

## بررسی تجربی دو نمونه نگهدارنده پنوماتیک تماسی جدید از نوع دوبعدی و تقارن محوری برای اجسام نرم و متخلخل

محمد حجی نجف آبادی<sup>۱\*</sup>، ستایش سالارپور<sup>۲</sup>، مبثم حکیمی<sup>۲</sup>، لعیا بابایی پولادی<sup>۲</sup>

۱- استادیار مهندسی هوافضا، گروه هوافضا، دانشکده فنی مهندسی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۷)

### چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی تجربی عملکرد دو نمونه نگهدارنده پنوماتیک تماسی نوع جدید است. یکی از آن‌ها دوبعدی و دیگری تقارن محوری می‌باشد، که از اجکتور دوگلوگاهه برای نگهداری و جابه‌جایی اجسام نرم و متخلخل استفاده می‌کنند. در نمونه دوبعدی از صفحه‌های شکافدار با ضخامت شکاف‌های مختلف جهت بررسی اثر ضخامت شکاف صفحه‌ها و تزریق جریان ورودی در بازه فشارهای مختلف بر فشار مکش و نیروی مکش و عملکرد دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. و در نمونه سه‌بعدی از رینگ‌های سوراخ‌دار با قطر سوراخ‌های متفاوت جهت تأثیر آن‌ها بر عملکرد و اثر جریان پرفشار ورودی بر عملکرد دستگاه ارزیابی شده است. نتایج استخراج شده نشان می‌دهند که در هر دو نگهدارنده با افزایش فشار ورودی، فشار و نیروی مکش تولیدشده برای نگهداری مواد نرم و متخلخل افزایش می‌یابد. همچنین صرف نظر از دبی مصرفی نگهدارنده‌ها، نمونه تقارن محوری با مصرف دبی جرمی بالاتر، نیرو و فشار مکش بیشتری ایجاد می‌کند ولی عملکرد نگهدارنده دوبعدی در تولید نیروی مکش با در نظر گرفتن میزان دبی جرمی مصرفی، به مراتب بهتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نگهدارنده تماسی، اجکتور دو گلوگاهه، مواد نرم و متخلخل، آیرودینامیک تجربی

## Experimental Study of Two-Dimensional and Axisymmetric Pneumatic Contact Grippers for Limp and Porous Materials

Mohammad Hojaji<sup>\*</sup>, Setayesh Salarpour, Meysam Hakimi and Laya Babaie Pouladi

### Abstract

The purpose of this study is to experimentally evaluate the performance of two models of new type of contact pneumatic grippers. One of them is two-dimensional and the other one is axisymmetric, which uses a dual throat ejector to handle limp and porous materials. In two-dimensional device, slotted plates with different slot width were used to investigate the effect of slot width and total pressure of inlet flow on the performance of the gripper. In the axisymmetric gripper, perforated rings with different hole diameters were used to evaluate their effect and the effect of high-pressure inlet flow on the performance of the device. Results show that in both grippers, by increasing inlet pressure, the induced pressure and suction force to hold limp materials increases. Also, regardless of the gripper mass flow rate consumption, the axisymmetric gripper with higher mass flow consumption creates more force and suction pressure, but the performance of the two-dimensional gripper in producing suction force is much better by considering the mass flow rate consumption.

**Key words:** Gripper, Contact gripper, Dual-throat ejector, Limp and porous materials

## مقدمه

جابه‌جایی مواد نرم و متخلخل به صورت خودکار امروزه به چالشی مهم در صنعت تبدیل شده است. در حال حاضر نگهدارنده‌ای که توانایی جذب بالایی داشته و کمترین آسیب را به بافت مواد نرم و متخلخل وارد کند، چندان شناخته‌شده نمی‌باشد. هزینه‌های بسیار بالا، ایجاد آسیب به بافت مواد، کاهش ایمنی و خطرات ناشی از جابه‌جایی دستی و مکانیکی صنایع را به فکر راهی برای کاهش زیان و بالابردن کیفیت برای جابه‌جایی محصولات برده است. همچنین به دلیل متفاوت بودن جنس مواد نرم و متخلخل، الزامات جابه‌جایی برای هر کدام از این مواد دارای پیچیدگی‌هایی بوده است. به عنوان مثال نگه‌داشتن و جابه‌جایی محصولات چرمی چالش مهمی را عمدتاً به دلیل سختی بسیار کم آن‌ها و امکان ایجاد اثر در سطوح ظریف آن‌ها ایجاد می‌کند [۱]. در تولید مواد غذایی و نوشیدنی نیز که یکی از بزرگ‌ترین بخش‌های صنعت جهانی را تشکیل می‌دهد، با این چالش نیز روبه‌رو هستند به عنوان مثال اغلب مواد غذایی هنگام دست زدن دچار تغییر شکل می‌شوند و ماهیت بسیاری از آن‌ها به این صورت است که نمی‌توان ویژگی‌های آن‌ها را به صورت هندسی به‌طور مناسب توصیف کرد، زیرا هندسه آن‌ها اغلب تابعی از زمان و نیروهای وارد شده بر جسم است. بنابراین هر سیستمی که برای صنایع غذایی تولید شده باشد، باید به این تغییر شکل واکنش نشان دهد، به همین دلیل ارائه تکنیک و راهکار مؤثر برای جابه‌جایی مواد نرم و متخلخل که توسط یک سیستم صورت گیرد، لازم می‌باشد [۲]. به دنبال این نیاز در صنعت، پژوهش‌ها و راهکارهای زیادی صورت گرفته است. یکی از مؤثرترین و کارآمدترین روش‌ها برای جواب به این نیاز اساسی استفاده از اجکتورها به عنوان نگهدارنده برای جذب و جابه‌جایی مواد نرم و متخلخل می‌باشد.

اجکتور دستگاهی برای انتقال، تراکم و مکش می‌باشد که در آن انرژی سیال پرفشار با گذشتن از یک نازل به انرژی جنبشی تبدیل شده و با کاهش فشار استاتیک می‌تواند ماده‌ای را مکش کند. علاوه بر موارد مذکور، اجکتورها در نیروگاه‌های بخار برای ایجاد خلأ در کندانسور [۳] و همچنین حذف خاکستر از دیگ‌های بخار و گازهای دودکش [۴] در راکتورهای هسته‌ای آب جوش برای گردش مایع خنک‌کننده [۵]، برای پاشش پودرها [۶]، پمپاژ آب کدر [۷]، مصارف پزشکی (مکش مایعات

بدن) استفاده می‌شود. همچنین، سیستم‌های تبرید اجکتوری، که در اوایل دهه ۱۹۳۰ بسیار محبوب بودند، نیز مجدداً مورد توجه قرار گرفته‌اند، زیرا می‌توانند با انرژی حرارتی دمای پایین از منابع تجدیدپذیر یا ضایعات حرارتی فعال شوند، بنابراین استفاده از سوخت‌های فسیلی را کاهش داده یا کارایی استفاده از آن‌ها را بهبود می‌بخشد [۸]. با توجه به اهمیت اجکتورها و کاربرد وسیع آن تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام شده است. در سال ۲۰۲۰ فنلیانگ وو و همکارانش به تجزیه و تحلیل بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری یک اجکتور با دهانه حلقوی بر اساس اثر کواندا پرداختند که در آخر نتایج نشان داد عملکرد اجکتور بهینه‌شده بهبود یافته است [۹]. خو و همکاران در سال ۲۰۱۶ از اجکتور علاوه بر نگهدارنده، به عنوان انتقال‌دهنده اجسام نیز بهره گرفته‌اند. در پژوهش آن‌ها، عمل انتقال بر اساس اثر یگانه و دوگانه و تئوری و تأثیر موقعیت نازل بر عمل انتقال به ترتیب با روش تجربی و شبیه‌سازی عددی بررسی شده است [۱۰]. از جمله تحقیقاتی که در استفاده از اجکتورها در صنعت جابه‌جایی مواد نرم و متخلخل انجام شده می‌توان به تحقیق لین و همکارانش در سال ۲۰۰۸ اشاره نمود. آن‌ها یک نگهدارنده جدید بر اساس اجکتور کواندا را که به صورت باریک، صفحه‌ای با چندین سر مکش مستقل ساخته شده بود، توصیف کردند و به بررسی تجربی آن پرداختند. هدف آن‌ها از آزمایش اجکتور کواندای صفحه‌ای، مشاهده کردن نیروی نگهدارنده روی مواد متخلخل، عملکرد فشار و جریان هوای اولیه است. آن‌ها در این پژوهش به نتایج مهمی از جمله نسبت بهینه طول به عرض دیفیوزر، نسبت ارتفاع به ضخامت دیفیوزر دستگاه پی بردند و همچنین متوجه شدند که این گیرنده‌ها با اندازه‌های متناسب توانایی جذب تمام مواد نفوذناپذیر و فیبری را دارند و هیچ علامت و ردپایی از خود بر روی مواد باقی نمی‌گذارند [۱۱]. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۴ توسط اسمیت و همکاران به صورت تجربی عملکرد نگهدارنده جدید برای الکترودهای باتری بر اساس اصل برنولی با جریان هوای خروجی یکپارچه توسط نازل کواندا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن بود که اولین نمونه این نگهدارنده در مقایسه با نگهدارنده معمولی برنولی، توانایی کاهش آلودگی ذرات در محیط تولید را دارد [۱۲]. گیرنده گردابه‌ای نوع جدیدی از گیرنده غیر تماسی است که در نتیجه جریان گردابه‌ای پرسرعت، نیروی مکش

