

## طراحی گیره‌ی رباتیک تغییر شکل پذیر با مواد دانه‌های ریز\*

مهدی بامداد<sup>(۱)</sup>آرمان مردانی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در این پژوهش نوع جدیدی از گیره طراحی شده است که دقیقاً منطبق با شکل جسم عمل می‌کند. این گیره‌ی یونیورسال برای مواردی پیشنهاد می‌شود که انطباق با دست انسان لازم باشد و یا زمانی که لازم است اجسام گوناگون با سهولت، مطمئن، سریع و بدون هیچ بازخوردی گرفته شوند. با افزودن یک بالن حلقوی دور محفظه‌ی مواد دانه‌ریز، نیروی جانبی بالن اصلی را می‌فشارد و اصطکاک بین محفظه و بار را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش‌ها در این مقاله، اصلاحات مکانیزم گیره‌ی جدید، مؤثر واقع شد؛ و میزان موفقیت گیره با توجه به پارامترهای تأثیرگذار رابطه‌سازی شده است. این رابطه سازی کامل می‌تواند تخمین مناسبی برای طراحی گیره‌ی موفق ارائه کند.

**واژه‌های کلیدی** گیره‌ی رباتیک، مواد دانه‌ریز، نیروی جانبی.

## Design a Shape-Shifting Robot Gripper with Granular Material

M. Bamdad

A. Mardany

**Abstract** In this paper, a new kind of gripper is designed which passively conforms to the shape of an object. This universal gripper is proposed when some of the adaptability of a human hand is needed or situations where very different objects need to be gripped easily, reliably within rapid succession without any feedback. By adding an annular balloon around the granular bag, a lateral force pushes the main membrane and increases the friction force between the bag and the load. According to the acquired test results reported in this paper, the modification on this new robotic gripping mechanism is effective and the successful gripping is formulated. This new complete formulation can provide a good estimation for a successful gripper design.

**Key Words** Robotic gripper, Granular material, Lateral force.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۵/۲۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول: استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

## مقدمه

بستگی به پارامتر صافی سطح و ضعف ساختار گیره در نقطه‌ی تماس دارد.

گیره‌ی فلزی لولایی معمولاً برای کاربردهای خاص مانند برداشتن و حمل اشیا با شکل‌های مشخص و محدود ساخته می‌شود؛ به طوری که به ندرت میزان انعطاف‌پذیری لازم برای انجام حرکات نرم‌تر را دارد. اگر چه با هدف ارتقای توان برداشت، پیچیدگی مکانیزم گیره افزایش یافته است [2] اما هم‌چنان گستره‌ی وسیعی از اجسام را نمی‌تواند حمل کند.

در کنار گیره‌هایی با مکانیزم کاملاً مقید، نمونه‌های نیمه‌مقید نظیر گیره‌ی انگشتی، با هدف انعطاف‌پذیری بیش‌تر طراحی شده است [3]. انعطاف‌پذیری به‌رغم کاهش صلبیت، موجب می‌شود گیره انواع گسترده‌تری از هندسه‌ها را با موفقیت حمل کند. این قابلیت گیره‌ها، در سیستم‌های اتوماسیون صنعتی و طراحی برای مونتاژ، فرآیند تولید را سریع‌تر و آسان‌تر می‌کند. با اضافه کردن حسگر نیرو می‌توان به بهبود عملکرد ربات کمک کرد [4, 5]. انگشتان پلیمری به‌همراه سنسورهای لامسه‌ای، هوشمندی گیره‌های انگشتی را ارتقا داده‌اند. به عبارت دیگر، این نوع گیره با توجه به نرمی جسم، نیروی گیرش متناسبی وارد می‌کند [6]. پنجه‌های سه و پنج انگشتی معمولاً برای پروتز دست انسان به‌کار می‌روند و در کاربردهای صنعتی گیره‌ی دو انگشتی متداول است [7].

در راستای بهبود طراحی انگشت‌های مار مانند، مکانیزم چندمیله‌ای با توزیع فشار یکنواخت طراحی شده است که هنگام گرفتن اجسام، با انعطاف بیش‌تری عمل می‌کند. حرکت گیره‌ی رباتیک می‌تواند با استفاده از کابل‌های محرک ایجاد شود [8]. کابل‌های مشترک که توسط چرخک‌های راهنما روی میله‌بندی هدایت می‌شوند، مانند تاندون‌های انگشت انسان عمل می‌کنند. کابل می‌تواند به‌عنوان یک جزو الاستیک، حرکتی هموار را برای گیره فراهم آورد [9]. عموماً گیره‌های انعطاف‌پذیر علی‌رغم هزینه‌های زیاد، نیروی محدودی

برای گرفتن و نگه داشتن اجسام، طوری که تماس مستقیم با دست انسان نداشته باشد، گیره‌هایی با شکل‌های متفاوت طراحی و ساخته شده است. در حوزه‌ی رباتیک، با توجه به رشد روز افزون این دانش، نیاز به ربات‌هایی با کاربردهای خاص بیش از پیش احساس می‌شود. گیره‌ها در بازوان رباتیک برای گرفتن و نگه داشتن اجسام در یک موقعیت مشخص طراحی می‌شود و می‌تواند دامنه‌ی وسیعی از کاربردها را برای ربات‌ها فراهم سازد. گیره، بین مچ و جسم قرار می‌گیرد و از آنجایی که اجسام می‌توانند در اندازه، شکل و جرم متفاوت باشند، عموماً یک ربات احتیاج به سیستمی برای تعویض گیره‌ها دارد.

گیره‌های رباتیک در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند. در گیره‌های ضربه‌ای، نیروی مستقیم مکانیکی، در دو جهت یا بیش‌تر برای گرفتن جسم به‌کار گرفته می‌شود. در گیره‌های داخل‌شونده عمل گرفتن از طریق نفوذ در سطح جسمی که بایستی گرفته شود، صورت می‌گیرد. در گیره‌های انقباضی نیروهای دربرگیرنده‌ی جسم در یک جهت در بازه‌ی زمانی کوتاه اعمال می‌شود. در گیره‌ی غیرضربه‌ای نیروی نگه‌دارنده به سبب تماس مستقیم، بر اساس فرآیندهای حرارتی و شیمیایی خاص نظیر کشش سطحی در ابعاد میکرو ایجاد می‌شود [1].

