



## یک گریپر رباتیک با چسبندگی مارمولکی و سیستم تحریک سولونوئیدی

رضا حسین میرزایی<sup>1</sup> و مهدی مدبری فر<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مکترونیک، دانشگاه اراک، اراک

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

\* اراک، صندوق پستی 3815688349، m-modabberifar@araku.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 19 آبان 1397  
پذیرش: 8 بهمن 1397  
ارائه در سایت: مرداد 1398

### کلیدواژگان:

چسبندگی مارمولکی  
سولونوئید  
گریپر رباتیک

پژوهشگرانی که به دنبال توسعه توانایی‌های ربات‌ها بوده‌اند، همواره نگاهی به سیستم‌های زیستی داشته و از آنها الهام گرفته‌اند. مارمولک یکی از مخلوقات چابک است که بطور قابل توجهی قدرت مانور بر روی سطوح تخت و عمودی مانند دیوار دارد. مطالعه سیستم چسبندگی پاهای مارمولک منجر به طراحی چسبنده‌های مصنوعی بنام چسبنده‌های خشک یا مارمولکی در سال‌های اخیر شده است. این چسبنده‌ها با مصرف کم انرژی در ربات‌های دیوار نورد و گریپرهای رباتیک عملکرد موفقی داشته‌اند. گریپرهای موجود عمدتاً از مکانیزم تاندونی برای انتقال نیرو استفاده کرده و از سیستم‌های تحریکی مانند موتورهای الکتریکی برای اعمال نیروی برشی استفاده می‌کنند. در این مقاله بر طراحی و ساخت یک نوع گریپر بر اساس چسبندگی مارمولکی تمرکز شده است که از سیستم تحریک سولونوئیدی برای اعمال نیروی برشی و مکانیزم اسکات-راسل بجای تاندون برای انتقال نیرو استفاده می‌کند. این گریپر نسبت به گریپرهای قبلی ارزاتر بوده و از مکانیزم بادوام‌تری برای انتقال نیروی برشی استفاده می‌کند. جهت ارزیابی عملکرد این گریپر پیشنهادی، آزمایش‌هایی بر روی مواد مختلف انجام شد که نتایج آن نشان دهنده عملکرد موفق گریپر بوده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان دهنده 4/6، 4/1 و 4/5 کیلوپاسکال فشار میانگین چسبندگی بر روی سطح اکریلیک، شیشه و فولاد بوده‌اند. همچنین حداکثر فشار چسبندگی اندازه‌گیری شده 20 درصد نسبت به گریپر مشابه تاندونی قبلی افزایش داشته است. این نتایج نشان دادند که گریپر با سیستم تحریک سولونوئیدی و مکانیزم اسکات-راسل این پتانسیل را دارد که در گریپرهای با چسبندگی مارمولکی استفاده شود.

## A solenoid actuated gecko-like robotic gripper

Reza Hosein Mirzaee, Mehdi Modabberifar\*

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

\* P.O.B. 3815688349 Arak, Iran, m-modabberifar@araku.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 10 November 2018  
Accepted 28 January 2019  
Available August 2019

### Keywords:

Gecko-like adhesive  
Solenoid  
Robotic Gripper

### Abstract

The Researchers seeking to expand the capabilities of robots have begun looking to biological systems for inspiration. One particularly agile creature, the gecko lizard, is remarkably adept at maneuvering across both flat and vertical surfaces. The study of the gecko's adhesive system has informed the design of several synthetic adhesives in recent years. These low consuming energy adhesives had a successful performance in climbing robots and robotic grippers. The existing grippers mainly use tendon mechanism for transmitting force inside the gripper and electrical motors for actuating the gripper. This paper concentrates on design and fabrication of a new gripper which uses solenoid for actuation, and Scutt-Russel mechanism instead of tendon mechanism for transmitting force. The new gripper is more robust and cheaper than existing grippers. To verify the applicability of proposed gripper, experiments were conducted on a variety of substrates that demonstrated the gripper's successful operation. Experimental results demonstrated 4.6, 4.5 and 4.1 kPa average normal adhesion pressure on the surface of acrylic, steel and glass respectively. Also, maximum measured adhesion increased 20% in comparison with previous tendon gripper. The results illustrate that a Solenoid actuator with Scott-Russel mechanism has the potential to be used as a new actuator in gecko-inspired gripper.

### 1- مقدمه

کمتر انرژی نسبت به روش‌های سنتی مانند جاذبه مغناطیسی، نیروهای الکترواستاتیک و مکش دارد و می‌تواند راه حل خوبی برای جابجایی اشیاء در فضا باشد. چسبنده‌های جهت‌دار مارمولکی گزینه بهتری برای استفاده در گریپرها نسبت به چسبنده‌های غیر جهت‌دار می‌باشد، چرا که با کنترل نیروی

در سال‌های اخیر چسبنده‌های خشک الهام گرفته از چسبندگی پاهای مارمولک در ربات‌های دیوار نورد و جابجایی اشیاء تخت در گریپرها استفاده شده‌اند. استفاده از چسبنده‌های مارمولکی در گریپرها برای جابجایی اشیاء مزایایی مانند مصرف

Please cite this article using:

R. Hosein Mirzaee, M. Modabberifar, A solenoid actuated gecko-like robotic gripper, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp.43-50, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SID.ir

موهای مارمولک انجام گرفت، بیشتر شناخته شد. تمام این نتایج نشان دادند که نیروی کنده شدن از سطح به مقدار زیادی به جهت و میزان نیروی پیش‌بار بستگی دارد. یک مدل به نام "چسبندگی جهت‌دار"<sup>2</sup> شکل گرفت که با اطلاعات مارمولک هم‌خوانی نزدیکی داشت. این مدل با داده‌های اضافی که شامل یک مدل سنتی تماس‌های چسبنده بر اساس تئوری و آزمایشات جانسون، کندال و رابرت (JKR) [4] و مدل کنده شدن کندال [5] می‌باشد، بصورت منحنی‌های دو بعدی در فضای نیرو نشان داده شدند [6].