بر اساس اجکتور کواندا پرداخته‌اند. آن‌ها اثرات میزان تولید جریان و ارتفاع دهانه بر روی ظرفیت جذب گیرنده را به صورت تجربی بررسی کرده‌اند. در تحقیق آن‌ها مقایسه‌ای بین گیرنده خود و گیرنده غیر تماسی معمولی انجام شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اجکتور مصرف هوای فشرده را کاهش داده، دبی خروجی را افزایش می‌دهد و همچنین سبب افزایش نیروی بالابرنده و پایداری آن می‌گردد [۱۹].

با مطالعه و بررسی پژوهش‌های انجام گرفته، گیرنده‌های پنوماتیکی در صنعت به دو گونه تماسی و غیر تماسی تقسیم‌بندی می‌شوند که هر کدام با توجه به ویژگی‌های خود به کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش برای بهبود عملکرد و بالابردن میزان مکش و نیروی تولیدی، دو نمونه اجکتور پنوماتیک دوگلوگاهه تماسی جدید به صورت دوبعدی و تقارن محوری ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته شده است. در این پژوهش به مقایسه این دو اجکتور از لحاظ عملکرد، به صورت تجربی و پارامتریک پرداخته شده است. در این راستا اثر پارامترهای تزریق فشار ورودی و تأثیر ضخامت شکاف صفحه‌های مختلف بر فشار و نیروی مکش دستگاه دوبعدی و همچنین اثر رینگ‌های سوراخ‌دار با قطر سوراخ‌های مختلف و تأثیر فشار جریان ورودی بر فشار و نیروی مکش نگهدارنده نمونه تقارن محوری، با استفاده از یک ماده متخلخل نمونه، مورد بررسی قرار گرفته شده است.

### مدل آزمایشگاهی

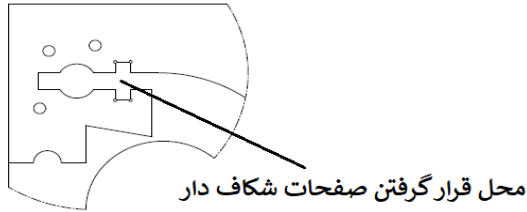
در این تحقیق عملکرد دو نمونه نگهدارنده پنوماتیکی جدید به صورت دوبعدی و تقارن محوری از نوع تماسی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ شماتیک نگهدارنده دوبعدی را نشان می‌دهد. در نگهدارنده دوبعدی از دو مجرای جریان پرفشار کنارگذر برای ورود جریان پرفشار اولیه استفاده شده است. در مسیر جریان هوای پرفشار کنارگذر صفحات شکاف دار با ابعاد ۱، ۰/۵، ۰/۳ میلی‌متر در موقعیت‌های کنار صفحات قرار گرفته شده که شماتیک این صفحات به همراه محل قرارگیری آن‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. جریان‌های ورودی پس از عبور از این صفحات دچار افت فشار و افزایش سرعت شده، همچنین جریان ثانویه از طریق مجرای مکش جریان ثانویه که مجرای به قطر ۵۰ میلی‌متر می‌باشد به درون گیرنده مکش می‌شود. سپس جریان کنارگذر با جریان ثانویه

تولید می‌کند. تأثیر سرعت جریان گردابه ای بر کارایی گیرنده پنوماتیکی غیر تماسی را جیانگونگ ژاو و همکارش در سال ۲۰۱۶ بررسی کرده‌اند [۱۳].

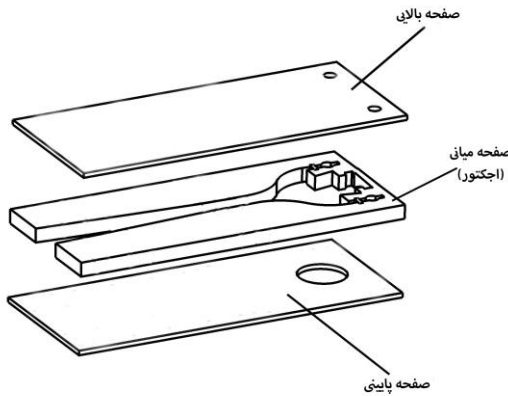
در همان سال شی کایگه و همکارانش در پژوهشی به بهینه‌سازی قطر بیرونی نگهدارنده برنولی پرداختند. در این پژوهش مشخص شده است که قطر بیرونی تأثیر زیادی بر روی نیروی مکش دارد [۱۴]. جیس وال و همکارانش در سال ۲۰۱۷ پژوهشی بر روی یک نگهدارنده با استفاده از جریان هوای فشرده انجام دادند. این مطالعه یک رویکرد نوآورانه برای جذب محصولات غذایی بسته‌بندی نشده می‌باشد. هدف اصلی این گزارش برجسته کردن اهمیت گیرنده پنوماتیکی در کاربردهای صنعتی است. نتایج این پژوهش نشان داد که گیرنده پنوماتیکی، اجسام با اشکال و وزن‌های متفاوت به راحتی می‌تواند جابه‌جا کند و استفاده از این نوع گیرنده‌ها در صنایع مختلف مانند حمل‌ونقل مواد غذایی بسیار مناسب می‌باشد. همچنین امکان استفاده در محیط‌های مرطوب را نیز فراهم می‌کند [۱۵]. در همان سال ولادیمیر و همکاران به تجزیه و تحلیل بهره‌وری انرژی در فرایند نگهداری اشیاء صنعتی با استفاده از گیرنده برنولی پرداختند. این پژوهش به موضوع کاهش مصرف انرژی برای حمل‌ونقل اجسام صنعتی می‌پردازد. نتیجه آن بیان می‌کند که جهت‌گیری گیرنده‌ها برای حمل‌ونقل اشیاء در مقایسه با گیرنده‌های که بدون جهت‌گیری به جابه‌جایی اشیاء می‌پردازند از نظر اقتصادی به صرف تر می‌باشد [۱۶].

در سال ۲۰۱۸ کوپریک جی و همکارانش بر روی یک نگهدارنده برای نگهداری و جابه‌جایی مواد نرم و متخلخل در صنعت نساجی پژوهشی انجام داده‌اند. این آزمایش بر روی ۱۰ نمونه پارچه مختلف در فشارهای ورودی ۴ تا ۶ بار انجام شده است. و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نگهدارنده پنوماتیک در صنعت نساجی بسیار مؤثر واقع شده است و می‌تواند در جریان تولید، بسیار در زمان صرفه‌جویی کند، اما به پژوهش‌های بیشتری متناسب با ویژگی‌های مختلف مواد در این صنعت نیاز می‌باشد [۱۷]. در سال ۲۰۱۹ برهان تشتوش و همکاران در یک بررسی جامع به تأثیر جنبه‌های مختلف هندسی بر عملکرد و کاربردهای اجکتور پرداختند. این بررسی به صورت جامع در چهار بخش تنظیم شده است [۱۸].