گیره‌هایی با ساختار کامل اهرمی و میله‌بندی می‌توانند جزو گروه گیره‌های ضربه‌ای و داخل‌شونده محسوب گردند. طراحی این نوع گیره‌ها آسان و هزینه‌های ساخت آن‌ها نسبتاً کم است اما مهارت عملکرد در این گیره‌ها زیاد نیست. حفظ دقت نگه‌دارندگی و گرفتن، برای قطعاتی با هندسه‌ی پیچیده، نیازمند یافتن نقاط نگه‌دارنده‌ی مناسب است. تعیین مرکز گرانش برای قطعاتی با اشکال غیریکنواخت یا ترکیب ناهمگون با چگالی‌های مختلف، دشوار است. به‌علاوه، موفقیت فرآیند گرفتن

نیروی جانبی توسط یک بالن اضافی حلقه‌مانند در ترکیب با بالن اصلی است؛ که در مدل‌های موجود مشاهده نشده است. با به‌کارگیری مدل ارتقایافته‌ی گیره‌ی بالنی، می‌توان به موفقیت آن‌ها در حوزه‌ی رباتیک امیدوارتر بود.

مطالعه‌ی کارهای گذشته امکان طراحی اولیه‌ی پیش از ساخت را فراهم نمی‌کند. در این‌جا لزوم تدوین یک رابطه که موفقیت و یا عدم امکان برداشتن را پیش‌بینی کند، احساس می‌شود. در این مقاله، بر اساس نتایج نمونه‌ی ساخته شده، نقش پارامترهای اساسی در درصد موفقیت، در قالب یک رابطه‌ی نهایی بازگو شده است و گام جدیدی در روند طراحی گیره‌های بالنی رباتیک محسوب می‌گردد.

### مدل‌سازی گیره‌ی رباتیک پیشنهادی

در این پژوهش، بر اضافه نمودن یک نیروی جانبی برای افزایش نیروی اصطکاک تمرکز شده است. در شکل (۱) طرح کامل گیره، نشان داده شده است.



شکل ۱ طرح سه‌بعدی گیره‌ی رباتیک

- ۱- اتصال بدنه به بازوی مکانیکی، ۲- بالن اصلی
- ۳- بالن حلقه‌ای، ۴- لوله‌های مکش هوا
- ۵- بدنه‌ی نگاه دارنده‌ی بالن حلقه‌ای

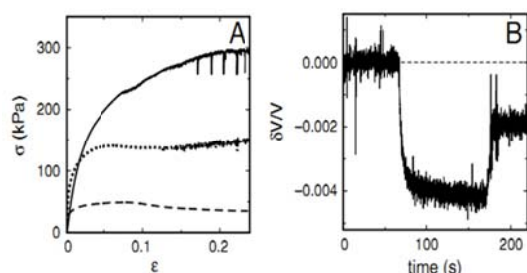
ایجاد می‌کنند و اغلب حرکت آهسته‌ای دارند. به‌علاوه شامل بخش‌های متحرک زیاد با درجات آزادی اضافی هستند. پیشنهاد افزودن بالن‌های الاستیک به‌منظور حل چنین مشکلاتی مطرح شده است. پژوهشگرانی هم‌چون پرووسکی [8] و اشمیت [9] در این زمینه پیشگام بوده‌اند.

شرایط فیزیکی گیره‌ی رباتیکی از دیدگاه تحلیل اجزا قابل توجه است. روابط برای ناحیه‌ی خلأ، مستقل از اصطکاک در انقباض پیرامونی اجسام کروی نوشته شده است [12]. هم‌چنین، توزیع نیرویی و میزان تنش‌های برشی در مواد دانه‌ریز بررسی شده است. نیروهای تماسی در لحظه‌ی شروع انقباض موجب یکپارچگی ماده‌ی دانه‌ریز می‌شود [13]. به‌طوری که در وضعیت آزاد هیچ تنش و ضریب کشسانی در نظر گرفته نمی‌شود [14]. یکی از مشکلات این سیستم‌ها تأثیر محکم شدن کیسه در میانه‌ی فرآیند مکش، بر روی قالب‌گیری کامل بالن حول نمونه است [15]. این رفتار اجازه‌ی شکل‌گیری کامل را به کیسه نمی‌دهد و تأثیرات منفی بر رفتار مکانیکی و عملکرد سیستم می‌گذارد [16].

با هدف سنجش موفقیت این نوع گیره‌ها و میزان توانایی آن در حالتی که فشار رهاکننده‌ی سریع موجود باشد، بررسی‌ها و تست‌هایی انجام شده است [17]. این خلأ، ناشی از وجود یک ناحیه‌ی تهی از هوا، در پشت جسم است که توان گیرش را افزایش می‌دهد. به‌همین دلیل است که میزان تأثیر فشار منفی در توان گیرش و حمل اجسام، از اهمیت بسزایی برخوردار است [18].

در این مقاله گیره‌ی رباتیک با هدف ایجاد انعطاف‌پذیری بالا، بر اساس نحوه‌ی قرارگیری و چسبندگی دانه‌های ریز طراحی شده است. برای بهبود عملکرد گیره، حلقه‌ای با قابلیت انبساط به آن اضافه شده است. به این ترتیب، نیروی جانبی بیشتری به جسم اعمال می‌گردد. یکی از نوآوری‌های مقاله، اعمال

شدن، بسته شدن راه خروج هوای مابین جسم و بالن در حین فرآیند مکش، قبل از خروج تمامی هوا است. به طور کلی اگر سطح جسم اندکی ناصاف و زبر باشد، به گونه‌ای که بتواند هوا را از میان شیارهای سطحی خود عبور دهد، خلأ کامل ایجاد نشده و نیروی مکشی به وجود نمی‌آید. به همین دلیل در این مقاله افزایش نیروی اصطکاک ناشی از افزایش نیروی جانبی پیشنهاد می‌گردد. اضافه کردن بالن جانبی حلقه‌شکل به برداشت اجسام کمک می‌کند. بنا به طراحی صورت گرفته برای بالن حلقوی، از جایی که امکان افزایش حجم به خارج به دلیل بدنه‌ی نگهدارنده وجود ندارد تمام افزایش حجم موجب فشردن بالن دور جسم می‌شود. این کاهش حجم در مرجع [18] ناشی از خود گیره است و مطابق شکل (۳) گزارش شده است.



