروی اصطکاک از رابطه فوق تعیین می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

در نهایت براساس خروجی هر یک از حس‌گرها، نمودار نیروی اصطکاک بر حسب سرعت خطی عضو متحرک سیلندر پنوماتیک ترسیم می‌گردد. در شکل (۴) نمودار نیروی اصطکاک برای سیلندر پنوماتیک با قطر ۳۲mm و کورس ۱۵۰mm ترسیم شده است.



شکل۴: نیروی اصطکاک سیلندر پنوماتیک مفروض

مطابق شکل (۴) پس از تغییر وضعیت سوپاپ کنترل جهت، توسط واحد کنترل یا پردازش‌گر مرکزی و ارسال هوای فشرده به مجاری سیلندر پنوماتیک، عضو متحرک شروع به حرکت نمی‌کند. به مدت زمان لازم برای شروع به حرکت عضو متحرک پس از تغییر وضعیت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.561]

سوپاپ، زمان عکس العمل مدار اطلاق می‌گردد. همان‌گونه که در شکل (۴) نیز مشاهده می‌گردد پس از تغییر وضعیت سوپاپ کنترل، قبل از حرکت عضو متحرک سیلندر پنوماتیک، نیروی اصطکاک به‌شدت افزایش می‌یابد. پس از حرکت عضو متحرک سیلندر پنوماتیک، نیروی اصطکاک بین آب‌بندهای عضو متحرک و جداره داخلی سیلندر کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر با توجه به این‌که ضریب اصطکاک بین آب‌بندهای پیستون در حال حرکت و جداره داخلی سیلندر پنوماتیک کم‌تر از حالتی است که عضو متحرک متوقف است، نیروی اصطکاک با کاهش روبه‌رو می‌گردد. سپس با افزایش بیش‌تر سرعت حرکت عضو متحرک سیلندر پنوماتیک، نیروی اصطکاک مجدداً با شیب کم‌تری افزایش می‌یابد. افزایش نیروی اصطکاک در مرحله دوم حرکت عضو متحرک سیلندر پنوماتیک به‌خاطر افزایش حجم هوای تحت فشار و توقف جزئی پیستون و افزایش ضریب اصطکاک می‌باشد. هم‌چنین تغییر فشار در طرفین عضو متحرک از جمله دلایل افزایش مجدد نیروی اصطکاک در سیلندر پنوماتیک می‌باشد. از این‌رو نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی نیروی اصطکاک در این پژوهش، نشان‌گر این واقیعت است که اصطکاک در سیلندرهای پنوماتیک صرفاً به نوع ماده آب‌بند و نوع روان‌کار بستگی ندارد. با توجه به مطالب بیان شده سرعت حرکت پیستون، فشار هوا در طرفین پیستون و زمان توقف پیستون، از جمله پارامترهای مؤثر و تأثیرگذار بر روی نیروی اصطکاک در سیلندرهای پنوماتیک محسوب می‌شوند.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش روش منا سبی جهت تعیین نیروی ا صطکاک داخلی در سیلندرهای پنوماتیک ارائه گردید. نتایج حا صل از اندازه‌گیری تجربی نیروی اصطکاک در این پژوهش، نشان‌گر این واقیعت است که اصطکاک در سیلندرهای پنوماتیک علاوه بر خصوصیات ماده آب‌بند و نوع روان‌کار، به پارامترهای دینامیکی سیلندر پنوماتیکی از جمله سرعت حرکت پیستون، فشار هوا در طرفین پیستون، زمان توقف پیستون نیز وابسته است. با توجه به برر سی‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام شده، در زیر به برخی از مزایای روش ارائه شده برای تعیین نیروی ا صطکاک بین پیستون و دیواره سیلندر پنوماتیک می‌توان به کاهش زمان لازم برای اندازه‌گیری نیروی اصطکاک، هزینه کم، سادگی سامانه، دقت بالا، امکان اندازه‌گیری نیروی اصطکاک سیلندر پنوماتیک در حین انجام وظایف محوله، امکان اندازه‌گیری نیروی اصطکاک سیلندرهای یک‌طرفه، دو طرفه و هم‌چنین سیلندرهای پنوماتیک بدون میله، امکان ترسیم نمودار نیروی اصطکاک در سرعت‌های مختلف، امکان اندازه‌گیری نیروی اصطکاک در هر نقطه‌ای از کورس حرکتی آن اشاره کرد.

مراجع

[1] Pinches, M. J., and Callear, B. J., “Power Pneumatics”, Prentice Hall, 1996.

[2] Andrighetto, P.L., Valdiero, A.C., and Vincensy, C.N., “Experimental Comparisons of the Control Solutions for Pneumatic Actuators”, Proc. of the 17th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Sao Paulo, Brazil, 2003.

[3] Ott, E., “Strange Attractors and Chaotic Motions of Dynamical Systems”, “Reviews of Modern Physics”, 53(4) (1981), 655-671.

[4] Valdiero, A.C., Andrighetto, P.L., and Carlotto, L., “Dynamic Modeling and Friction Parameters Estimation to Pneumatic Actuators”, Proc. of MUSME, the International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics, Uberlandia, Brazil, 2005.

[5] Nouri, B., Bender, F., Swevers, J., Vanherck, P., and Brussel, H., “Modeling a Pneumatic Servo Positioning System with Friction”, Proceedings of the ACC, (2000),1067-1071.

[6] Vieira, A.D., “Theoretical and Experimental Analysis of Pneumatic Linear Position Servo Systems”, Proc. of the 17th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Sao Paulo, Brazil, (2003).

[7] Azzi, A., Abdelghani Maoui, A., Fatu, A., Fily, S., and Souchet, D., Experimental study of friction in pneumatic seals. Tribology International, 135 (2019), 432-443.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.561]

Simulation and Investigation of Factors Affecting the Internal Friction Force of Pneumatic Cylinders

Abbas Taghipour[1,*]

[1*] Institute of Manufacturing Engineering and Industrial Technologies, Dez.C. , Islamic Azad University, Dezful, Iran, ab.taghipoor@iau.ac.ir

Received: summer 2025 Accepted: autumn 2025

Abstract

Pneumatic systems play a very important role in various sectors of industry and agriculture, including industrial automation systems. With the gradual evolution of automation systems, speed and accuracy, reliability, low friction, and long service life have become essential for pneumatic actuators. Having accurate information about the frictional characteristics of the seals used in pneumatic actuators leads to improved cylinder movement, optimization of the effective force of the jack (cylinder), and prevention of cylinder slippage. Consequently, achieving smooth and uniform cylinder motion is made possible, which results in higher mechanical accuracy of pneumatic servo systems. The internal friction force has a significant impact on the motion characteristics of the moving member in pneumatic cylinders. Determining the friction force in pneumatic cylinders is particularly difficult in cases where the moving member operates at high speeds and accelerations. This research aims to present a suitable method for determining the internal friction force in pneumatic cylinders. Therefore, the results of the experimental measurement of friction in this study indicate that friction in pneumatic cylinders does not depend solely on the type of seal material and the type of lubricant. Rather, piston movement speed, air pressure on both sides of the piston, and piston dwell time are among the effective and influential parameters on the friction force in pneumatic cylinders.

Keywords: Pneumatics, Double-Acting Cylinder, Friction Force, Velocity.

*corresponding author: ab.taghipoor@iau.ac.ir

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.561]

Cite this article as: Abbas Taghipour, Simulation and Investigation of Factors Affecting the Internal Friction Force of Pneumatic Cylinders,. **Journal of Energy Conversion, 2025, 12(3), 19-26**.