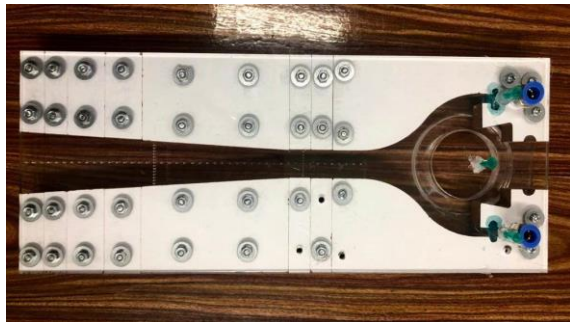
در سال ۲۰۲۱، هانینگ لیو و همکاران به طراحی، ساخت و بررسی تجربی یک گیرنده غیر تماسی با تقویت سرعت جریان



شکل ۳- شماتیک محل صفحات شکاف دار



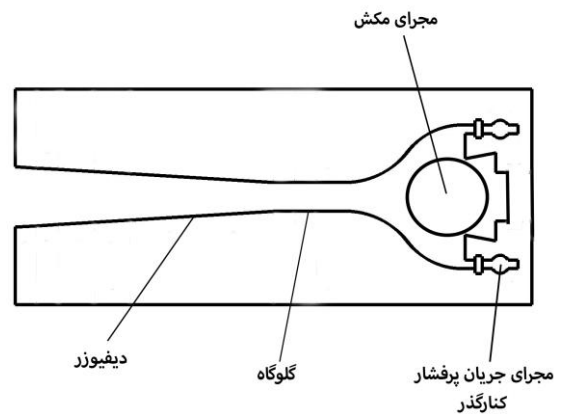
شک ۴ - شماتیک ساختمان نگهدارنده



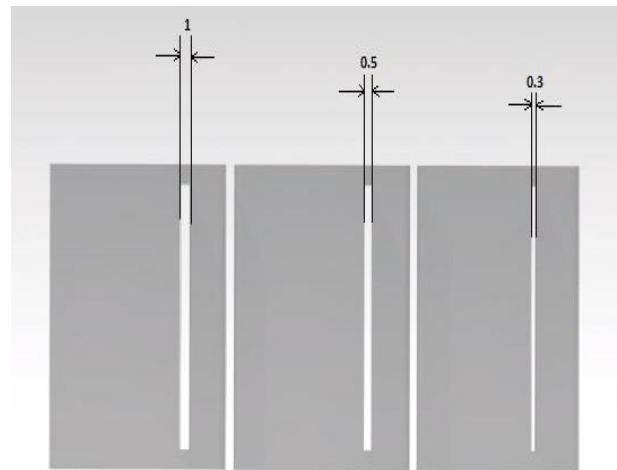
شکل ۵ - مدل آزمایشگاهی نگهدارنده دوبعدی

نگهدارنده پنوماتیکی تقارن محوری نیز دارای یک مجرای ورودی جریان هوای پرفشار می‌باشد که با ورود به دستگاه و گذشتن از رینگ سوراخ‌دار وارد گلوگاه دوم می‌شود. سپس، در صورت باز بودن مجرای مکش، هوای مکش شده از گلوگاه اول عبور کرده و در گلوگاه دوم با هوای تزریق شده که از رینگ عبور می‌کند، اختلاط یافته و نهایتاً از دفیوزر دستگاه خارج می‌شود. شماتیک مدل تقارن محوری این نگهدارنده در شکل ۶ و در شکل ۷ مدل آزمایشگاهی نمونه نشان داده شده است.

در محفظه اختلاطی به عرض ۲۰ میلی‌متر و طول ۵۰ میلی‌متر وارد شده و پس از اختلاط، این جریان از طریق دفیوزری با زاویه ۳/۵ درجه و طول ۱۰۰ میلی‌متر از دستگاه خارج می‌شود. در شکل ۴ شماتیک ساختمان نگهدارنده نشان داده شده است. ساختمان کلی این نگهدارنده از سه صفحه مجزا تشکیل شده است، صفحه بالایی دارای دو سوراخ برای ورود جریان‌های کنارگذر، صفحه میانی شامل مجراهای جریان کنارگذر، گلوگاه و دفیوزر و صفحه پایین شامل دهانه ورودی جریان ثانویه می‌باشد. شکل ۵ تصویر نگهدارنده دوبعدی ساخته شده را نشان می‌دهد.

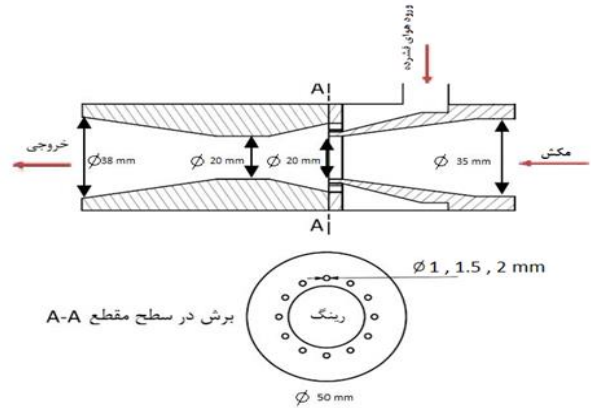


شکل ۱ - شماتیک نگهدارنده مسطح تماسی جدید



شکل ۲ - صفحات شکاف دار با ضخامت شکاف‌های ۱، ۰/۵، ۰/۳ میلی‌متر

میلی‌متر به منظور اعمال نیرو به بازو و اندازه‌گیری نیرو توسط لودسل تعبیه شده است. شکل شماره ۹ محل قرارگیری لودسل، جک پنوماتیک و گیرنده دوبعدی و تقارن محوری بر روی پایه نگهدارنده چندمنظوره آزمایشگاهی گیرنده را نشان می‌دهد. نحوه اندازه‌گیری نیرو برای هر جسم متخلخل به این صورت است که بیشترین نیروی وارده شده بر جسم تا لحظه جدایش کامل جسم از سیستم، اندازه‌گیری شود. در شکل ۱۰ شماتیک محل قرارگیری گیرنده تقارن محور بر روی پایه نگهدارنده نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری فشار کل هوای فشرده و فشارهای مکش سوراخ‌هایی بر روی سیستم تعبیه شده است که توسط لوله‌ها به سنسورهای فشار متصل هستند، همچنین برای تزریق جریان هوای فشرده، از دو خط شماره ۱ و شماره ۲ هوای فشرده که به مخازن و کمپرسورهای هوا متصل هستند، استفاده شده است. در خط شماره ۱ حداکثر فشار کاری کمپرسور ۱۲ بار و حجم مخزن ۵۰۰ لیتر می‌باشد. در خط شماره ۲ برای فراهم کردن فشار موردنیاز از یک کمپرسور که می‌تواند فشار هوا را تا فشار ۳۰۰ بار افزایش دهد، استفاده شده است، مخزن‌هایی که برای نگهداری هوای فشرده نصب شده‌اند، ظرفیت نگهداری هوای فشرده ۱۵۰ بار را دارند. فشار هوای موردنیاز برای نگهدارنده دوبعدی از خط شماره ۲ تأمین می‌شود که دارای فشار بسیار زیادی است به همین منظور فشار زیاد توسط یک رگلاتور فشار، کاهش پیدا کرده و تا فشار ۱/۵ بار تنظیم و به داخل نگهدارنده تزریق می‌شود. در انجام آزمایش‌ها برای گیرنده تقارن محوری برای تأمین هوای موردنیاز از خط شماره ۱ استفاده شده است که فشارهای مختلف از ۰ تا حداکثر ۴ بار گیج متغیر بوده است. فشارهای مکش و هوای فشرده توسط سنسورهای فشار اندازه‌گیری می‌شوند، این سنسورهای دیفرانسیلی از نوع ترافاگ ۱- تا ۴ بار و ۱- تا ۱+ بار گیج بوده و دقت اندازه‌گیری آن‌ها ۰/۱٪ از مقیاس کلی است. این سنسورها داخل یک جعبه سنسور قرار دارند که لوله‌های فشار وارد آن می‌شود، فشارهای اندازه‌گیری شده از طریق کارت داده‌برداری از نوع Advantech و مدل ۱۵۰ ۴۷۱۱ USB-A به یک رایانه منتقل می‌شود. این کارت داده‌برداری ۱۶ کاناله و ۱۲ بیتی به رایانه متصل است. برای شروع آزمایش‌ها ابتدا باید سنسورها را به دقت کالیبره کرد، که پس از انجام این کار، آزمایش‌ها با دقت و با نرخ داده‌برداری 1000 HZ انجام شده‌اند.