با توسعه ابزارهای پیشرفته ساخت، روش‌های مختلف ساختی برای تولید میکرو/نانو ساختار-هایی که از توانایی موهای پاها مارمولک جهت چسبیدن به دفعات زیاد بر روی هر سطحی حین بالا رفتن تقلید کنند، بررسی شدند. این ساختارهای مصنوعی به دو دسته نامتقارن (چسبندگی جهت‌دار) و متقارن (چسبندگی غیر جهت‌دار) تقسیم می‌شدند. برای حصول به این هدف، بعضی از روش‌های لیتوگرافی برای این کار استفاده شدند که شامل لیتوگرافی سنتی ماورابنفش، لیتوگرافی پرتو الکترونی و ساخت لایه به لایه می‌باشد. بقیه روش‌ها مانند ماشینکاری پرتو یونی متمرکز شده، نانو لایه نشانی و کولپلیمرهای خودمونتاژ نیز ارائه شدند. ریختن پلیمر در مواد نانو متخلخل و ماشین‌کاری قالب-ها با استفاده از ابزارهایی در مقیاس میکرو نیز به نتایج جالبی رسیدند. تکنیک‌های الگو سازی سطوح پلیمری در مقیاس ماکرو و نانو در [7] بصورت خلاصه آمده است.

روش‌های مختلفی برای گرفتن اشیا با استفاده از چسبنده‌های خشک جهت‌دار و غیر جهت‌دار وجود دارد. یک گریپر نرم غیر تخت با رشته‌های چسبنده سر قارچی توانست اشیا با شکل‌های مختلف را بلند کند [8]. قابلیت انطباق این گریپر با سطوح ناهموار و غیر تخت با استفاده از بدنه الاستیک قابل کنترل با فشار هوا افزایش یافت. در طراحی دیگری، یک گریپر با بدنه الاستیک که با فشار منفی هوا کنترل می‌شد، برای کنترل فشار چسبندگی بر روی سطوح سه بعدی پیشنهاد شد [9]. با این وجود، حذف نیاز به فشار هوا یکی از مزایای چسبندگی مارمولکی بوده و این گریپرها در جاهایی که محدودیت استفاده از فشار هوا وجود دارد (مانند فضا) مناسب نیستند.

طراحی بقیه گریپرها براساس استفاده از چسبندگی جهت‌دار، و عمدتاً استفاده از ساختار میکرو گوه‌ای شکل برای

برشی در آن می‌توان نیروی چسبندگی را کنترل کرد. گریپرهای الهام گرفته از چسبندگی مارمولکی که اخیراً توسعه داده شده‌اند عمدتاً از محرکه‌های مغناطیسی مانند موتورهای الکتریکی یا شانک گریپر<sup>1</sup> برای اعمال نیروی برشی بر چسبنده استفاده کرده و بیشتر از مکانیزم تاندونی برای انتقال نیرو در گریپر استفاده کردند. این محرکه‌ها اگرچه به آسانی در دسترس بوده و قابل اعتماد هستند، ولی گران بوده و مستلزم استفاده از مکانیزم‌های کمکی برای تغییر جهت نیرو هستند. مکانیزم تاندونی نیز اگرچه عملکرد موفق‌تری در گریپر داشته، در دراز مدت قابل اعتماد نبوده و امکان تغییر کالیبراسیون آن پس از چندین سیکل کاری وجود دارد و احتمال پاره شدن آن در محیط‌های صنعتی وجود دارد.

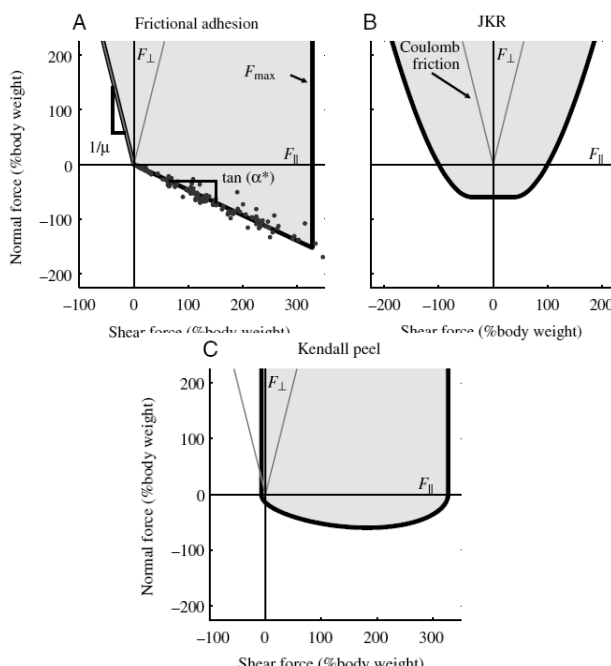
مکانیزم چسبندگی پاها مارمولک سالیان زیادی یکی از موضوعات بحث برانگیز علمی بوده است. قفل شدن تداخلی، مکش، الکترواستاتیک، نیروهای موین و نیروهای بین مولکولی از جمله فرضیه‌های مطرح شده برای نیروی چسبندگی پاها مارمولک بودند. بعد از آزمایشات فراوان، در اوایل قرن بیست و یکم تأیید شد که نیروهای واندوالسی مکانیزم غالب در چسبندگی مارمولکی است. آتمن و همکارانش نیروهای چسبندگی موهای پای یک مارمولک را روی دو صفحه ویفر نیمه‌هادی اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که نیروهای واندوالسی مکانیزم چسبندگی در ساختارهای رشته مانند تار موهای مارمولک است [1]. مشاهدات مارمولک در مقیاس ماکرو نشان دهنده کشیده شدن زیاد انگشتان پای مارمولک جهت کنده شدن انگشت پنجه از دیوار قبل از جدا شدن است. در مقیاسی کوچکتر سنسورهای میکروالکترومکانیکی نشان دادند که تار موهای اصلی پاها مارمولک بدون پیش نیروی مناسب که شامل یک مولفه به موازات دیوار باشد، نیروی قابل توجهی ایجاد نمی‌کنند. تست‌های انجام شده روی یک تار موی مارمولک نشان دادند که با بارگذاری به موازات دیوار بعد از اولین تماس، نیروی چسبندگی ده برابر افزایش یافت [2]. آزمایش‌های بعدی نشان دادند که تار موی مارمولک دارای یک حالت غیر چسبنده است، چرا که به هیچ سطحی نمی‌چسبد مگر آنکه نیروی پیش‌بار به موازات دیوار به آن اعمال شود [3]. این رفتار از درگیر شدن تصادفی پاها با سطوح یا ذرات ناخواسته جلوگیری می‌کند و می‌تواند یک مزیت تکاملی برای حیوانات باشد. چسبندگی تابع جهت در آزمایش‌های بعدی که بر روی تمام اندام مارمولک، انگشتان مارمولک و ردیف‌های تار