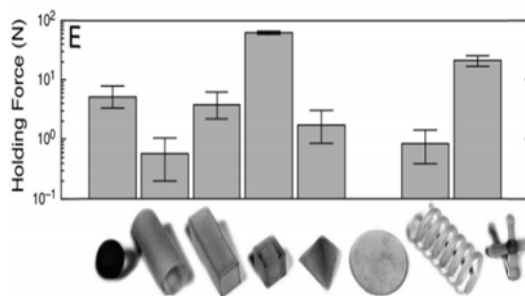
شکل ۳ تغییرات حجم و تنش ناشی از تغییرات فشار داخل بالن [18]

نتایج نشان می‌دهد که میزان تغییرات حجم کم است و نیروی جانبی اندکی از طرف خود بالن اعمال می‌گردد. به همین دلیل اضافه کردن یک بالن جانبی برای ایجاد یک نیروی جانبی می‌تواند اثربخش باشد. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، بالن جانبی هم‌چون دست یک بازیکن هندبال نیروی جانبی را برای حفظ جسم اعمال می‌کند. این کار نیاز به ایجاد خلأ میان بالن و جسم را برای تضمین موفقیت عملیات کاهش می‌دهد.

این گیره از دو بالن کروی و حلقوی شکل ساخته شده که به ترتیب به یک موتور مکش هوا و یک موتور پمپ هوا مجهز شده است. قسمت دوم شکل (۱)، بالن حاوی ماده‌ی دانه‌ریز را نشان می‌دهد. قسمت سوم، بالن حلقه‌ای است که با ورود هوا افزایش حجم پیدا می‌کند و دور بالن اصلی را می‌فشارد و هم‌زمان نیروی جانبی اعمال می‌کند.

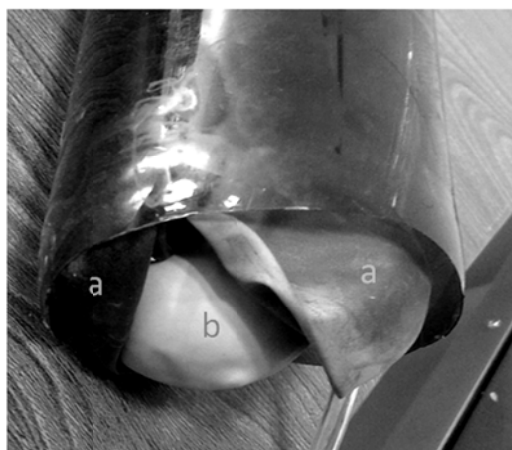
### عملکرد گیره‌ی بالنی طراحی شده

گیره‌های انقباضی توانایی حمل انواع گوناگونی از نمونه‌ها را دارند. این موضوع در شکل (۲) بیان شده است. در این شکل نیروی مورد نیاز برای حمل هر جسم گزارش شده است.



شکل ۲ نمودار نیروی حمل بر حسب نوع هندسه [18]

عملکرد مکانیزم به صورتی است که ابتدا گیره بر روی جسم می‌نشیند، در حالی که از بالا نیروی رو به پایینی برای جفت شدن بهتر بالن به جسم وارد می‌گردد. در این حالت پودر آویشن دور تا دور قطعه را می‌گیرد و در ادامه با انجام مکش، هوای بین مواد دانه‌ریز از بین می‌رود، و پودرها شکل جسم را به خود می‌گیرند. نیروی نگاه‌داری جسم در این فرآیند شامل دو مؤلفه‌ی نیروی اصطکاک مابین جسم و بالن ذرات و نیروی خلأ ناشی از هوای کم فشاری است که میان جسم و بالن به دام افتاده است. دلیل این محبوس



شکل ۶ مدل ارتقا یافته به همراه بالن حلقه‌ای برای اعمال نیروی جانبی. (در این شکل بالن‌های جانبی بیرون کشیده شده‌اند تا نمایان‌تر باشند. حرف a نمایشگر بالن جانبی و حرف b نمایشگر بالن اصلی است)

### مطالعه‌ی تجربی مدل‌ها بر مبنای آزمایش‌ها

در این پژوهش اثر پارامترهای مؤثر بر موفقیت عمل گیرش و برداشت اجسام بررسی شده است. از جمله این پارامترها می‌توان به قطر بالن، قطر ذرات، ضخامت پوسته‌ی بالن‌ها، نیروی جانبی، نیروی عمودی و هندسه‌ی خود نمونه در حال برداشت، اشاره کرد.

در مرجع [18] هدف یافتن رابطه‌ی نیروی حمل با نیروی حاصل از همین مکش و تغییرات حجم است. نموداری که بر حسب نیروی لازم، برای عمل گرفتن در شکل (۳) نمایش داده شده است، صرفاً با یک بالن با حجم ثابت انجام شده و این نمودار از اندازه‌ی قطر بالن اطلاعاتی در اختیار نمی‌گذارد. این مورد می‌تواند با وارد کردن متغیر قطر بالن در آزمایش‌ها، تصحیح گردد. به این منظور مدل اولیه‌ی ساخته شده، با قطر-های مختلف تحت آزمایش قرار گرفت تا پارامتر قطر بالن در رابطه در نظر گرفته شود.

آزمایش‌هایی روی مدل ارتقا یافته صورت گرفته است که مبنای هر آزمایش یکی از پارامترهای مؤثر در گیرش، رهایش و جابه‌جایی جسم است. مبنای



شکل ۴ نحوه‌ی کارکرد گیره‌ی بالنی

### ساخت نمونه‌ی آزمایشی

در مدل برای گیره‌ی بالنی رباتیک طراحی و ساخته شده است. مدل اولیه‌ی گیره که در شکل (۵) نشان داده شده است از یک بالن اصلی حاوی ذرات ماده‌ی دانه‌ریز تشکیل شده است. در دومین نمونه، مدل ارتقا یافته در دو بخش طراحی شده است (شکل ۶). بالن اصلی حاوی ماده‌ی دانه‌ریز و بالن حلقه‌ای شکل که توسط هوا پر و خالی می‌گردد. در شکل، بالن سفید رنگ اصلی و بالن‌های دو سمت آن بالن‌های جانبی هستند. در این حالت بالن‌های جانبی خالی هستند و هیچ نیرویی بر بالن اصلی و حلقه‌های جانبی وارد نمی‌گردد. انتهای بالن اصلی به بدنه و لوله‌ی مکش و هم‌چنین لوله‌ی تزریق هوا به بالن جانبی متصل می‌گردد.