شکل ۶ - شماتیک نگهدارنده تقارن محوری



شکل ۷ - مدل آزمایشگاهی نگهدارنده تقارن محوری

### تجهیزات آزمایشگاهی

در این تحقیق برای دستیابی به بهترین مقایسه بین عملکرد دو گیرنده دوبعدی و تقارن محوری و انجام تست‌های نیرو و فشارها، یک پایه نگهدارنده چندمنظوره آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. در شکل ۸ شماتیک و چیدمان کلی تجهیزات آزمایشگاهی برای هر دو مدل دوبعدی و تقارن محوری نشان داده شده است. در مدل گیرنده دوبعدی از صفحات شکاف دار در محل عبور جریان کنارگذر برای بررسی تأثیر اندازه شکاف‌ها بر رفتار دستگاه و در مدل گیرنده تقارن محوری از تعدادی رینگ به قطر سوراخ‌های ۱ و ۱/۵ و ۲ میلی‌متر جهت بررسی اثر رینگ‌ها بر رفتار دستگاه استفاده شده است. البته لازم به ذکر است که در طراحی سوراخ‌های رینگ‌ها به گونه‌ای بوده است که مساحت مجموع سوراخ‌ها در سه حالت مختلف یکسان است. برای اندازه‌گیری نیروی مکش از یک لودسل که تحمل نیرویی بین ۰ تا ۲۵۰۰ گرم را دارد، استفاده شده است. این لودسل با دقت ۰/۱٪ از مقیاس کلی آن و از نوع ترنسدیوسر به مجموعه بازو و مفصلی که در پایه نگهدارنده چندمنظوره آزمایشگاهی نگهدارنده قرار دارد متصل است، جک پنوماتیک با اندازه استاندارد ۳۰×۱۴۰

### نتایج و بحث

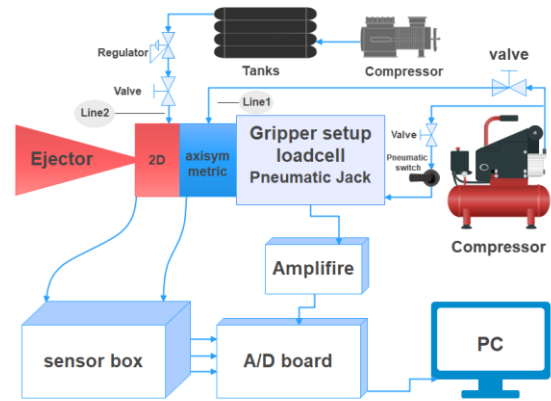
در این آزمایش‌ها هر دو دستگاه در شرایط یکسان آزمایشگاهی مورد آزمایش قرار گرفته شده‌اند. در نگهدارنده‌ی دوبعدی با قرار دادن صفحات شکافدار بر مسیر جریان کنارگذر و تزریق جریان با فشارهای نسبی ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ بار، اثر ضخامت شکاف صفحات و فشار جریان ورودی بر عملکرد دستگاه مورد بررسی قرار گرفته شده است. در آزمایش‌های نمونه‌ی تقارن محوری، اثر رینگ‌های سوراخ‌دار و تأثیر تزریق جریان با فشارهای نسبی در محدوده ۰/۲۵ تا ۴ بار بر فشار و نیروی مکش دستگاه آزمایش شده است. در این آزمایش‌ها عملکرد دستگاه دوبعدی و تقارن محوری بر روی یک‌لایه کاغذ به‌عنوان جسم نرم و متخلخل مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای اطمینان از اطلاعات استخراج‌شده، آزمایش‌ها در دو مرحله صورت گرفته و در هر مرحله فشار و نیروی مکش گیرنده اندازه‌گیری و نمودارهای مربوطه ترسیم شده است. پس از داده‌برداری از فشارهای ورودی و فشار مکش، برای محاسبه میزان دبی تزریق شده از رابطه (۱) استفاده شده است. [۲۰].

(۱)

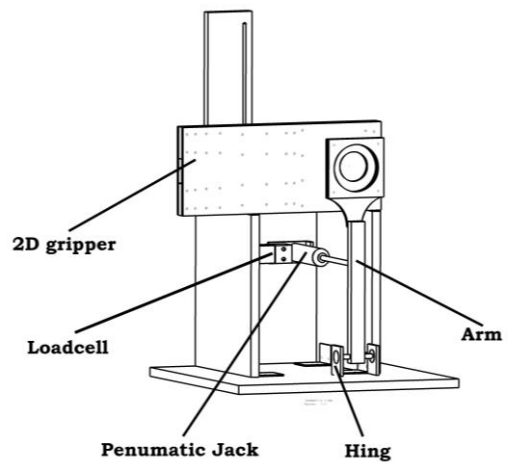
در رابطه (۱)،  $\square$  دبی جرمی،  $P_0$  فشار مطلق ورودی،  $A^*$  مجموع مساحت سوراخ‌های رینگ،  $T_0$  دمای سکون هوا،  $\gamma$  ضریب اتمیسیته هوا برابر با ۱/۴ و  $R$  ثابت گاز هوای اتمسفر برابر با ۲۸۷ (J/kg.k) تعریف می‌شود.

### بررسی اثر فشار ورودی بر عملکرد نگهدارنده تقارن محوری

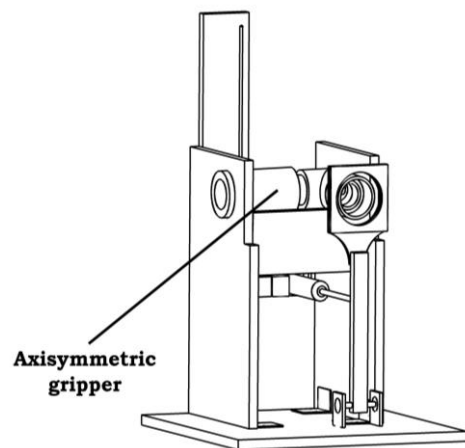
در مرحله اول در شکل ۱۱ و ۱۲، نمودار تکرارپذیری نتایج به‌دست‌آمده نگهدارنده تقارن محوری نشان داده شده است. این نمودارها به ترتیب تأثیر افزایش فشار ورودی بر فشار و نیروی مکش نگهدارنده با رینگ به قطر سوراخ‌های  $\square$  میلی‌متر را نشان می‌دهد. همچنین میزان خطای اندازه‌گیری فشار و نیرو نیز که در برگزیده کلیه خطاهای موجود، شامل خطای سنسور ها و کارت داده برداری می باشد در این دو نمودار نشان داده شده است. خطاهای موجود در ارتباط با فشار و نیرو به ترتیب برابر با ۳۰۰ (pa) و ۱۳/۵ (grforce) می باشد. به نظر