<sup>2</sup> Directional adhesion<sup>1</sup> Schunk gripper

## 2- اصول چسبندگی و گیره‌بندی

مدل‌های سنتی چسبندگی شامل مدل جانسون، کندال و رابرت (JKR) و مدل کنده شدن کندال به همراه مدل چسبندگی جهت‌دار در شکل 1 نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور عمودی نیروی چسبندگی نرمال بوده و تغییرات آن با نیروی برشی اعمال شده به چسبنده نشان داده شده است. ترکیب‌های نیروی برشی و نرمال که در محدوده‌های سایه خورده این منحنی هستند، ایمن بوده و تماس بین سطوح (چسبنده و جسم) حفظ خواهد شد، در حالیکه خود منحنی بیانگر نقاط عدم کارایی است که در آنها ترکیب نیروها منجر به جدایش سطوح خواهد شد.

چسبنده‌های خشک مصنوعی به دو دسته تقسیم می‌شوند. غیر جهت‌دار و جهت‌دار (شکل 2). چسبنده‌های غیر جهت‌دار شامل ساقه‌های پلیمری متقارن هستند که برای چسبیده شدن به پیش-نیرو<sup>1</sup> در جهت عمودی نیاز داشته و به آسانی چسبنده‌های جهت‌دار از سطح ماده کنده نمی‌شوند. چسبنده‌های جهت‌دار بر اساس مدل چسبندگی اصطکاکی (شکل 1- A) بوده و از ساقه‌های نامتقارن استفاده می‌کند.



**Fig. 1** (A) Frictional adhesion model with experimental results from gecko (B) JKR model for elastic spherical asperity in contact with flat substrate (C) Kendall peel model for thin adhesive film [6]

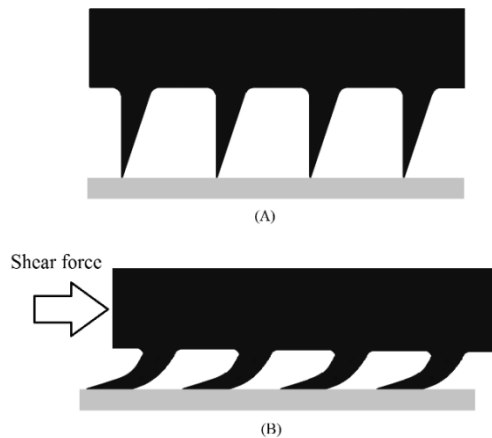
شکل 1 (A) مدل چسبندگی اصطکاکی بهمراه نتایج آزمایشات بدست آمده از مارمولک (B) مدل JKR برای کره الاستیک در تماس با ماده تخت (C) مدل کنده شدن کندال برای فیلم چسبنده [6]

چسبنده بود [10]. مکانیزم‌ها و محرکه‌های مختلفی برای اعمال نیروی برشی در این گریپرها بر چسبنده‌های گوه‌ای شکل پیشنهاد شد. به عنوان مثال، یک گریپر با استفاده از مکانیزم تاندونی برای گرفتن پنل‌های بزرگ استفاده شد [11]. این گریپر از دو تاندون برای توزیع نیروی برشی یکنواخت در طول گرفتن و رها کردن پنل‌ها استفاده کرد. گریپر دیگری از یک لایه نازک چسبنده مارمولکی برای انطباق با انحنا سطوح و گرفتن اشیاء محدب استفاده کرد [12]. یک گریپر مارمولکی با سطح منحنی برای گرفتن اشیاء چرخان با سرعت‌های خطی و دورانی متفاوت جهت کاربری در فضا در [13] پیشنهاد شد. گریپر دیگری با استفاده از مکانیزم تاندونی و نیروی محرکه یک شانک پیشنهاد شد [14]. در این گریپر از ترکیب نیروی جاذبه الکترواستاتیکی و چسبندگی مارمولکی برای انطباق بیشتر میکروساختارهای مارمولکی با سطوح زبر استفاده گردید و نتایج حاصل از آزمایشات نیروی چسبندگی بیشتری در مقایسه با چسبندگی مارمولکی تنها نشان دادند. نهایتاً جیانگ و همکارانش گریپر رباتیکی پیشنهاد کردند که قادر به گرفتن، جابجا کردن و رها کردن اشیاء تخت و منحنی به بزرگی یک متر با استفاده از چسبندگی مارمولکی در فضا بود [15].