شکل ۵ مدل اولیه‌ی گیره‌ی بالنی رباتیک در کنار پمپ مکش و منبع تغذیه

شکل برای حجم نمونه به دست می آید که نمره ی بالاتر نشانگر احتمال موفقیت بیشتر است. جدول (۱) گزارش نتایج آزمایش ها است. آزمایش ها، با گیره بدون بالن جانبی انجام شده است. دلیل این کار نیاز به بررسی نتایج برداشت است، بدون توجه به امکانات اضافه شده. تأثیر بالن جانبی در ادامه بررسی خواهد شد، که آن آزمایش هم به صورت مستقل انجام می گیرد. مفهوم اعداد این جدول رابطه ی مستقیمی با موفقیت دارد. به طور مثال در ستون و سطر اول عدد یک قرار گرفته که نشان دهنده ی آن است که این نوع هندسه از جانب نمره ی یک و از بالا نیز همین نمره را می گیرد. به عبارتی از هر ده آزمایش که بر روی جسمی با این هندسه جانبی انجام شده است فقط یک آزمایش موفق بوده است. ده آزمایش هم بر روی جسمی با همین هندسه، این بار از بالا انجام شده است که آن هم از هر ده آزمایش یک موفقیت داشته است. عدد کلی که نشان دهنده ی موفقیت هندسی برداشت است، با ضرب این دو عدد به دست آمده است. برای نمونه واکنش بالن به برداشت یک حلقه ی توپر، به صورت شکل (۷) است.

موفقیت در آزمایش ها، تعداد نمونه هایی است که گیره توانسته در میان تمامی نمونه های آماری، بردارد و جابه جا کند. این تعداد در مقایسه با کل نمونه ها درصد موفقیت در برداشت را تبیین می کند. داده های برداشت شده در قالب نمودار قابل بررسی هستند. توابع با استفاده از برازش مناسب بر مبنای نمودارهای توانی، لگاریتمی، چند جمله ای و خطی، استخراج می گردند. در نتیجه با مقایسه ی میزان خطا و سادگی روابط، برای هر برازش یک رابطه ی برتر انتخاب می شود.

### آزمایش سنجش تأثیر هندسه بر موفقیت برداشت

در این آزمایش هندسه های گوناگون تقسیم بندی شده اند. نمونه هایی در هر گروه انتخاب شده و از هر نمونه ۱۰ بار آزمایش گرفته شده است تا موفقیت بر مبنای هندسه به دست آید. در این جا سطح دید از بالا و از کنار در نظر گرفته شده است و هر کدام بر مبنای شکل تصویر شده از بالا و کنار از نظر موفقیت بررسی شده اند. در نهایت به هر کدام از تقسیم بندی های هندسه، نمره ای داده شده که نشان دهنده ی تعداد دفعاتی است که این جسم با موفقیت گرفته شده است. با ضرب اعداد مربوط در هم، پارامتری به نام پارامتر

جدول ۱ برتری پارامتر هندسی

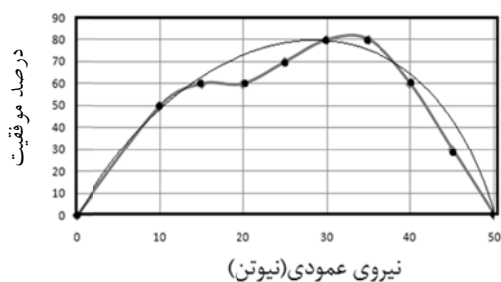
	دید بالا	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
دید کنار											
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
3		3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
4		4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
5		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
6		6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
7		7	14	21	28	35	42	49	56	63	70
8		8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
9		9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
10		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

دلیل این که قطر چهار سانتی متر، در شکل به درصد کامل رسیده است و بقیه نرسیده اند این است که زمان مکش برای همه ی بالن ها مشابه در نظر گرفته شده است؛ در صورتی که با افزایش قطر بالن ها، حجم آن ها و هوای موجود افزایش می یابد. مکش کامل برای بالن های بزرگ تر نیاز به زمان بیشتری دارد. با توجه به عدم دخالت زمان مکش در پارامترها و روابط، زمان برای همه برابر بوده است. در این زمان بالن با قطر چهار سانتی متر، تمام هوای خود را از دست داده است ولی قطرهای بالاتر این گونه نبوده اند.

کاهش قطر گیره، از رابطه ی نمایی پیروی می کند. وابستگی پارامتر در موفقیت عملیات به صورت رابطه ی (۱) به دست می آید که درصد موفقیت از میانگین درصدهای موفقیت هر قطر حاصل شده است.

$$S_{dO} = 5.4 \times \sqrt[3]{D} (e^{\frac{0.1}{do}} - 1) \quad (1)$$

پارامترهای رابطه ی بالا به طور کامل در جدول (۲) نمایش داده شده اند. رابطه ی (۱) نشان دهنده ی تأثیر نسبت قطر بالن اصلی (D) و نسبت قطر نمونه به قطر بالن اصلی (do)، بدون دخالت بقیه ی پارامترها، بر درصد موفقیت است. مقادیر نمودارها بنا به قطر، در راستای افق نمودار افزایش می یابد. این افزایش بر نمودار ریشه سوم منطبق تر است. به علاوه مقدار عددی روی هر نمودار، پیروی یک تابع نمایی از متغیر نسبت قطر است.