شکل ۸ - شماره شماتیک پایه نگهدارنده چندمنظوره آزمایشگاهی

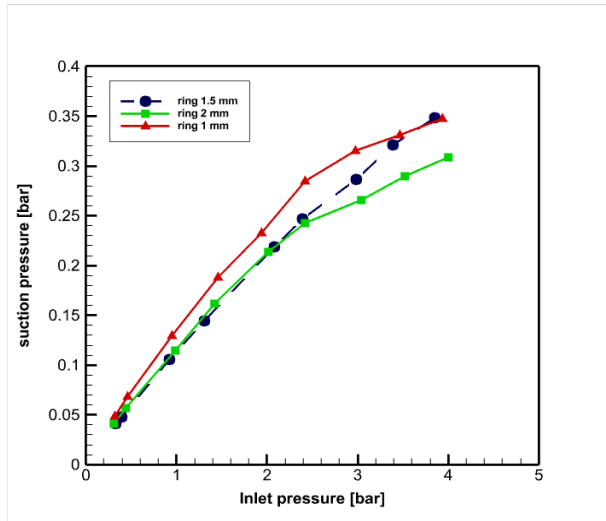


شکل ۹ - پایه نگهدارنده چندمنظوره آزمایشگاهی



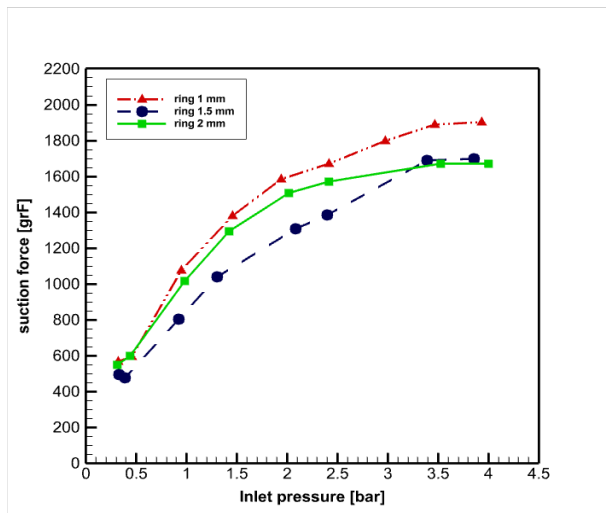
شکل ۱۰ - مجموعه بازو و مفصل و محل قرار دادن اجسام جهت انجام آزمایش

چندانی ملاحظه نمی‌شود. همچنین روند تغییرات در فشارهای پایین‌تر از ۲/۵ بار برای رینگ‌های سوراخ‌دار با قطر سوراخ‌های ۱/۵ و ۲ میلی‌متر بسیار ناچیز است اما در فشارهای بالاتر، تغییرات محسوس است.



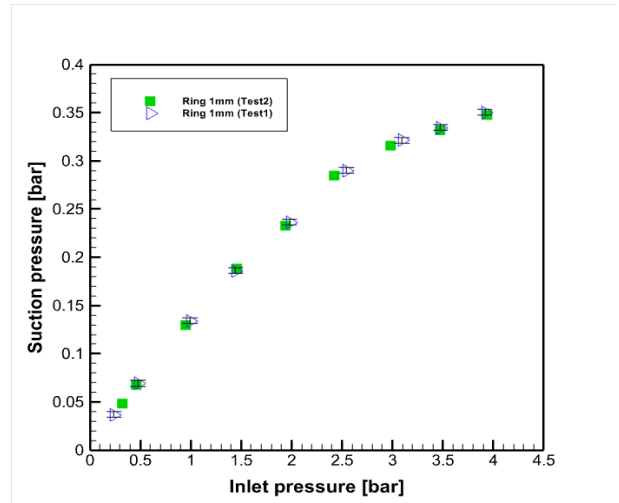
شکل ۱۳ - نمودار تغییرات فشار مکش برحسب فشار ورودی برای رینگ‌ها با قطر سوراخ‌های مختلف

در شکل ۱۴، عملکرد نیروی مکش برحسب فشار ورودی برای نگه‌دارنده‌ی تقارن محوری با رینگ‌هایی به قطر سوراخ‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار ورودی، نیروی مکش لازم برای جدایش جسم متخلخل افزایش می‌یابد و این روند برای هر سه رینگ یکسان است.

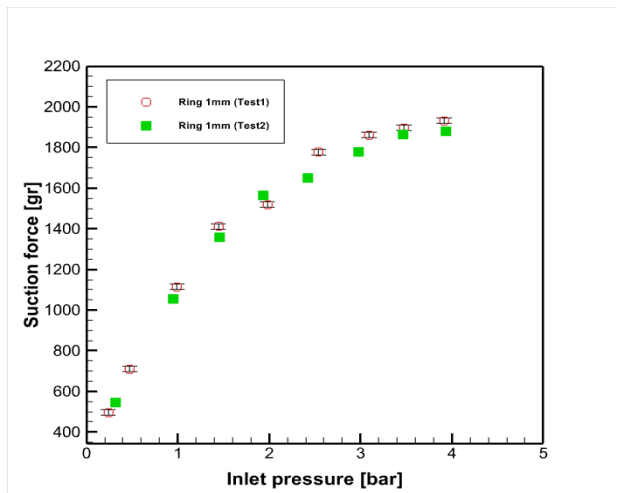


شکل ۱۴ - نمودار تغییرات نیروی مکش برحسب فشار ورودی برای رینگ‌ها با قطر سوراخ‌های مختلف

می‌رسد با در نظر گرفتن باند خطای فشار و نیرو نتایج حاصل از تکرار پذیری مناسبی برخوردار است.



شکل ۱۱ - نمودار تکرارپذیری تغییرات فشار مکش برحسب فشار ورودی برای رینگ به قطر سوراخ ۱ میلی‌متر



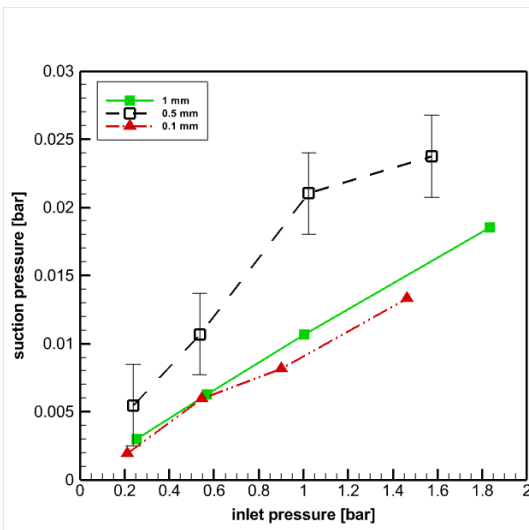
شکل ۱۲ - نمودار تکرارپذیری تغییرات نیروی مکش برحسب فشار جریان ورودی برای رینگ به قطر سوراخ ۱ میلی‌متر

در شکل ۱۳، عملکرد فشار مکش برحسب فشار ورودی برای نگه‌دارنده‌ی تقارن محوری با رینگ‌های سوراخ‌دار با سوراخ‌هایی به قطر ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر نشان داده شده است. نمودار شکل نشان می‌دهد که میزان مکش این نوع نگهدارنده با افزایش فشار ورودی افزایش یافته و روند تغییرات فشار مکش برحسب فشار ورودی خطی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در فشارهای ورودی پایین، تأثیر رینگ‌های سوراخ‌دار با قطر سوراخ‌های مختلف نامحسوس بوده و اختلاف فشار مکش



### بررسی اثر فشار ورودی بر عملکرد نگهدارنده دوبعدی

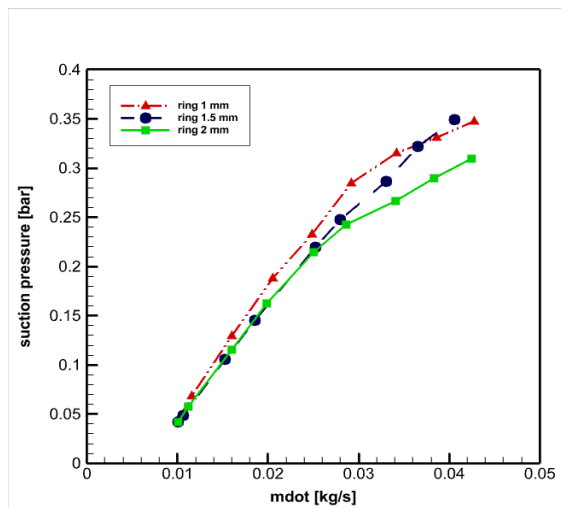
در ادامه به بررسی نتایج حاصل از نگهدارنده دوبعدی پنوماتیک از نوع تماسی پرداخته شده است. نمودار شکل ۱۷ نشان می‌دهد که با افزایش فشار جریان ورودی، فشار مکش دستگاه نیز افزایش می‌یابد و روند تغییرات به صورت کلی خطی است. همچنین نتایج حاکی از آن است که اختلاف فشار مکش چندانی میان صفحات شکاف دار با ضخامت شکاف ۰/۱ و ۱ میلی‌متر بخصوص در فشارهای پایین وجود ندارد و فشار مکش نگهدارنده دوبعدی در این دو حالت به یکدیگر نزدیک است. اما برای صفحات شکاف دار با ضخامت شکاف ۰/۵ میلی‌متر تغییرات چشمگیری مشاهده می‌شود، به طوری که نگهدارنده دوبعدی در این حالت در فشارهای ورودی ۱ تا ۱/۶ بار به بیشترین میزان مکش خود رسیده است. همچنین در شرایطی که فشار تزریق به ۱/۵ بار برسد، فشار نسبی خلأ مکش تا ۰/۰۲۴ بار کاهش می‌یابد.