اگرچه گریپره‌های ذکر شده در بالا عملکرد موفقی داشتند، ولی کنترلی بر نیروی برشی با استفاده از پارامترهای ورودی (مانند ولتاژ، نیرو، جابجایی و...)، که لازمه کنترل چسبندگی بر اساس مدل چسبندگی اصطکاکی است، نداشتند. علاوه بر این، سیستم محرکه بعضی از گریپره‌های ذکر شده در بالا گران بوده و یا بصورت دستی تحریک می‌شدند که برای گریپره‌های رباتیک مناسب نمی‌باشد. مکانیزم تاندونی استفاده شده در این گریپرها قابل اعتماد نبوده و امکان شل شدن، بریدن و تغییر کالیبراسیون تاندون در محیط‌های صنعتی وجود داشته و نیاز به جایگزینی مکانیزم جدیدی برای انتقال نیروی برشی به پدهای چسبنده مارمولکی است.

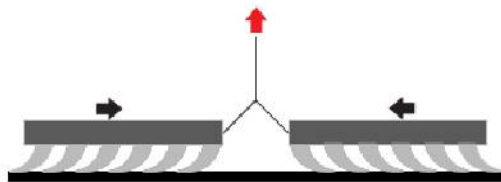
در این مقاله گریپر با چسبندگی مارمولکی جهت‌دار جدیدی با استفاده از نیروی محرکه یک سولونویید و مکانیزم انتقال نیروی اسکات-راسل پیشنهاد می‌شود. یک نمونه از این گریپر طراحی و ساخته شده و عملکرد آن ارزیابی می‌شود. با استفاده از سیستم تحریک سولونوییدی هزینه ساخت گریپر تا یکدهم در مقایسه با سیستم تحریک شانک پایین می‌آید. همچنین با استفاده از مکانیزم اسکات-راسل گریپر از طراحی با دوام تری برخوردار شده و تکرار پذیری نیروی برشی عملی به پدهای چسبنده افزایش می‌یابد.

<sup>1</sup> Pre-load



**Fig. 3** Principle of directional gecko-like adhesion A) microwedge adhesive is close to a surface allows the tips of the wedges to engage with the surface. B) When loaded in shear, the contact area, and hence, the adhesion increases

شکل 3 اصول عملکرد چسبندگی مارمولکی (A) چسبنده میکرو گوه‌ای در نزدیکی سطح قطعه کار است و اجازه می‌دهد که فقط نوک گوه‌ها با سطح قطعه در تماس باشد (B) زمانی که به چسبنده نیروی برشی اعمال میشود سطح تماس چسبنده و قطعه کار افزایش یافته و در نتیجه نیروی چسبندگی بین میکرو گوه‌ها و قطعه کار افزایش می‌یابد.



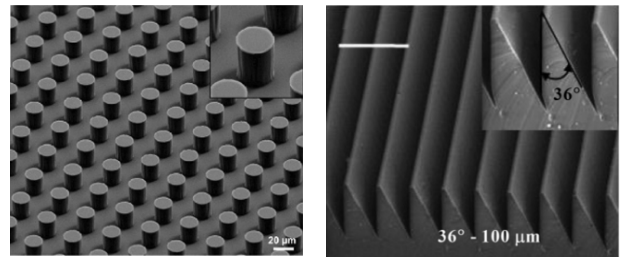
**Fig. 4** Diagram of the tendon-based gripper

شکل 4 دیاگرام گریپر تاندونی

سپس این پد با استفاده از یک تاندون و برای جلوگیری از ایجاد گشتاور از طریق مرکز سطح اش بارگذاری می‌شود. بعد از آنکه تماس با سطح برقرار گردید، تاندون کشیده می‌شود. با افزایش نیروی برشی، نیروی چسبندگی بین چسبنده و ماده مطابق مدل اصطکاکی افزایش می‌یابد. در گریپرهای قبلی نیروی برشی بصورت دستی یا با استفاده از یک موتور الکتریکی یا شاک اعمال می‌گردید. با استفاده مناسب از مکانیزم اسکات-راسل و سیستم تحریک سولونوییدی می‌توان به گریپری ارزانتر و بادوام تر و قابلیت اعتماد بالاتر رسید.

### 3- طراحی مکانیکی گریپر

در این گریپر به جهت آسانی ارتباط با سیستم‌های رباتیک صنایع، پاسخ زمانی کوتاهتر و قیمت پایین تر از یک سولونویید بجای شاک گریپر [14] برای تحریک گریپر و اعمال نیروی برشی استفاده می‌شود. بنابراین طراحی مکانیکی این گریپر بر



**Fig. 2** Left: non-directional synthetic gecko-like adhesives. Right: directional gecko-like adhesives [17,18]

شکل 2 چپ: چسبنده مصنوعی مارمولکی غیر جهت‌دار. راست: چسبنده مصنوعی مارمولکی جهت‌دار [17, 18]

در این چسبنده‌ها نیروی چسبندگی مستقیماً متناسب با نیروی برشی اعمال شده در جهت مطلوب در نقطه تماس است. زمانی که چسبنده‌های جهت‌دار در راستای برشی بارگذاری می‌شوند، سطح تماس بین چسبنده و ماده افزایش یافته و به تبع آن نیروی واندروالسی افزایش یافته و نیروی چسبندگی در جهت عمودی افزایش می‌یابد. این مدل اصطکاکی مبدا را قطع میکند که نشان دهنده آن است تماس بدون نیروی کنده شدن رها می‌شود [16]. چسبنده‌های مارمولکی مصنوعی جهت‌دار شامل ساقه‌های پلیمری غیر متقارنی هستند که چسبندگی موهای پای مارمولک را باز تولید کرده و میکرو ساختارهای گوه‌ای شکل یکی از انواع این چسبنده‌های مصنوعی می‌باشد. زمانی که این میکرو ساختارها در پدهای چسبنده گریپرها بارگذاری نمی‌شوند، فقط از سر تیز گوه‌ای خود با قطعه کار در تماس هستند (شکل 3- A). در این حالت چسبنده غیر فعال یا خاموش است. زمانی که به موازات سطح قطعه کار به چسبنده نیروی برشی اعمال می‌شود، میکرو گوه‌ها خم شده، سطح تماسی افزایش یافته، چسبندگی واندروالسی افزایش می‌یابد و چسبنده روشن می‌شود (شکل 3- B).

نیروی مکانیکی مورد نیاز جهت اعمال نیروی برشی به روش‌های مختلفی، مانند استفاده از فنر یا تاندون، به پدهای چسبنده اعمال می‌شود. پژوهش‌های قبلی عمدتاً متمرکز بر استفاده از تاندون بوده است. شکل 4 اصول طراحی در گریپر-های مارمولکی تاندونی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، این گریپر از یک جفت پد چسبنده در خلاف جهت یکدیگر استفاده می‌کند. در اینجا قدرت چسبندگی بستگی به سطح تماس و مقدار انطباق چسبنده مارمولکی با سطح ماده دارد و سطح انطباق پایین چسبنده و ماده منجر به چسبندگی ضعیف‌تر می‌شود. به منظور تأمین یکنواختی و یکسان بارگذاری چسبنده‌ها، چسبنده بر روی پدهای صلبی مونتاژ می‌شود.

بازو از ریل و واگن استفاده شده است. علاوه بر این، برای حصول اطمینان از قرار گرفتن ریل‌ها در یک صفحه و رسیدن به حداکثر تطابق با سطح اشیاء، از یک صفحه اکریلیک بر روی سطح زیرین بازوهای گریپر استفاده شده است.

برای رسیدن به بیشترین انعطاف پذیری و انطباق پدهای چسبنده و سطح اشیاء، از فوم سیلیکونی در پشت چسبنده‌های مارمولکی استفاده شده است. این فوم‌ها با استفاده از چسب دو لایه به سطح صلب پد می‌چسبند. شکل 6 مدل برش خورده گریپر پیشنهادی را نشان می‌دهد.

#### 4- ساخت گریپر

همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، گریپر پیشنهادی بوسیله یک سولنوئید تحریک میشود و بنابراین یک سولنوئید 150 وات (مدل H-150-29 کمپانی سیستم‌های سنسورهای مغناطیسی) برای تحریک این گریپر انتخاب گردید. نیروی تحریک از طریق یک میله به توزیع کننده نیرو در داخل گریپر انتقال می‌یابد. بدنه اصلی گریپر، مکانیزم اسکات-راسل و لغزنده با استفاده از پرینتر سه بعدی و از ماده PLA ساخته شدند. جهت تأمین یک سطح یکنواخت و تخت برای مونتاژ ریل‌ها، یک صفحه مدور از جنس اکریلیک با ضخامت  $4/5$  میلی‌متر بریده شده و زیر بدنه اصلی گریپر قرار گرفت. سه ریل راهنمای خطی برای حفظ راستا و حرکت پدهای چسبنده زیر صفحه اکریلیک مونتاژ گردید. سفتی فنر توزیع کننده و برگشت به ترتیب 200 و 4 نیوتن بر میلی‌متر هستند. در این پژوهش پدهای چسبنده شامل یک پستی صلب از جنس اکریلیک می‌باشد که بر روی آن یک فوم سیلیکونی با استفاده از چسب دو لایه چسبانده شده و میکرو ساختار چسبنده نهایتاً با استفاده از یک لایه دیگر چسب دو لایه بر روی فوم سیلیکونی قرار می‌گیرد.

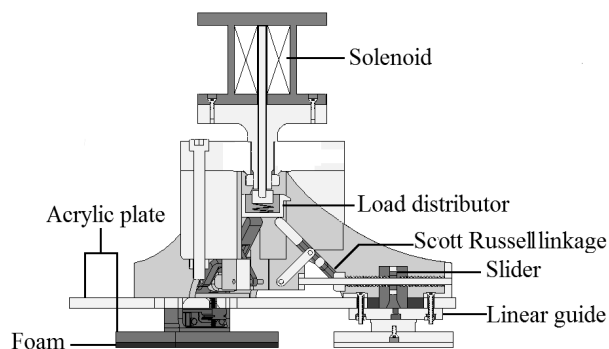


Fig. 6 Cross-section of proposed gripper

شکل 6 مدل برش خورده گریپر پیشنهادی

مبنای اتصال به یک سولنوئید انجام می‌پذیرد. هدف از طراحی مکانیکی این گریپر طراحی مکانیزمی است تا جابجایی میله هسته سولنوئید را به نیروی برشی در پدهای چسبنده گریپر تبدیل کند. در این پژوهش، جهت تبدیل حرکت عمودی این میله به حرکت افقی پدهای چسبنده مارمولکی از مکانیزم اسکات-راسل استفاده شده است که مکانیزمی مخصوص تبدیل حرکات افقی به عمودی و بر عکس می‌باشد. نحوه عملکرد این مکانیزم در شکل 5 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است، جابجایی عمودی از شانک گریپر با استفاده از مکانیزم اسکات-راسل به جابجایی افقی پد چسبنده تبدیل می‌شود. در این تبدیل جابجایی از چندین فنر استفاده شده است. یک فنر در توزیع کننده نیرو استفاده شده است تا نیروی برشی در تمام بازوهای گریپر بطور یکنواخت توزیع شود. دو فنر در طرفین لغزنده قرار دارند؛ که فنی که در سمت راست لغزنده قرار دارد کار برگرداندن لغزنده به سر جای خود را موقع برداشتن نیرو انجام میدهد (فنر برگرداننده) و دیگری که در سمت چپ لغزنده قرار دارد به عنوان فنر محرک عمل کرده و جابجایی ورودی از شانک را به نیروی برشی متناسب با جابجایی تبدیل میکند. با تغییر دادن سفتی این فنر میتوان نیروی برشی اعمالی به پد چسبنده گریپر را کنترل کرد. سه مکانیزم اسکات-راسل در گریپر استفاده میشود (هر بازو یک مکانیزم). علت استفاده از سه بازو در گریپر این است که امکان ایجاد گشتاور در اشیایی که جابجا میشوند وجود نداشته باشد.

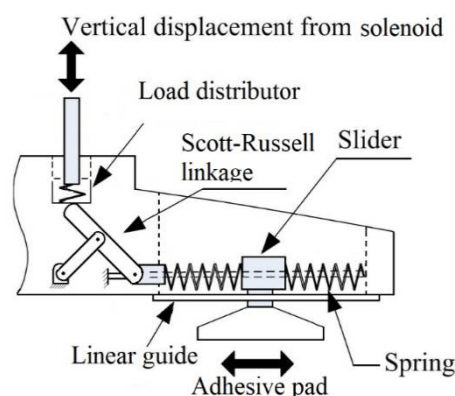
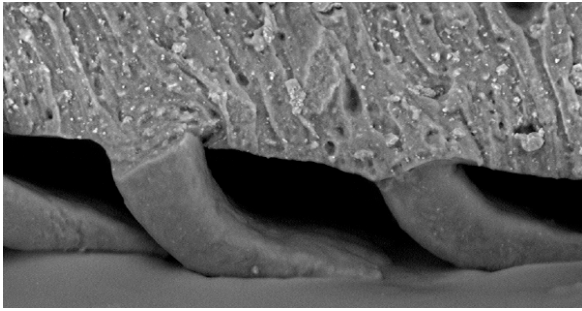


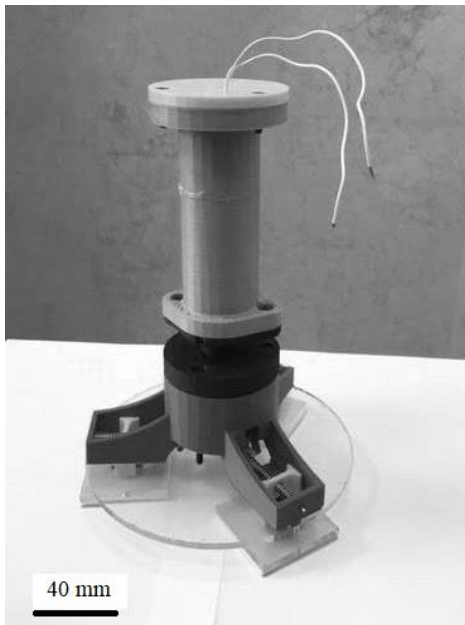
Fig. 5 Schematic diagram of the basic proposed gripper and Scott-Russell mechanism

شکل 5 دیاگرام شماتیک گریپر پیشنهادی و مکانیزم اسکات-راسل

نهایتاً یک لغزنده جابجایی را از فنر محرک به چسبنده مارمولکی منتقل می‌کند. جهت اطمینان از عدم انتقال گشتاور به پدهای چسبنده و همچنین حفظ راستای حرکتی، در هر



**Fig. 9** Gecko-like stalks in engagement situation  
 شکل 9 ساقه‌های چسبنده مارمولکی در موقعیت درگیری با سطح قطعه کار



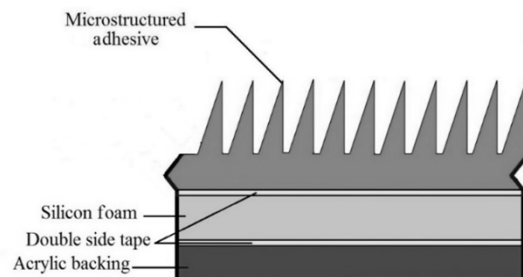
**Fig. 10** A solenoid actuated gripper using gecko-like adhesive  
 شکل 10 گریپر ساخته شده با تحریک سولونوئید و استفاده از چسبندگی مارمولکی

در این مجموعه آزمایشگاهی از یک سنسور برای اندازه‌گیری نیروی چسبندگی استفاده شده است. سنسور داخل یک سازه پایه مقید و ثابت شده و صفحات مورد تست بر روی آن پیچ می‌شوند، بطوری‌که همه درجات آزادی آن سلب شده و گریپر هنگام تست بر روی صفحه قرار می‌گیرد. با توجه به ثابت بودن صفحات بر روی سنسور، وزن و ابعاد صفحات مورد تست در محاسبات تنش نرمال وارد نشده و فقط ابعاد پدهای چسبنده و نیروی اندازه‌گیری شده در محاسبات وارد میشوند. بعد از تحریک گریپر، به پدهای چسبنده نیروی برشی وارد شده و به سطح صفحه می‌چسبد. سپس گریپر بصورت دستی از روی صفحه کنده شده (صفحه مورد تست ثابت است) و نیروی نرمال اعمال شده به صفحه مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود. جهت دریافت سیگنال‌های خروجی سنسور از یک کارت مبدل آنالوگ

برای ساخت میکروساختارهای گوه‌ای شکل چسبنده، یک ماده PDMS مطابق دستورالعمل سازنده آماده شده و در محفظه خلا حباب زدایی می‌شود. PDMS مورد استفاده در این پژوهش یک ماده الاستومر با نام تجاری سیلگارد-۱۷۰ می‌باشد. این ماده بعد از حباب زدایی بر روی سطح قالب ریخته شده و در دستگاه سانتریفیوژ به مدت 30 ثانیه با سرعت 1200 دور در دقیقه چرخانده می‌شود تا یک لایه نازکی از چسبنده با ضخامت یکسان بر روی سطح قالب قرار گیرد. سپس قالب به همراه چسبنده در کوره قرار گرفته و در دمای 60 درجه سانتی‌گراد به مدت 60 دقیقه پخته می‌شود. چسبنده مصنوعی مارمولکی پخته شده از روی قالب برداشته شده و با استفاده از چسب دو لایه بر روی سطح فوم پد چسبانده می‌شود. قالب مورد استفاده دارای حفره‌های میکرونی به شکل مادگی گوه است که این حفره‌ها به روش لیتوگرافی بر روی سطح قالب ایجاد می‌شود. شکل 7 ساختار لایه ای پدهای چسبنده و شکل 8 تصویر SEM میکرو ساختارهای چسبنده مارمولکی و مشخصات هندسی آن را نشان می‌دهد. شکل 9 چسبنده مارمولکی را در لحظه تماس با شی مورد جابجایی نشان می‌دهد و شکل 10 گریپر ساخته شده با مکانیزم اسکات-راسل را نشان می‌دهد.

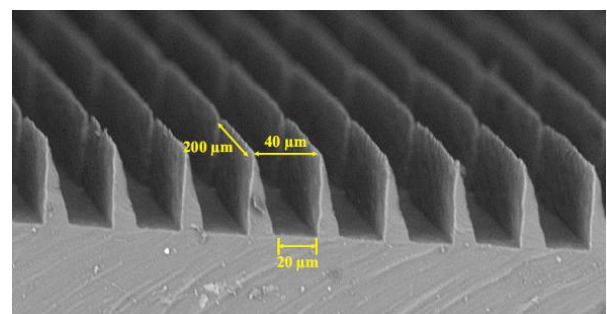
### 5- ارزیابی گریپر ساخته شده

برای ارزیابی گریپر ساخته شده یک مجموعه آزمایشگاهی آماده گردید.



**Fig. 7** Schematic view of adhesive layers

شکل 7 نمای شماتیک لایه‌های چسبنده



**Fig. 8** Geometrical specification of gecko-like adhesive

شکل 8 تصویر و مشخصات هندسی چسبنده‌های مارمولکی

نتایج نشان داده شده در دو حالت نیروی پیش-بار کمتر و بیشتر از 15 نیوتن می‌باشد. نتایج نشان داده شده در این دو شکل اخیر نشانگر افزایش قابل توجه در نیروی چسبندگی با افزایش نیروی پیش-بار است. نتایج آزمایش‌ها نشان دهنده ماکزیمم نیروی چسبندگی در اکریلیک می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده از شکل 12 نشان دهنده 20% افزایش در بیشینه نیروی چسبندگی اندازه‌گیری شده در مقایسه با گریپر تاندونی قبلی [14] است. این نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر مکانیزم اسکات-راسل در انطباق با سطوح در مقایسه با مکانیزم تاندونی است.

### 6- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک گریپر الهام گرفته از چسبندگی مارمولکی و سیستم تحریک سولونوئیدی معرفی شد. این گریپر برای توسعه گریپرهای قبلی، که عمدتاً مکانیزم تاندونی داشتند، طراحی و ساخته شد. این گریپر شامل سه بازو است که در آنها با استفاده از نیروی محرکه سولونوئید و مکانیزم اسکات-راسل نیروی برشی به پدهای چسبنده اعمال گردیده و با تغییر سفتی فنر محرک می‌توان فشار چسبندگی را کنترل کرد. عملکرد این گریپر در تست‌ها موفقیت آمیز بوده و گریپر موفق به اعمال نیروی چسبندگی و برداشتن قطعات شد. نیروی چسبندگی در گریپر اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نشان دادند:

- 1- با افزایش نیروی پیش-بار نیروی چسبندگی به شکلی تقریباً خطی و بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت.
- 2- نتایج حاصل از تست مواد مختلف نیز نشان دادند که فشار چسبندگی با اعمال نیروی پیش بار بیش از 15 نیوتن به ترتیب در اکریلیک، شیشه و فولاد بالاترین مقدار خود را دارد.

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، نشان دهنده 20% افزایش در بیشینه نیروی چسبندگی اندازه‌گیری شده در مقایسه با گریپر تاندونی قبلی بود. همچنین از نظر هزینه ساخت گریپر، هزینه ساخت گریپر با سیستم تحریک سولونوئیدی یکدهم هزینه ساخت گریپر موجود با سیستم تحریک شاک است.

### 7- تقدیر و تشکر

از معاونت پژوهشی دانشگاه اراک برای حمایت از این پژوهش طی قرارداد 96/12588 مورخ 1396/10/18 تشکر و قدردانی می‌شود.

به دیجیتال و نرم افزار Labview استفاده گردید. در این پروژه نیرو در راستای عمودی (نیروی نرمال چسبندگی) اندازه‌گیری شد. مقدار نیروی اندازه‌گیری شده بعد از کسر شدن وزن گریپر از نیروی کلی اندازه‌گیری شده بدست می‌آید. نتایج آزمایشات در رطوبت 45-50% و دمای 20 درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است. در این آزمایشات برای تغییر نیروی برشی و چسبندگی مقدار نیروی پیش-بار عمودی گریپر بصورت دستی تغییر داده شد. با افزایش نیروی پیش-بار مقدار انطباق سطح چسبنده با سطح ماده مورد جابجایی افزایش می‌یابد و به تبع آن نیروی چسبندگی نیز زیاد می‌شود.

تغییرات نیروی چسبندگی در مقابل نیروی پیش-بار در شکل 11 برای سیلگارد-170 بر روی شیشه نشان داده شده است. شکل 12 میانگین فشار چسبندگی اندازه‌گیری شده در تنش‌های برشی مختلف را برای 3 ماده مختلف (فولاد، شیشه و اکریلیک) را با استفاده از سیلگارد-170 نشان می‌دهد. در این مرحله از آزمایش‌ها هر ماده 10 بار تست گردید.

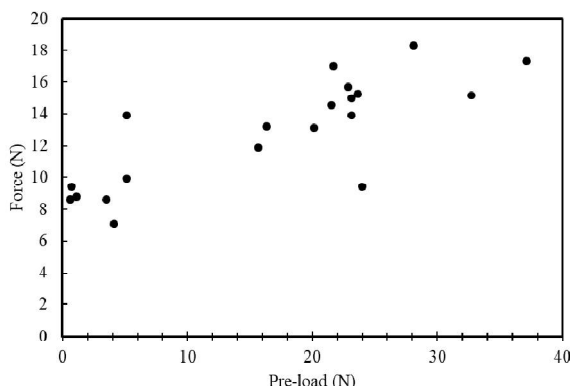


Fig. 11 Measured normal adhesion versus preload for glass

شکل 11 تغییرات نیروی چسبندگی نرمال اندازه‌گیری شده شیشه در مقابل نیروی پیش‌بار

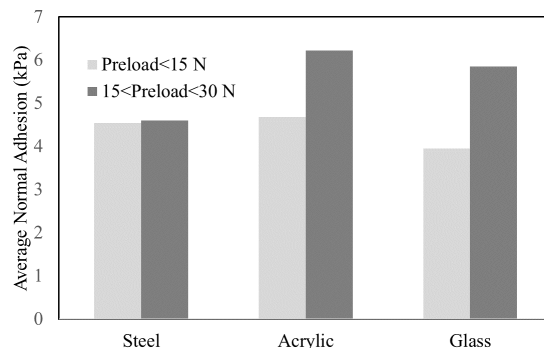


Fig. 12 Average measured normal adhesion for steel, acrylic and glass

شکل 12 میانگین نیروی چسبندگی نرمال اندازه‌گیری شده برای فولاد، اکریلیک و شیشه

8- مراجع

- displaying gecko-like dynamic adhesion, directionality and long lifetime, *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 48, pp. 1-9, 2009.
- [11] E. W. Hawkes, H. Jiang, M. R. Cutkosky, Three-dimensional dynamic surface grasping with dry adhesion, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 943–958, 2016.
- [12] E. W. Hawkes, D. L. Christensen, A. K. Han, H. Jiang, M. R. Cutkosky, Grasping without squeezing: Shear adhesion gripper with fibrillar thin film, *Proceeding of 16 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2305–2312, 2015.
- [13] M. A. Estrada, B. Hockman, A. Bylard, E. W. Hawkes, M. R. Cutkosky, M. Pavone, Free-flyer acquisition of spinning objects with gecko-inspired adhesives, *Proceeding of 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 4907–4913, 2016.
- [14] M. Dadkhah, Z. Zhao, N. Wettels, M. Spenko, A self-aligning gripper using an electrostatic/gecko-like adhesive, *Proceeding of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1006–1011, 2016.
- [15] H. Jiang, E. W. Hawkes, C. Fuller, M. A. Estrada, S. A. Suresh, N. Abcouwer, A. K. Han, S. Wang, C. J. Ploch, A. Parness, et al., A robotic device using gecko-inspired adhesives can grasp and manipulate large objects in microgravity, *Science Robotics*, Vol. 2, No.7, pp. 1-11, 2017.
- [16] D. Santos, M. Spenko, A. Parness, S. Kim, M. Cutkosky, Directional adhesion for climbing: theoretical and practical considerations, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 21, No. 12–13, pp. 1317–1341, 2007.
- [17] A. del Campo, C. Greiner, E. Arzt, Contact shape controls adhesion of bioinspired fibrillar surfaces, *Langmuir*, Vol. 23, pp. 10235-10243, 2007.
- [18] D. Tao, X. Gao, H. Lu, Z. Liu, Y. Li, H. Tong, N. Pesika, Y. Meng, Y. Tian, Controllable anisotropic dry adhesion in vacuum: Gecko inspired wedged surface fabricated with ultraprecision diamond cutting, *Advanced Functional Material*, Vol. 27, pp. 1-9, 2017.
- [1] K. Autumn, M. Sitti, Y. A. Liang, A. M. Peattie, W. R. Hansen, S. Sponberg, T. W. Kenny, R. Fearing, J. N. Israelachvili, R. J. Full, Evidence for van der waals adhesion in gecko setae, *Proceedings of National Academic Sciences*, Vol. 99, No. 19, pp. 12252–6, 2002.
- [2] K. Autumn, A. Dittmore, D. Santos, M. Spenko, M. Cutkosky, Frictional adhesion: a new angle on gecko attachment, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 209, No. 18, pp. 3569–3579, 2006.
- [3] K. Autumn, W. Hansen, Ultrahydrophobicity indicates a non-adhesive default state in gecko setae, *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology*, Vol. 192, pp. 1205-1212, 2006.
- [4] K. Johnson, K. Kendall, A. Roberts, Surface energy and the contact of elastic solids, *Proceeding of Royal Society A*, Vol. 324, No. 1558, pp. 301–313, 1971.
- [5] K. Kendall, Thin-film peeling - elastic term, *Journal of Physic :D Applied Physic*, Vol. 8, No. 13, pp. 1449–1452, 1975.
- [6] K. Autumn, A. Dittmore, D. Santos, M. Spenko, M. Cutkosky, Frictional adhesion: a new angle on gecko attachment, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 209, pp. 3569-3579, 2006.
- [7] A. del Campo, E. Arzt, Fabrication approaches for generating complex micro-and nanopatterns on polymeric surfaces, *Chemical Review*, Vol. 108, No. 3, pp. 911-945, 2008.
- [8] S. Song, C. Majidi, M. Sitti, Geckogripper: A soft, inflatable robotic gripper using gecko-inspired elastomer micro-fiber adhesives, *Proceeding of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Chicago, USA September 14-18, 2014.
- [9] S. Song, D.-M. Drotlef, C. Majidi, M. Sitti, Controllable load sharing for soft adhesive interfaces on three-dimensional surfaces, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, pp. 4344-4353, 2017.
- [10] A. Parness, D. Soto, N. Esparza, N. Gravish, M. Wilkinson, K. Autumn, M. Cutkosky, A microfabricated wedge-shaped adhesive array