شکل ۹ تأثیر نیروی عمودی بر موفقیت حمل نمونه استوانه ای



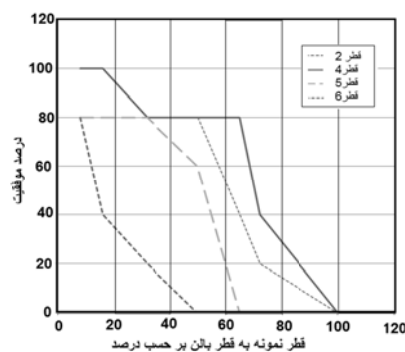
شکل ۷ قالب ایجاد شده از یک حلقه روی غشا بالن اصلی (در این وضعیت قطعه برداشته شده است و سپس جدا شده تا قالب گرفته شده از آن نشان داده شود)

## آزمایش سنجش تأثیر قطر بالن بر موفقیت

### برداشت

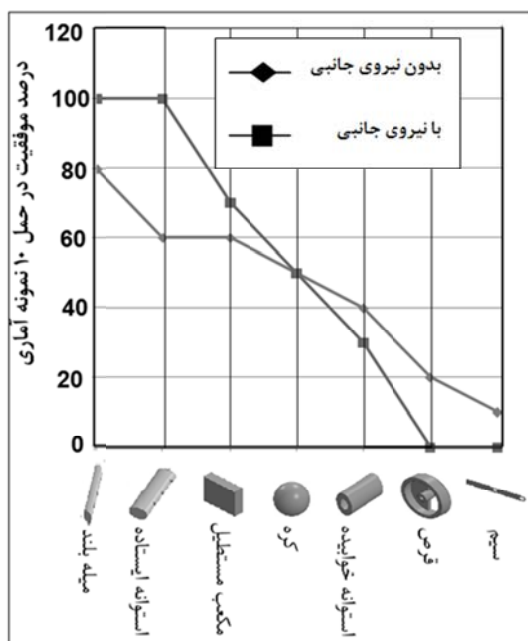
در این آزمایش، نمونه ها با هندسه های متفاوت، با بالن هایی به قطرهای مختلف برداشته شده اند. این آزمایش بر روی نمونه های هندسی مختلف، از جمله خانواده ی پیچ ها، بوش ها، سنگ های متوسط، اجسام با ساختار ناهمگون، اجسام کروی و استوانه ای و اجسام مسطح انجام شد و درصد موفقیت در هر کدام از آزمایش ها بر مبنای درصد قطر نمونه به بالن، مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه ی این آزمایش در شکل (۸) آورده شده و مشاهده می شود که درصد موفقیت کل، با بالا رفتن قطر بالن افزایش می یابد. این مورد می تواند مشخصات دقیق تری از گیره ی رباتیکی در این مقاله ارائه بدهد.



شکل ۸ نمودار درصد موفقیت بر حسب درصد قطر نمونه به قطر بالن اصلی

با اجسامی که شکل ایستاده تری دارند، نامناسب تر است.



شکل ۱۰ مقایسه‌ی موفقیت بالن جانبی با بالن اصلی

تأثیر نیروی جانبی به هندسه بستگی دارد و در رابطه‌ی نهایی به کار گرفته خواهد شد. نیروی به دست آمده در شکل (۱۰) رابطه‌ای مستقیم با دید از کنار هندسه‌ی جسم، مطابق سطرهای جدول (۱) دارد.

در مواردی این نیرو نه تنها مثبت نیست، بلکه در رهایش جسم هم تأثیر دارد. آنچه به تأثیر بیشتر این نیرو کمک می‌کند، تغییرات حجمی بیشتر بالن است که طبق [2] ارتباطی همسان با تنش و نیروی گیرش دارد. در این جا نیاز به تعریف پارامتری احساس می‌شود که شیب دید از کنار جسم را وارد مسأله کند. این شیب هر چه بیشتر باشد، نیروی جانبی تأثیر گذارتر است و شیب کمتر باعث می‌شود که نیروی جانبی تأثیر منفی بیشتری بر درصد موفقیت عملیات برداشت، داشته باشد. برای مثال، این نیرو برای شیب روی کره تأثیر صفر دارد و اگر شیب جانبی دارای میانگین ۴۵ درجه باشد این نیرو تأثیری نخواهد داشت.

شکل (۹) نشان دهنده‌ی آن است که نیروی عمودی تا رسیدن به نیروی ماکزیمم روی نمودار مفید واقع می‌گردد (۳۵ نیوتن). رفتار نمودار غیرخطی است. دلیل این رفتار، این است که در صورت عدم وجود نیرو، هیچ گیرشی صورت نمی‌گیرد. با این حال با افزایش نیرو گیرش انجام می‌گیرد. با افزایش بالن دور جسم را به خوبی می‌گیرد اما با افزایش بیش از حد نیروی عمودی، نیروی اصطکاک چنان بین بدنه و بالن زیاد می‌شود که از حرکت پوسته‌ی بالن و جای‌گیری آن میان فضاها مناسب گیرش جلوگیری می‌کند. این نتیجه نمودار دارای یک حد بهینه‌ی کارکرد است. این مسأله خود به خود، به رفتار غیرخطی می‌انجامد. این نمودار به صورت چندجمله‌ای پیشنهاد می‌گردد که در (۲) بر اساس  $F_V$  نیروی عمودی نشان داده شده است.

$$S_{FV} = 0.03F_V^2 + 1.5F_V \quad (2)$$

پارامترهای رابطه به‌طور کامل در جدول (۲) نمایش داده شده‌اند.

### آزمایش سنجش تأثیر نیروی جانبی بر موفقیت برداشت

در این پژوهش تلاش شده تا نیروی جانبی، با استفاده از یک حلقه‌ی منبسط شونده به بالن اصلی وارد گردد. در این آزمایش، گیره به بالن جانبی مجهز می‌گردد و نمونه‌ها دوباره سنجیده می‌شوند. نتیجه‌ی این آزمایش در نمودار موجود در شکل (۱۰) ترسیم شده است.