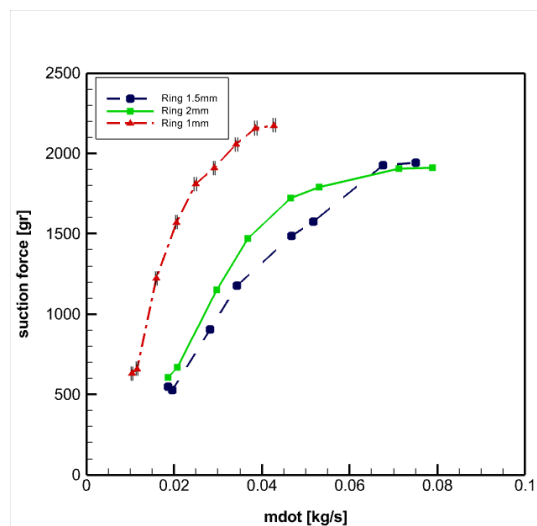
شکل ۱۷ - نمودار تغییرات فشار مکش برحسب فشار ورودی برای صفحه‌های شکافدار با ضخامت شکاف‌های مختلف

در شکل ۱۸، عملکرد نیروی مکش برحسب فشار ورودی برای نگهدارنده‌ی دوبعدی با صفحات شکاف دار با ضخامت شکاف‌های مختلف نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که هرچه فشار ورودی افزایش یابد، نیروی مکش نیز افزایش پیدا می‌کند و روند تغییرات همانند شکل قبل، خطی است. همچنین نگهدارنده دوبعدی با صفحات شکاف دار با ضخامت شکاف ۰/۱ و ۱ میلی‌متر در فشارهای ورودی پایین‌تر

شکل ۱۵ و ۱۶، به ترتیب عملکرد فشارمکش و نیروی مکش را برحسب دبی مصرفی برای نگهدارنده‌ی تقارن محوری با رینگ‌هایی به قطر سوراخ‌های مختلف نشان می‌دهند. دقت اندازه‌گیری دبی جرمی مصرفی نگهدارنده تقارن محوری که معادل با ۰/۲۲ (gI/s) می‌باشد، در نمودار شکل ۱۶ نشان داده شده است. روند این نمودار همانند روند تغییرات فشار و نیروی مکش در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ می‌باشد. به نظر می‌رسد به ازای میزان مکش بیشتر ۰/۲۵ بار نگهدارنده با سوراخ‌های رینگ ۲ میلی‌متر از میزان مصرف دبی پایین‌تری برخوردار است.



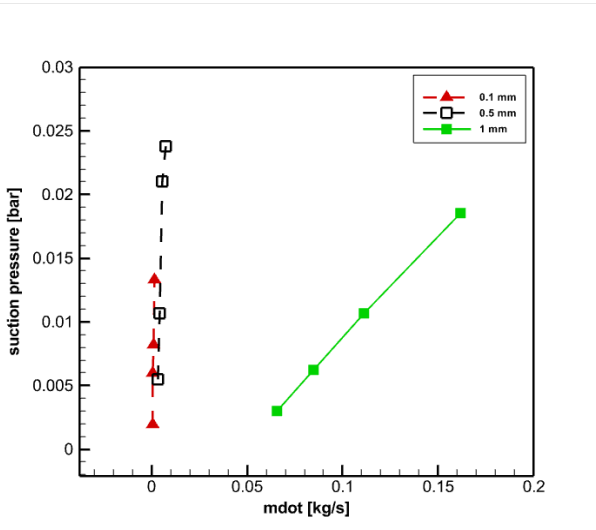
شکل ۱۵ - نمودار تغییرات فشار مکش برحسب دبی ورودی برای رینگ‌ها با قطر سوراخ‌های مختلف



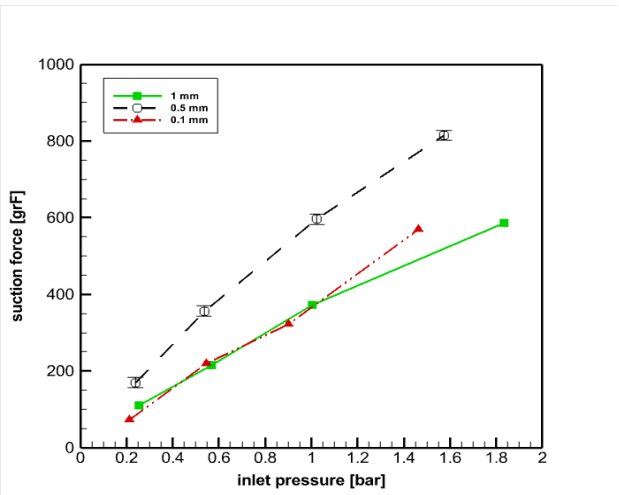
شکل ۱۶ - نمودار تغییرات نیروی مکش برحسب دبی ورودی برای رینگ‌ها با قطر سوراخ‌های مختلف



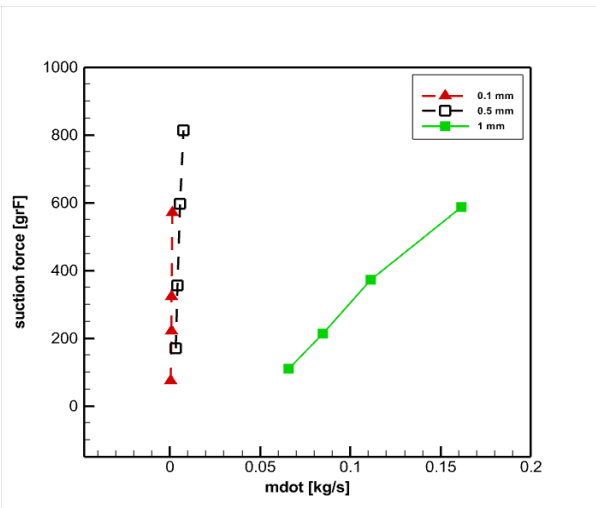
از ۱ بار، عملکرد یکسانی دارند اما در فشارهای بالاتر، افزایش نیروی مکش نگهدارنده با صفحات شکاف دار با ضخامت شکاف ۰/۱ میلی‌متر ملاحظه می‌شود. برای صفحات شکاف دار با ضخامت شکاف ۰/۵ میلی‌متر بازهم اختلاف نیروی مکش به نسبت ضخامت‌های دیگر چشمگیر است و در این حالت با تزریق جریان ورودی با فشار ۱/۵ بار نیروی مکش نگهدارنده به ۸۰۰ گرم خواهد رسید.



شکل ۱۹ - نمودار تغییرات فشار مکش برحسب دبی ورودی برای صفحه‌های شکاف دار با ضخامت شکاف‌های مختلف



شکل ۱۸ - نمودار تغییرات نیروی مکش برحسب فشار ورودی برای صفحه‌های شکافدار با ضخامت شکاف‌های مختلف



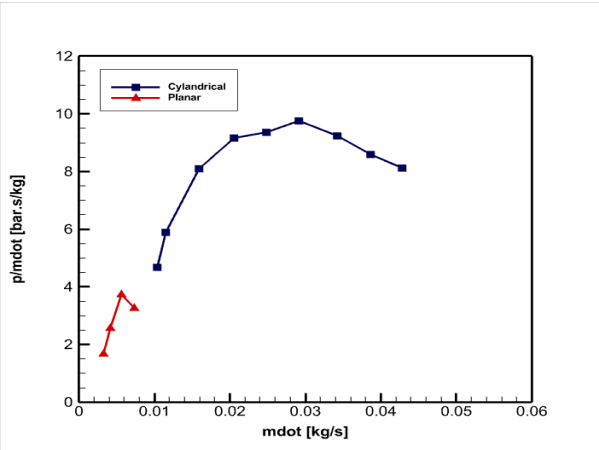
شکل ۲۰ - نمودار تغییرات نیروی مکش برحسب دبی ورودی برای صفحه‌های شکاف دار با ضخامت شکاف‌های مختلف

### مقایسه نگهدارنده دوبعدی و تقارن محوری

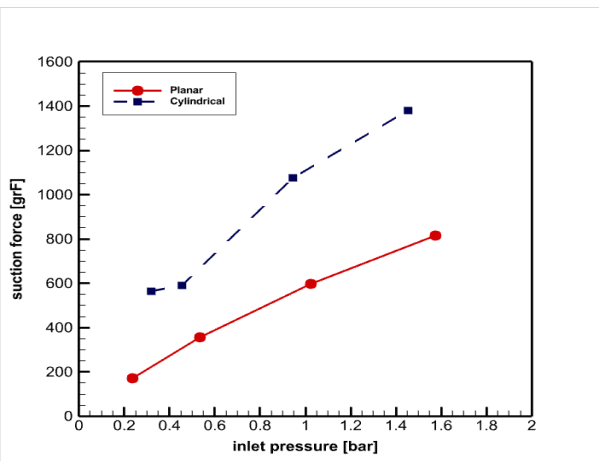
بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی گیرنده‌های دوبعدی و تقارن محوری ساخته‌شده، نشان می‌دهند که نگهدارنده دوبعدی با صفحه‌های شکافدار با ضخامت شکاف‌های ۰/۵ میلی‌متر و نگهدارنده تقارن محوری با رینگ سوراخدار با قطر سوراخ‌های ۱ میلی‌متر، بهینه‌ترین عملکرد را در بین حالت‌های دیگر دارند. لذا در ادامه به مقایسه این نگهدارنده در بهترین شرایط عملکردی آن‌ها پرداخته شده است.

در شکل ۱۹ عملکرد فشار مکش برحسب دبی مصرفی برای نگهدارنده دوبعدی با صفحات شکاف دار با ضخامت شکاف‌های مختلف نشان داده شده است. دقت اندازه‌گیری دبی جرمی مصرفی این نوع نگهدارنده برای صفحه‌های شکافدار با ضخامت های ۰/۱ و ۰/۵ و ۱ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۰۷۵۸ و ۰/۱۵ (gr/s) می‌باشد. با توجه به شکل با افزایش فشار، میزان دبی مصرفی نیز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح مقطع شکاف، دبی مصرفی افزایش می‌یابد اما تأثیر زیادی در افزایش میزان فشار مکش ندارد.

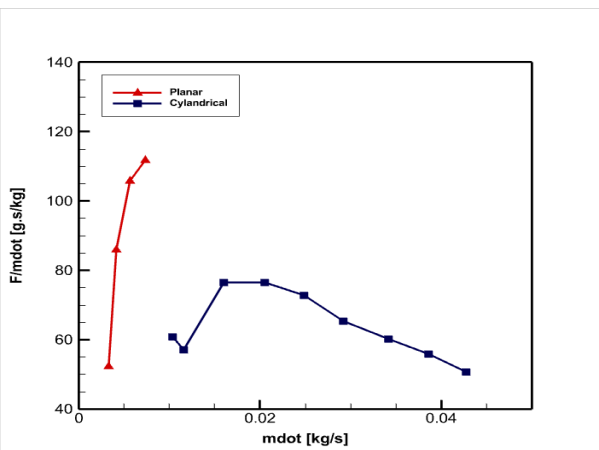
در شکل ۲۰ عملکرد نیروی مکش برحسب دبی مصرفی برای نگهدارنده دوبعدی با صفحات شکافدار با ضخامت شکاف‌های مختلف نشان داده شده است. داده‌های استخراج شده حاکی از آن است که روند تغییرات نیروی مکش برحسب دبی مصرفی همانند روند تغییرات فشار مکش بوده و با افزایش نیروی مکش میزان دبی مصرفی افزایش می‌یابد.



شکل ۲۲ - نمودار تغییرات فشار مکش بر واحد دبی جرمی مصرفی ورودی بر حسب دبی ورودی برای نگهدارنده ی دوبعدی و تقارن محوری

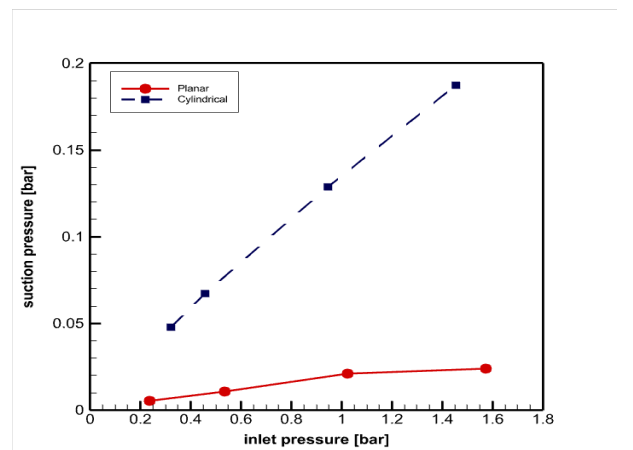


شکل ۲۳ - نمودار تغییرات نیروی مکش بر حسب فشار ورودی برای نگهدارنده ی دوبعدی و تقارن محوری



شکل ۲۴ - نمودار تغییرات نیروی مکش بر واحد دبی جرمی مصرفی ورودی بر حسب دبی ورودی برای نگهدارنده ی دوبعدی و تقارن محوری

شکل ۲۱، نمودار تغییرات فشار مکش بر حسب فشار ورودی برای حالت بهینه ی نگهدارنده ی دوبعدی و تقارن محوری در بازه فشار های ورودی ۰/۲ تا ۱/۶ بار را نشان می دهد. همچنین در شکل ۲۲، نمودار تغییرات فشار مکش بر واحد دبی جرمی مصرفی ورودی در هر دو نگهدارنده نشان داده شده است. مقایسه این نمودار ها نشان می دهد که نگهدارنده تقارن محوری صرف نظر از میزان دبی مصرفی از نظر میزان فشار مکش نسبت به نگهدارنده دو بعدی از عملکرد بهتری برخوردار است و میزان فشار مکش این نگهدارنده در بیشینه فشار ورودی آزمایش شده تا ۰/۱۹ بار نیز کاهش یافته است. در حالی که فشار مکش نگهدارنده دوبعدی در همین شرایط، ۰/۲۲ بار می باشد. با این وجود، نتایج شکل ۲۲ نشان می دهد که عملکرد مذکور در نتیجه استفاده از دبی جرمی بالایی است و به نظر می رسد با توجه به میزان دبی مصرفی نگهدارنده دوبعدی میزان فشار مکش آن از مقدار مناسبی برخوردار است. این موضوع در نمودار های شکل های ۲۳ و ۲۴ که به ترتیب تغییرات نیروی مکش بر حسب فشار ورودی و نیروی مکش بر واحد دبی جرمی مصرفی بر حسب دبی جرمی نشان داده شده است، به صورت واضح تری مشخص می باشد. همانطور که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، میزان نیروی مکش وارد شده بر جسم متخلخل در نگهدارنده تقارن محوری بیشتر می باشد، در حالی که عملکرد نگهدارنده دوبعدی در تولید نیروی مکش با در نظر گرفتن میزان دبی جرمی مصرفی، به مراتب بهتر می باشد.