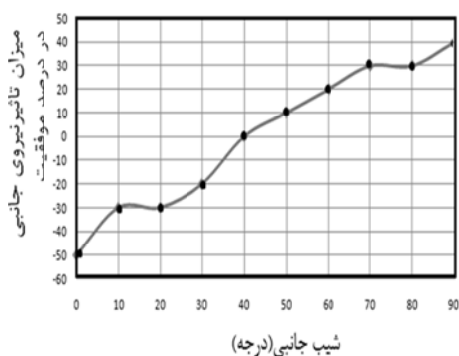
شکل (۱۰) بیان کننده‌ی این است که بالن جانبی برای برخی هندسه‌ها مفید و برای برخی نامناسب است. در واقع هر چه نمونه بیشتر در عمق بالن اصلی فرو رود، اعمال نیروی جانبی نیز تأثیر بهتری بر عمل برداشت می‌گذارد. این نیروی جانبی برای اجسامی که هندسه‌ی کلی آن‌ها بیشتر کفه‌ای شکل است در مقایسه



جدول ۲ مشخصات رابطه‌ی (۶ و ۳)

واحد	توضیح	پارامتر
بدون واحد	پارامتر موفقیت	S
بدون واحد	ضریب اصطکاک ایستایی	$\mu$
بدون واحد	نمره‌ی هندسی دید از بالا	V
بدون واحد	نمره‌ی هندسی دید از کنار	H
درجه	شیب جانبی	R
بدون واحد	نسبت قطر نمونه به بالن	do
Cm	قطر بالن	D
بدون واحد	پارامتر هندسی بار	H.V
N	نیروی عمودی	f <sub>v</sub>
N	نیروی افقی	f <sub>h</sub>
N	نیروی بار عمودی	f <sub>l</sub>
بدون واحد	تأثیر ضخامت پوسته	S <sub>L</sub>
بدون واحد	تأثیر قطر بالن	S <sub>do</sub>
بدون واحد	تأثیر نیروی عمودی	S <sub>FV</sub>
بدون واحد	تأثیر شیب جانبی	$\Delta S_{FH}$

رابطه‌های بین پارامتر شیب جانبی و ضریب اصطکاک و نیروی جانبی، مطابق شکل (۱۰) برقرار است. اگر ضریب اصطکاک را ثابت فرض کنیم، پارامتر شیب جانبی و نیروی جانبی طبق شکل (۱۱) نسبت به هم تغییر می‌کنند. به گونه‌ای که در شیب ۴۵ درجه به پایین این تأثیر منفی خواهد بود. نمودار بیان کننده‌ی آزمایشی روی نمونه‌های شکل (۱۰) است که با توجه به مقدار تأثیر نیروی جانبی در درصد موفقیت، صورت پذیرفته است.



شکل ۱۱ میزان تأثیر شیب جانبی بر تأثیر نیروی جانبی روی موفقیت برداشت نمونه

### آزمایش سنجش تأثیر قطر دانه‌ها بر موفقیت

#### برداشت

یکی از عوامل مؤثر بر دقت برداشت، اندازه‌ی ریزدانه‌های موجود در بالن اصلی است. هرچه ذرات ریزتر باشند، برداشت راحت‌تر صورت می‌گیرد و جسم بهتر در بالن گرفتار می‌شود. در حالی که کوچک بودن بیش از حد دانه‌ها جدایش دانه‌ها از هم را در مرحله‌ی رهایی دشوارتر می‌کند و دستگاه در مرحله‌ی نهایی کار دچار مشکل می‌گردد. از آنجا که اصولاً اندازه‌ی ذرات مواد دانه‌ریز مورد نظر در این طرح نزدیک به هم در نظر گرفته شده است، می‌توان در این جا از تأثیر این پارامتر در رابطه‌ی کلی صرف‌نظر کرد.

تأثیر نیروی جانبی بر درصد موفقیت برداشت اجسام، به میزان شیب جانبی R وابسته است که بایستی در رابطه‌ی نهایی محسوب شود. دلیل عدم موفقیت در شیب‌های پایین و منفی، ایجاد یک مؤلفه‌ی نیروی عمود بر سطح است که سطح را رو به داخل خودش می‌فشارد. حال اگر شیب به گونه‌ای باشد که مؤلفه‌ی نیرو در راستای جاذبه نیز مؤلفه‌ای پیدا کند، جسم به جای ماندن در گیره، میل به بیرون جهیدن پیدا می‌کند. نتایج شکل (۱۱) در رابطه‌ی (۳) آورده شده است.

$$S_{FH} = \frac{4}{5}R - 32 \quad (3)$$

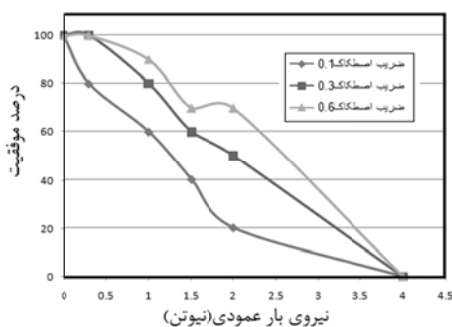
پارامترهای رابطه به‌طور کامل در جدول (۲) نمایش داده شده‌اند.

می یابد. در نتیجه برای یک نمونه در یک حجم ثابت هر چه چگالی بیشتر باشد امکان حمل کاهش می یابد. برای سنجش تأثیر وزن نمونه در درصد موفقیت، نمونه ای واحد با جرم ثابت ولی با جرم های جانبی الحاق شده به انتهای آن، مورد آزمایش قرار گرفته است. یک استوانه ای ایستاده که هیچ گیرش دندان به دندانهای با بالن ندارد، به عنوان نمونه آزمایش استاندارد انتخاب شد. از طریق آزمایش های جانبی ضریب اصطکاک خشک ایستایی بالن با نمونه هم معین گردید. برای سه ضریب اصطکاک، چهار وزن نمونه آزمایش گردید تا نموداری بر مبنای نیروی بار عمودی و ضریب اصطکاک و درصد موفقیت در گیرش به دست آید.

نمودار شکل (۱۳) بیان کننده ی این موضوع است که توانایی گیرش با نیروی عمودی رابطه ی مستقیمی دارد و ضریب اصطکاک در آن دخیل است. عدم موفقیت برداشت در ضرایب پایین اصطکاک، به دلیل کاهش تأثیر نیروی جانبی در گیرش و برداشت جسم برای مقابله با نیروی جاذبه است.

$$s_{II} = \frac{-12.5\mu f_l^3 + 50\mu f_l^2 + 100}{5.4} \quad (5)$$

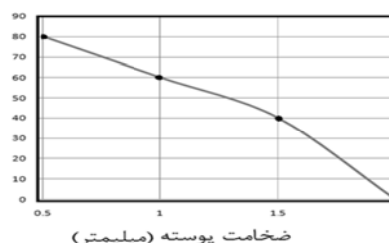
پارامترهای رابطه به طور کامل در جدول (۲) نمایش داده شده اند.



شکل ۱۳ تأثیر ضریب اصطکاک و بار عمودی بر توان گیرش و حمل و درصد موفقیت

## آزمایش سنجش تأثیر ضخامت پوسته بر موفقیت برداشت

یکی دیگر از عوامل تأثیر گذار، ضخامت پوسته ی کیسه اصلی است که برای گیرش از آن استفاده می شود. برای استخراج تأثیر این پارامتر، از چند پوسته با کشش های برابر و ترکیب آن ها برای داده برداری استفاده شده است. انتظار می رود که افزایش ضخامت تأثیری منفی داشته باشد و عملکرد گیرش را کاهش دهد. برای اعمال این پارامتر در رابطه ی نهایی چهار نمونه در چهار ضخامت مختلف آزمایش شده اند.



شکل ۱۲ تأثیر ضخامت پوسته بر درصد موفقیت

نمودار شکل (۱۲) نشان دهنده ی درستی این فرضیه است که با افزایش ضخامت پوسته، موفقیت کاهش می یابد؛ چرا که با افزایش ضخامت پوسته، توان جای گیری پوسته در حفره ها و سطوح کاو، که عاملی مهم در برداشت است، کاهش می یابد. با یک برآزش مناسب، تابع چند جمله ای بر حسب ضخامت پوسته بالن به دست آمده است.

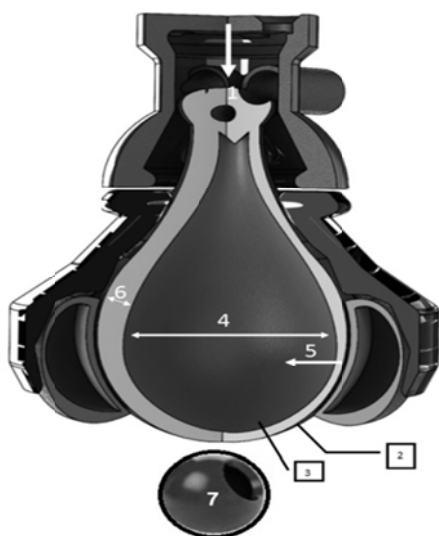
$$S_L = -20L^2 - 2L + 85 \quad (4)$$

پارامترهای رابطه به طور کامل در جدول (۲) نمایش داده شده اند.

## تأثیر پارامتر چگالی در توان برداشت

روشن است که با افزایش وزن، امکان موفقیت کاهش

## تدوین رابطیه نهایی



شکل ۱۴ پارامترهای مؤثر در گیرش و حمل با توضیحات شمارگان: ۱-نیروی عمودی، ۲-جنس و کشش پوسته، ۳-قطر ریزدانه‌ها، ۴-قطر پوسته، ۵-نیروی جانبی، ۶-ضخامت پوسته، ۷-مشخصات هندسی بار

آنچه از مجموعه‌ی آزمایش‌ها حاصل شد، تعیین نحوه‌ی ارتباط پارامترهای طراحی گیره بر فرآیند برداشت است. نمودارهای حاصل می‌تواند مبنای استخراج مقادیر عددی برای روابط ریاضی باشد. هر کدام از روابط، دامنه‌ای از خطاها را در گستره‌ی کاری گیره ایجاد می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که رابطیه نهایی امکان طراحی را با تقریب مطلوبی فراهم آورده است. روابط با دقت برازش مطلوب انتخاب شده‌اند و به طراح کمک می‌کند تا تخمین صحیحی از عملکرد گیره‌ی بالنی رباتیک داشته باشد.

پارامترهای مؤثر در قابلیت گیرش در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. رابطیه‌ی نهایی برای احتمال موفقیت این گیره‌ی رباتیک بر مبنای خروجی آزمایش‌ها قابل تدوین است. این رابطه به صورت (۶) پیشنهاد می‌گردد:

$$S = \sqrt{\left( \sqrt[3]{(S_L \cdot S_{dO} \cdot S_{FV}) + S_{FH}^3} \right) \cdot H.V} \cdot S_{fl} \quad (6)$$

که  $S_L$  نشان‌دهنده‌ی تأثیر ضخامت پوسته‌ی بالن است (رابطه‌ی ۴).  $S_{dO}$  حاصل از رابطه‌ی (۱) نشانگر تأثیر قطر بالن بر موفقیت برداشت است.  $S_{FV}$  که نشان‌دهنده‌ی نیروی عمودی است از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید.  $\Delta S_{FH}$  که از (۳) به دست می‌آید، تأثیر شیب جانبی نمونه را بر میزان نیروی جانبی، مطابق رابطه‌ی (۶) بیان می‌کند.  $H.V$  نیز بیانگر پارامتر برتری هندسی است که در جدول (۱) آمده است.  $S_{fl}$  میزان تأثیر نیروی اصطکاک است (رابطه‌ی ۵).

پارامترهای این رابطه در جدول (۲) مشخص شده است. بیشینه مقدار عددی حاصل از این فرمول، عدد ۱۰۰ است که نشان‌دهنده‌ی بالاترین درصد موفقیت گیرش محسوب می‌شود. عدم موفقیت قطعی نیز با مقدار حداقلی صفر بازگو می‌گردد.

## اعتبار سنجی رابطیه پیشنهادی

در این بخش صحت رابطیه‌ی تدوین‌شده (۶)، به وسیله‌ی نتایج کارهای گذشته بررسی می‌شود و درصد موفقیت چند آزمایش توسط مقاله‌ی مرجع [17] مورد استناد قرار می‌گیرد. تمام پارامترها طبق رابطیه‌ی تدوین شده (۶) محاسبه می‌شوند و در این میان قابلیت‌های گیره‌ی رباتیک‌ی فوق در مواردی در نظر گرفته نشده است تا امکان مقایسه با تحقیقات دیگر فراهم گردد.

با توجه به [17]، جسم کروی با جدایش خودبه‌خودی با نیروی ۱۰ نیوتن طبق شکل (۷) مرجع، برای برداشت با گیره‌ی حاضر در نظر گرفته شده است. توانایی اعمال نیروی جانبی که به پژوهش پیش رو اختصاص دارد، صفر است. جسم کروی با ضریب اصطکاک ۰.۵ در تماس با لاستیک و با وزن ۱ نیوتن است. ضخامت پوسته‌ی بالن ۱ میلی‌متر است. شیب متوسط نیم‌کره ۴۵ درجه است. فاصله‌ی جسم از گیره

نوع جدیدی از گیره رباتیک طراحی، ساخته و آزمایش شده است.

نوآوری‌های صورت گرفته در این مقاله عبارتند از:

- طراحی گیره بالنی رباتیک با اعمال نیروی جانبی برای کاهش وابستگی به نیروی خلأ ما بین جسم و بالن.

- تدوین رابطه ریاضی بین پارامترهای طراحی و درصد موفقیت عملیات برداشت جسم.

با استفاده از یک بالن مرکزی محتوی ذرات ریزدانه و نیمه چسبندهی آویشن و نیروی مکشی که هوا را از میان این ذرات خارج می‌کند، عمل گیرش و جذب جسم انجام می‌شود و با کمک یک بالن حلقه‌ای نیروی جانبی اعمال می‌گردد. با توجه به ضربه‌پذیری، انعطاف‌پذیری و وزن کم، می‌توان این گیره را برای پنجه‌ی ربات‌هایی مناسب دانست که در محیط‌های پیش‌بینی نشده کار می‌کنند.

علاوه بر برتری‌هایی که مدل ارتقا یافته‌ی پیشنهادی ایجاد می‌کند، اعتبارسنجی صورت گرفته و آزمایش‌ها روی مدل اولیه نشان‌دهنده‌ی انطباق رابطه‌ی تدوین شده برای درصد موفقیت، با تحقیقات پیشین است.

با استناد به شرایط پژوهش مرجع، صفر در نظر گرفته می‌شود. قطر نمونه طبق توضیحات شکل چهارم بین ۵ تا ۳۸ میلی‌متر متغیر است. قطر بالن اصلی برابر با ۶ سانتی‌متر و قطر آزمایشی نمونه در میانه‌ی گستره‌ی شعاع نمونه‌ها ۲۰ میلی‌متر است. با توجه به مشخصات جسم و گیره‌ی تشریح شده در این قسمت،  $S_{FV}$ ،  $S_{FL}$ ،  $S_{FV}$ ،  $S_{FL}$ ،  $S_{DO}$  مقدار گذاری می‌شوند. این پارامترها به‌علاوه پارامتر برتری هندسی در جدول (۳) نمایش داده می‌شوند. در نهایت با جای‌گذاری این نتایج در رابطه‌ی (۶)، مقدار موفقیت برابر با ۹۲.۸۶٪ محاسبه می‌گردد. در مقاله‌ی مرجع [17] بدون استفاده از رابطه، درصد موفقیت برداشت، به‌صورت آماری ۹۵ درصد گزارش شده است.

جدول ۳ مشخصات پارامترهای برداشت نمونه

$S_{FV}$	$S_{FL}$	$S_L$	$\Delta S_{FH}$	$S_{DO}$	H.V
18	21.8	61	4	0.421	49

### نتیجه‌گیری

در قلمرو رباتیک و اتوماسیون، نیاز به وجود گیره‌ی رباتیک انعطاف‌پذیر برای گرفتن گستره‌ی وسیعی از اجسام، بیش از پیش احساس می‌گردد. در این مقاله

### مراجع

1. Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R., and Schunk, H., "Robot grippers", Wiley-VCH, (2007).
2. Kaneko, M., Higashimori, M., Takenaka, R., Namiki, A. and Ishikawa, M., "The 100 G capturing robot-too fast to see", *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 8, pp. 37-44, (2003).
3. Tsourveloudis, N., Valavanis, K., Kolluru, R. and Nikolos, I.K., "Position and suction control of a reconfigurable robotic gripper", *Machine Intelligence and Robotic Control*, 11(2), pp. 53-62, (1999).
4. Roy, D., "Design and Developmental Metrics of a 'Skin-Like' Multi-Input Quasi-Compliant Robotic Gripper Sensor Using Tactile Matrix", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 46(4), pp. 305-337, (2006)
5. Droessler, N.J., Hall, D.K., Tyler, M.E., Ferrier, N.J., "Tongue-based electro-tactile feedback to

- perceive objects grasped by a robotic manipulator", *IEEE Conf. on EMBS*, (2001).
6. Rienmüller, T. and Weissmantel, H., "A shape adaptive gripper finger for robots", *Proc 18th International Symposium on Industrial Robots*, Switzerland, pp. 241–250, (1988).
  7. Angel selles, M., perez-bernabeu, E. and sanchez-caballero, S., "A design approach to a standard manipulator", *Scientific Bulletin of the Petru Maior*, University of Tîrgu Mureş, Vol. 9, .pp. 2, (2012).
  8. Perovskii AP, "Universal grippers for industrial robots", *Russ Eng J* 60:3–4, (1980).
  9. Schmidt, I., "Flexible moulding jaws for grippers", *Industrial Robot*, Vol. 5, pp. 24-26, (1978).
  10. Korayem, M.H., Bamdad, M. and Saadat, M., "Workspace analysis of cable-suspended robots with elastic cable", *IEEE Robotics and Biomimetics*, (2007).
  11. Hirose, S. and Umetani, Y., "Development of soft gripper for the versatile robot hand", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 13, pp. 351–359, (1978).
  12. Majmudar, T.S., Sperl, M., Luding, S. and Behringer, R.P., "Jamming transition in granular Systems", *Phys Rev Lett.*, (2007).
  13. Corwin, E.I., Jaeger, H.M. and Nagel, S.R., "Structural signature of jamming in granular media", *Nature Report*, No. 435, pp. 1075–1078, (2005).
  14. O'Hern, C.S., Silbert, L.E., Liu, A.J. and Nagel, S.R., "Jamming at zero temperature and zero applied stress", *Phys Rev E.*, (2003).
  15. Jaeger, H.M., Nagel, S.R. and Behringer, R.P., "Granular solids, liquids, and gases", *Rev Mod Phys.*, Vol. 68, pp. 1259–1273, (1996).
  16. Liu, A.J. and Nagel, S.R. "Jamming is not just cool any more", *Nature .Report*, No. 396, .pp. 21–22, (1998).
  17. Amend, J.R., Brown, E.M., Rodenberg, N., Jaeger, H.M. and Lipson, H., "A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material", *Robotics*, IEEE Transactions on, Vol. 28, pp. 341-350, (2012).
  18. Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M.R. and Jaeger, H.M., "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(44), .pp. 18809-18814, (2010).