شکل ۲۱ - نمودار تغییرات فشار مکش بر حسب فشار ورودی برای نگهدارنده ی دوبعدی و تقارن محوری

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد دو نگهدارنده پنوماتیک تماسی جدید بر اساس اجکتور دوگلوگاهه، یکی از نوع دوبعدی و دیگری از نوع تقارن محوری برای اجسام نرم و متخلخل به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. آزمایش‌های صورت گرفته بر روی گیرنده دوبعدی، اثر افزایش فشار جریان ورودی و تأثیر ضخامت شکاف صفحه‌های مختلف را بر میزان فشار و نیروی مکش دستگاه مورد ارزیابی قرار داده است. همچنین در آزمایش‌های نمونه تقارن محوری، اثر رینگ‌های سوراخ‌دار با قطر سوراخ‌های مختلف و تأثیر تزریق جریان پرفشار ورودی بر فشار و نیروی مکش نگهدارنده اندازه‌گیری شده است. در ادامه نتایج مطالعات بر روی حالت بهینه نگهدارنده دوبعدی و تقارن محوری با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که:

- با افزایش فشار ورودی در هر دو نگهدارنده، فشار و نیروی مکش دستگاه افزایش می‌یابد و روند تغییرات آن‌ها خطی است.
- افزایش ضخامت شکاف صفحه‌ها در نمونه‌ی دوبعدی نه تنها منجر به افزایش دبی مصرفی می‌گردد، بلکه کاهش نیروی مکش تولیدی دستگاه را نیز به همراه خواهد داشت و عملکرد دستگاه را کاهش می‌دهد.
- اختلاف فشار و نیروی مکش تولیدی نگهدارنده دوبعدی با صفحه‌های شکافدار به ضخامت ۰/۱ و ۱ میلی‌متر، نامحسوس بوده و رفتار این صفحه‌ها بسیار به هم نزدیک است.
- به طور کلی نگهدارنده‌ی دوبعدی با ضخامت شکاف ۰/۵ میلی‌متر نسبت به ضخامت شکاف‌های دیگر، عملکرد مطلوب‌تری در تولید فشارمکش، نیروی مکش و دبی مصرفی دارد و بهینه‌ترین حالت را به خود اختصاص داده است.
- تأثیر رینگ‌های سوراخ‌دار با قطر سوراخ‌های مختلف در نگهدارنده تقارن محوری در فشارهای ورودی پایین، نامحسوس است.
- جمع‌بندی داده‌های استخراج‌شده از نمونه‌ی تقارن محوری بیان می‌کند که رینگ با قطر سوراخ‌های ۱ میلی‌متر بهینه‌ترین عملکرد را دارد.

- مقایسه‌ی نمودارهای عملکردی حالت بهینه نگهدارنده دوبعدی و تقارن محوری نشان می‌دهد که در یک فشار ورودی ثابت، میزان نیروی مکش نگهدارنده تقارن محوری تقریباً ۲ برابر نمونه‌ی دوبعدی آن است.

## مراجع

- [۱] Dini, G., Fantoni, G., & Failli, F., "Grasping leather plies by Bernoulli grippers," *CIRP Annals*, vol. 58, no. 1, pp. 21-24, 2009/01/01/2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.076>.
- [۲] Davis, S., Gray, J. O., & Caldwell, D. G., "An end effector based on the Bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 24, no. 2, pp. 249-257, 2008/04/01/2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2006.11.002>.
- [۳] Basu, S., & Debnath, A. K., "Chapter 2 - Main Equipment," in *Power Plant Instrumentation and Control Handbook (Second Edition)*, S. Basu and A. K. Debnath Eds. Boston: Academic Press, pp. 41-147, 2019.
- [۴] Zhao, et al., "Flue gas fine treatment by ejecting technology," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, p. 095440621881339, 11/25, doi: 10.1177/0954406218813395, 2018
- [۵] Breeze, P., "Chapter 4-Water-Cooled Reactors," in *Nuclear Power*, P. Breeze Ed.: Academic Press, pp. 33-44, 2017.
- [۶] Giddings, D., Azzopardi, B. J., Aroussi, A., & Pickering, S. J., "Optical investigation of a long throated Venturi conveying inert spherical particulate with size range similar to pulverised coal" *Powder Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 370-377, 2011/02/15/2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.11.021>.
- [۷] Pellegrini, M., & Sacconi, C. "Laboratory and field tests on photo-electric probes and ultrasonic Doppler flow switch for remote control of turbidity and flowrate of a water-sand mixture flow", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 882, p. 012008,

- <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.03.024>.
- [<sup>۱۵</sup>] Kumar, B., "Vacuum Gripper- An Important material handling tool," *International Journal of Science & Technology*, vol. 7, pp. 1-8, 02/01, 2017.
- [<sup>۱۶</sup>] Savkiv, V., Mykhailyshyn, R., Duchoň, F., & Mikhalishin, M. "Modeling of Bernoulli gripping device orientation when manipulating objects along the arc," *international journal of advanced robotic Systems*, vol. 15, p. 172988141876267, 03/01 2018, doi: 10.1177/1729881418762670.
- [<sup>۱۷</sup>] Cubric, G. "Vacuum Picking of nonwoven material," *current trends in fashion technology & textile engineering*, vol. 3, 02/19 2018", doi: 10.19080/CTFTTE., 3555604, 2018.
- [<sup>۱۸</sup>] Tashtoush, B. M. M., Al-Nimr, D. A., & Khasawneh, M. A., "A comprehensive review of ejector design, performance, and applications", *Applied Energy*, vol. 240, pp. 138-172, 2019/04/15/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.0.1.185>, 2018.
- [<sup>۱۹</sup>] Liu H., Li, Q., Ma, & Feng, W. "Development non-contact gripper with flowrate-amplification using Coanda ejector", *Vacuum*, vol. 187, p. 110108, 02/01. 2021, doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110108.
- [<sup>۲۰</sup>] Crabtree, L. F., "Fundamentals of Aerodynamics - second edition. J.D. Anderson. McGraw-Hill Book Company, Shoppenhangers Road, Maidenhead, Berks SL6 2QL. 1991. 772 pp. Illustrated. £30.95", *The Aeronautical Journal (1968)*, vol. 95, no. 946, pp. 214-214, 1991, doi: 10.1017/S0001924000023939.
- 2017/08 2017, doi: 10.1088/1742-6596/882/1/012008.
- [<sup>۸</sup>] Galanis, N., & Sorin, M., "Ejector design and performance prediction", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 104, pp. 315-329, 2016/06/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.12.022>.
- [<sup>۹</sup>] Wu, F., & Li, Z., "Optimisation analysis of structural parameters of an annular slot ejector based on the coanda Effect," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, pp. 1-11, 08/11 2020, doi: 10.1155/2020/8951353.
- [<sup>۱۰</sup>] Xu, J., Liu, X., & Pang, M., "Numerical and experimental studies on transport properties of powder ejector based on double venturi effect," *Vacuum*, vol. 134, pp. 92-98, 2016/12, ۲۰۱۶ / ۰۱ /doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.10.007>.
- [<sup>۱۱</sup>] Lien, T. K., & P. G. G., "A novel gripper for limp materials based on lateral Coanda ejectors," *CIRP Annals*, vol. 57, no. 1, pp. 33-36, 2008/01/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.119>.
- [<sup>۱۲</sup>] Stühm, K., Tornow A., Schmitt, J., & Grunau, F., Dietrich, & Dröder, K., *A Novel gripper for battery electrodes based on the bernoulli-principle with Integrated Exhaust Air Compensation*. 2014.
- [<sup>۱۳</sup>] Zhao, J., & Li, X., "Effect of supply flow rate on performance of pneumatic non-contact gripper using vortex flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 79, pp. 91-100, 2016/12/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.020>.
- [<sup>۱۴</sup>] Shi, K., & Li, X., "Optimization of outer diameter of ernoulli gripper", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 77, pp. 284-294, 2016/10/01/ 2016, doi: