

طراحی مفصل امن منفعل در بازوی ربات با استفاده از مکانیزم چهارمیله‌ای

رقیه حسن زاده

حمیدرضا محمدی دانیالی*

مرتضی دردل

دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، به دلیل گسترش تعامل انسان و ربات بالاخص در ربات‌های خدمات رسان، امنیت ربات و انسان در برابر برخوردهای محیطی مورد توجه قرار گرفته است. یک ربات امن می‌تواند توسط سامانه نرم فعال و یا منفعل امن گردد. بازوی امن با سامانه نرم منفعل حاوی مولفه‌های مکانیکی چون فنر برای جذب نیروی اضافی برخورد و کاهش آن می‌باشد. مفاصل امن مکانیزمی با سامانه فنر غیرخطی یکی از انواع آنهاست که در آن از مکانیزمی به همراه جاذبی چون فنر استفاده می‌شود. این مکانیزم قادر است به محض برخورد با گشتاور حد، با جذب نیرو توسط فنر موجب افت گشتاور وارده گردد تا امنیت تامین شود. در مقابل برای مقادیر نیروی کمتر از گشتاور حد، رفتار صلب داشته باشد تا از دقت موقعیت‌دهی مفصل نگاهد. در این مقاله، طراحی مفاصل امن لولایی توسط مکانیزم چهارمیله‌ای صفحه‌ای به همراه فنر پیچشی مدنظر قرار می‌گیرد. این طراحی، مفصل را برای مقادیر بالای گشتاور ورودی قبل از برخورد صلب کرده اما به محض ورود گشتاور حدی برخورد، با افت گشتاور نسبت به جابجایی زاویه‌ای عضو بازو امنیت را تا حد ممکن تامین می‌کند. همچنین نشان می‌دهیم که از نقاط تکین مکانیزم چهارمیله‌ای می‌توان برای طراحی مفصل امن طوری بهره گرفت که بتوان در موقعیت‌های گوناگون رفتار متفاوتی را از مفصل انتظار داشت. **واژه‌های کلیدی:** امنیت، مفصل امن مکانیزمی، مکانیزم چهارمیله‌ای، نیرو/گشتاور حدی، تکینگی سینماتیکی.

Designing Passive Safe Joint of a manipulator by the Planar Four bar Mechanism

R. Hasanzade

Department of Mechanical Engineering, Babol Nooshirvani University of Technology, Babol, Iran

H. R. Mohammadi Daniali

Department of Mechanical Engineering, Babol Nooshirvani University of Technology, Babol, Iran

M. Dardel

Department of Mechanical Engineering, Babol Nooshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

In recent years, because of expanding human-robot interaction, especially in collaborative robots, safety in collision between a human and a robot has drawn much attention. A safe manipulator can be equipped with either active or passive system. A safe manipulator with a passive system usually consists of a mechanical elements, such as a spring which can absorb the collision force and reduce it. These joints are composed of a spring-loaded mechanism which is capable of acting as soon as a torque is dealt with, and by absorbing force from the spring causing the torque to fall to a safety limit. But for a torque lower than a limit, the rigid behavior of the manipulator which is necessary for the accurately is guaranteed. In this paper, design of revolute joint with nonlinear spring system is considered by a four-bar mechanism with a linear torsion spring so that it can be stiff for high values of an input torque for normal operation, but immediately after collision the torque will drop to its safety limit. We also show that the singularities of the four-bar mechanism can be used to design a secure joint so that the different behavior of the joint can be expected in different situations.

Keywords: Safety, Safe Joint Mechanism, Threshold Force/Torque, Four bar Mechanism, Kinematic Singularity

۱- مقدمه

امروزه به دلیل گسترش ربات‌های خدماتی که در ارتباط مستقیم با انسان^۱ می‌باشند، مسئله‌ی امنیت انسان و ربات در تعامل با یکدیگر مورد توجه قرار گرفته است [۱]. در اثر برخورد تصادفی بین انسان و ربات امنیت انسان به مخاطره می‌افتد و از طرفی برخورد تصادفی ربات با محیط اطرافش نیز هزینه‌های تعمیر و ساخت ربات را افزون می‌سازد. بنابراین موضوع امنیت یکی از مسائل مهم در طراحی این

نوع از ربات‌ها می‌باشد. بدین جهت، انواع مختلفی از مفاصل نرم^۲ و عضوهای نرم^۳ برای حفظ امنیت پیشنهاد شده‌اند.

یک بازو می‌تواند به صورت سامانه فعال^۴ و یا منفعل^۵ امن گردد. در نوع فعال آن، برخورد توسط حسگر تشخیص داده شده و نرمی بازو نیز قابل کنترل است. در این نوع علاوه بر هزینه‌ی بالا، افزایش وزن و اندازه‌ی ربات، محدودیت کاری نیز به دلیل وجود حسگر و سیستم فعال کاربرشان را دچار چالش می‌کند [۲، ۳]. ربات امن با نرمی منفعل^۶ از

2 Compliance joints

3 Flexible links

4 Active Compliance System

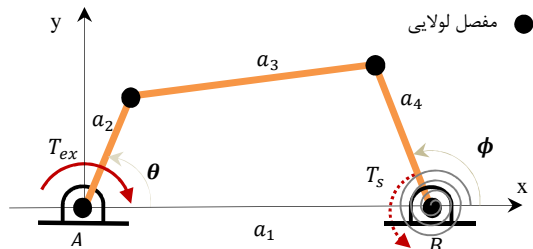
5 Passive Compliance System

6. Passive Compliance

¹ Physical Human Robot Interaction (pHRI)

۲- مکانیزم چهارمیله‌ای صفحه‌ای

یکی از متداول‌ترین مکانیزم‌ها، مکانیزم چهار میله‌ای صفحه‌ای است (شکل ۱). این مکانیزم از یک عضو ثابت a_1 و سه عضو متحرک تشکیل شده‌است که توسط چهار مفصل لولایی به یکدیگر متصل‌اند. اعضای a_2 و a_4 به ترتیب عضو ورودی و خروجی‌اند که از یک سو به عضو ثابت و از سوی دیگر به عضو واسط a_3 متصل شده‌اند.



شکل ۱- مکانیزم چهارمیله ای صفحه‌ای

در این مکانیزم با داشتن طول اعضای مکانیزم، رابطه‌ی بین جابجایی زاویه‌ای عضو ورودی θ و عضو خروجی ϕ نسبت به چارچوب مفروض، توسط معادله زیر که به فرودنشست‌این شهرت دارد، قابل بیان است،

$$k_1 + k_2 \cos \phi - k_3 \cos \theta = \cos(\theta - \phi) \quad (1)$$

که مقادیر ثابت آن به صورت زیر می‌باشند،

$$k_1 = \frac{a_1^2 + a_2^2 + a_4^2 - a_3^2}{2a_2a_4}, k_2 = \frac{a_1}{a_2}, k_3 = \frac{a_1}{a_4} \quad (2)$$

با توجه به رابطه (۱) با معلوم بودن زاویه‌ی عضو ورودی، زاویه‌ی عضو خروجی نسبت به چارچوب به صورت زیر قابل محاسبه است؛

$$\text{ابتدا با تعریف } T = \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \text{ داریم،} \quad (3)$$

$$\sin \phi = \frac{2T}{1+T^2}, \cos \phi = \frac{1-T^2}{1+T^2}$$

که با جاگذاری روابط (۳) در رابطه‌ی (۱)، معادله‌ی زیر حاصل می‌گردد:

$$A(\theta)T^2 + 2B(\theta)T + C(\theta) = 0 \quad (4)$$

که در آن $A(\theta)$ ، $B(\theta)$ و $C(\theta)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A(\theta) = k_1 - k_2 + (1 - k_3) \cos \theta, B(\theta) = -\sin \theta \quad (5)$$

$$C(\theta) = (k_1 + k_2) - (1 + k_3) \cos \theta$$

با حل معادله‌ی (۴)، مقدار ϕ با رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است،

$$\text{یعنی:} \quad (6)$$

$$T = \frac{-B(\theta) \pm \sqrt{\Delta(\theta)}}{A(\theta)}$$

که $\Delta(\theta)$ به صورت زیر است:

$$\Delta(\theta) = (1 - k_1^2 + k_2^2) + 2(k_1k_3 - k_2) \cos \theta - k_3^2 \cos^2 \theta \quad (7)$$

در صورت وجود پاسخ $\Delta(\theta) > 0$ ، به ازای هر مقدار θ دو مقدار برای ϕ برقرار است که موید دو شاخه در این مکانیزم می‌باشد.

مطابق شکل ۱، چنانچه گشتاور ورودی حول مفصل A را که حاصل از گشتاور برخورد می‌باشد با T_{ex} نمایش داده و گشتاور حاصل از فنر

المان‌های انعطاف پذیر اعم از فنر و جاذب^۱ تشکیل شده‌است که نیروی اضافی ناشی از برخورد را جذب می‌کند. از آنجا که در این ربات‌ها نیازی به حسگر و سامانه کنترل و تشخیص نمی‌باشد، می‌تواند سریعتر عمل کرده و قابل اعتمادتر در برخوردها باشند. مفاصل امن مختلفی بر اساس نرمی منفعل پیشنهاد شدند که در آنها از یک موتور برای دقت موقعیت دهی و موتور دیگر برای تنظیم سفتی استفاده می‌شود [۴-۶]. وجود موتور دوم در آنها معضلاتی چون افزایش وزن و هزینه را به همراه دارد.

پارک و همکارانش سامانه منفعل غیرخطی که شامل صرفاً مولفه‌های مکانیکی می‌باشند، در مفاصل و عضو بازوی امن معرفی کردند [۷-۱۰]. این سامانه بدون حضور موتور دوم به محض برخورد بازو با نیرو/گشتاور حدی^۲ عمل می‌کند. نیرو/گشتاور حدی مقدار نیرویی است که موجب آسیب و جراحات بدن انسان می‌شود. این دسته از مفاصل لولایی به مفاصل امن مکانیزمی^۳ (SJM) معروفند که از یک صفحه‌ی پایه تشکیل شده که از یک سمت حاوی یک مکانیزم صفحه‌ای دوگانه به همراه فنر خطی است و از سوی دیگر به موتور کوپل گردیده و عضو ربات مستقیماً به این مکانیزم متصل است. عضو ربات به واسطه این مکانیزم، قادر است در برابر مقادیر نیرویی کمتر از نیروی حدی که در تعادل با پیش فشردگی اولیه فنر است، رفتار صلب داشته باشد اما به محض برخوردش با نیرویی بیش از حد، مکانیزم عمل کرده و فنر با جذب نیرو، گشتاور خارجی را کنترل کرده و این امر به نوبه خود موجب امنیت می‌گردد.

چالش مهم در طراحی مفاصل امن، ایجاد تعادل بین دو خاصیت متضاد دقت و امنیت در طراحی بازو است؛ از آن جهت که برای افزایش دقت ضروری است که مفصل در برخورد با مقادیر نیرو/گشتاور بیش از حد، رفتار صلب داشته باشد حال آنکه برای افزایش امنیت در برخورد با مقدار بیش از حد، نیرو/گشتاور افت کند. بنابراین با وجود اینکه فنرها جاذب خوبی برای جذب نیرو هستند اما استفاده‌ی مستقیم از آنها در مفصل به دلیل متناسب بودن نیرو با جابجایی مناسب نیست. بنابراین طراحی مکانیزمی حاوی فنر که به محض اعمال نیرو/گشتاوری بیشتر از مقدار حد، با جذب آن توسط فنر از افت بیشتر مقدار آن و بالتبع افت سفتی برخوردارند، کمک شایانی به عملکرد امن‌تر این مفاصل خواهد کرد. در این مفاصل نیروی پیش فشردگی اولیه‌ی فنر موجب می‌گردد تا عضو بازو برای نیرو/گشتاورهای اعمالی کمتر از مقدار حدی به مانند مفاصل صلب عمل کرده و از دقت بیشتری برخوردار باشند.

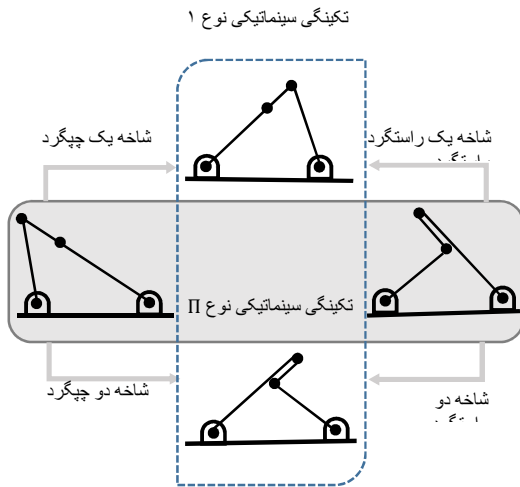
در این مقاله مکانیزم چهار میله‌ای صفحه‌ای با عضوها و مفاصل صلب برای SJM در نظر گرفته شده‌است که پیشتر انجام نشده بود. این مکانیزم حاوی فنر پیش‌سختی خطی است که به هدف کاربرد در مفاصل امن مکانیزمی نوع لولایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به روابط استاتیکی بین نیروی فنر و گشتاور ورودی در این مکانیزم، طراحی بر اساس نقاط تکینگی سینماتیکی این مکانیزم پیشنهاد می‌شود.

1 Damper

2 Threshold Force/Torque

3 Safe Joint Mechanism(SJM)

ممکن خواهد بود. در تکینگی سینماتیکی نوع I برعکس نوع II مقدار حداقل نیرو در عضو ورودی مقادیر بزرگی از نیرو در عضو خروجی را متعادل می‌سازد. بدین ترتیب دو وضعیت ساختاری برای تکینگی نوع II (شکل ۲ کادر خاکستری) و نیز دو وضعیت برای نوع I (شکل ۲ کادر خط‌چین) قابل توصیف است که چهار شاخه‌ی حرکتی را که افت گشتاور را به محض ورود گشتاور حدی ممکن می‌سازد، مشخص می‌کند. این شاخه‌ها با توجه به جهت گشتاور خارجی به ترتیب شاخه‌ی یک و دوی چپگرد و شاخه‌ی یک و دوی راستگرد نامگذاری شده‌اند.



شکل ۲- نمایش شاخه‌های حرکت با استفاده از تکینگی سینماتیکی

با توجه به شکل ۲ در هر دو نوع تکینگی، تشکیل یک مثلث توسط عضوهای مکانیزم مشهود است. بنابراین شرط وجود تکینگی نوع II را با شروط نامساوی در تشکیل یک مثلث می‌توان تحقیق کرد. این، سه شرط نامساوی برای تکینگی نوع II به صورت‌های زیر خواهد بود:

$$c_1 < a_1 + a_2, \quad a_1 < c_1 + a_2, \quad a_2 < c_1 + a_1 \quad (13)$$

که $C_1 = a_4 + a_3$ است، چنانچه عضو خروجی با عضو واسط در وضعیت کشیدگی باشد و $C_1 = |a_4 - a_3|$ اگر وضعیت تاشدگی عضو خروجی با عضو واسط مدنظر باشد. به همین ترتیب شرط تشکیل مثلث‌های مرتبط با تکینگی نوع I نیز با توجه به شکل ۲ به واسطه‌ی تاشدگی و کشیدگی عضو ورودی با عضو واسط به صورت زیر خواهد بود،

$$c_2 < a_1 + a_4, \quad a_1 < c_2 + a_4, \quad a_4 < c_2 + a_1 \quad (14)$$

که $C_2 = a_2 + a_3$ است، چنانچه عضو ورودی با عضو واسط در وضعیت کشیدگی باشد و $C_2 = |a_2 - a_3|$ هرگاه عضو ورودی با عضو واسط در وضعیت تاشدگی باشد. بازه حرکت عضو ورودی با استفاده از رابطه‌ی کسینوس‌ها قابل حصول است. ابتدای این بازه از موقعیت مکانیزم در تکینگی سینماتیکی نوع II با θ و انتهای آن نیز که به تکینگی نوع I ختم می‌شود، با θ_f فرض شده است.

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + a_2^2 - c_1^2}{2a_1a_2} \right) \quad (15)$$

$$\theta_f = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + c_2^2 - a_4^2}{2a_1c_2} \right) \quad (16)$$

پیچشی حول مفصل B را با T_s نشان دهیم، با فرض عدم اتلاف انرژی و با استفاده از اصل کار مجازی به ازای جابجایی‌های کوچک برای دو نیروی گشتاور خارجی و گشتاور فنر پیچشی داریم:

$$T_{ex} d\theta + T_s d\phi = 0 \longrightarrow T_{ex} = -T_s \frac{d\phi}{d\theta} \quad (8)$$

که چنانچه T_s پادساعتگرد (CCW) باشد، با علامت مثبت در رابطه‌ی فوق لحاظ می‌شود. همچنین تغییرات زاویه‌ای عضو ورودی نسبت به خروجی $\frac{d\phi}{d\theta}$ ، با مشتق‌گیری از رابطه (۱) قابل حصول است،

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{k_3 \sin \theta - \sin(\phi - \theta)}{k_2 \sin \phi - \sin(\phi - \theta)} \quad (9)$$

از طرفی در طی حرکت اعضای مکانیزم، نیروی گشتاور فنر از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$T_s = T_{s0} + K \Delta\phi, \quad \Delta\phi = \phi - \phi_0 \quad (10)$$

K و ϕ_0 به ترتیب ثابت فنر، موقعیت زاویه‌ای اولیه‌ی عضو خروجی و گشتاور ناشی از پیش فشردگی اولیه‌ی فنر است. همچنین از جایگذاری رابطه‌ی (۹) و (۱۰) در رابطه‌ی (۸)، گشتاور خارجی به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$T_{ex} = -(T_{s0} + K \Delta\phi) \frac{k_3 \sin \theta - \sin(\phi - \theta)}{k_2 \sin \phi - \sin(\phi - \theta)} \quad (11)$$

گشتاور حدی بیشترین گشتاوری است که مکانیزم می‌تواند تحمل کند بدون اینکه فنر جمع شده و از وضعیت اولیه‌ی خود خارج شود. گشتاور حدی برابر است با گشتاور ناشی از پیش فشردگی اولیه‌ی فنر در موقعیت زاویه‌ای اولیه‌ی عضو ورودی θ_0 و عضو خروجی. با توجه به رابطه‌ی (۱۱) گشتاور حدی به صورت زیر خواهد بود.

$$T_{th} = -T_{s0} \frac{d\phi}{d\theta} \Big|_{\theta_0, \theta_0} \quad (12)$$

۳- شاخه‌های افت گشتاور

ربات امن بایستی در وضعیت قبل از برخورد سفتی بالایی را به جهت دقت کاری بالا داشته باشد اما به محض برخورد با گشتاوری بیش از گشتاور حدی، دچار افت مقدار گشتاور شود تا امنیت را برقرار کند. جستجوی وضعیت اولیه‌ای که مکانیزم مذکور بتواند گشتاور بالایی را تحمل کند و مسیر حرکتی که پس از ورود گشتاور حدی، از افت میزان گشتاور نسبت به جابجایی برخوردار باشد، در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

یک مکانیزم از صلبیت معقولی برخوردار خواهد بود اگر با مقدار کمی از نیروی پیش فشردگی فنر بتوان مقادیر بالایی از گشتاور ورودی را متعادل ساخت [۹]. این امر با توجه به رابطه‌ی (۱۱)، در موقعیتی که گشتاور مقدار بیشینه حدی را دارد، ممکن خواهد بود. این موقعیت با همراستا شدن عضو سه و چهار رخ می‌دهد که معادل موقعیت تکینگی سینماتیکی نوع II است که در آن، گشتاور ورودی به ازای گشتاور خروجی ثابت، مقدار بیشینه خود را دارد [۱۱، ۱۲]. تکینگی سینماتیکی نوع II زمانی اتفاق می‌افتد که عضو ورودی به نقطه‌ی مرگ خود می‌رسد و در این شرایط، حد بالایی از گشتاور در عضو ورودی، معادل با مقادیر ناچیزی از نیرو در عضو خروجی خواهد شد. از طرفی دیگر، موقعیتی که در آن گشتاور کمینه می‌گردد برای تضمین امنیت و افت گشتاور پس از برخورد، مفید خواهد بود. با توجه به رابطه‌ی (۱۱)، با همراستا شدن عضو دو و سه که در تکینگی سینماتیکی نوع I اتفاق می‌افتد، این امر

با توجه به مطالب بیان شده، در جدول ۱، C_1 و C_2 مربوط به هر شاخه به اضافه‌ی جهت گشتاور خارجی و گشتاور فنر هر شاخه آمده است.

شاخه	جهت T_{ex}	جهت T_s	C_1	C_2
۱	CW	CCW	$a_4 + a_3$	$a_2 + a_3$
۲	CW	CW	$a_4 + a_3$	$ a_2 - a_3 $
۱	CCW	CCW	$ a_4 - a_3 $	$a_2 + a_3$
۲	CCW	CW	$ a_4 - a_3 $	$ a_2 - a_3 $

۴- مکانیزم گراشفی

مکانیزم گراشفی به مکانیزمی گفته می‌شود که در آن حداقل یک عضو نسبت به عضو ثابت قابلیت دوران کامل را دارد. گراشف شرط لازم و کافی برای این امر را به صورت یک نامساوی ($s < p \leq s + l$) بیان کرد که s و l به ترتیب اندازه کوتاهترین و بلندترین عضو و p و q اندازه دو عضو دیگرند. همانطور که در قسمت قبل گفته شد، طراحی مکانیزم مفصل در موقعیت اولیه در نزدیکی تکنیکی نوع II تضمین کننده‌ی دقت بالا قبل از برخورد می‌شود. از سوی دیگر به جهت امنیت پس از برخورد نیز، وجود تکنیکی نوع I نیز در تعیین بازه جابجایی مکانیزم برای افت گشتاور پس از برخورد مفید است. در این بخش، صحت وجود تکنیکی مطابق با روابط (۱۳) و (۱۴) در انواع گراشفی این مکانیزم بررسی می‌گردد [۱۳].

الف- چنانچه $C_1 = a_4 + a_3$ فرض شود، شرط اول رابطه‌ی (۱۳) به صورت نامساوی $a_4 + a_3 < a_1 + a_2$ خواهد شد که در مقایسه با رابطه‌ی گراشف، در صورتی برقرار است که $s = a_3$ یا $s = a_4$ باشد، یعنی کوتاهترین عضو، عضو سه یا چهار باشند که به ترتیب انواع مکانیزم‌های آونگ-آونگ^۱ و آونگ-لنگ^۲ می‌باشند. اگر $s = a_3$ باشد، مطابق رابطه‌ی گراشف، سه نامساوی (۱۵) حاصل می‌گردد. بدین صورت که اگر حاصل جمع طول کوتاهترین عضو با بلندترین عضو کمتر از حاصل جمع دو عضو دیگر باشد، بدیهی است که حاصل جمع طول کوتاهترین عضو با طول هر عضو دیگر نیز کمتر از حاصل جمع دو عضو دیگر خواهد شد،

$$a_3 + a_4 < a_1 + a_2, \quad a_3 + a_4 < a_1 + a_2, \quad a_3 + a_2 < a_4 + a_1 \quad (۷۵)$$

دو نامساوی اول رابطه‌ی (۱۷) درستی دو رابطه‌ی دوم (۱۳) را با استنتاجی مشابه قبل مشخص می‌کند. همچنین در شرایطی که $s = a_4$ باشد، رابطه‌ی گراشف به صورت $a_4 + l \leq p + q$ خواهد شد که منجر به سه نامساوی زیر می‌گردد:

$$a_4 + a_3 < a_1 + a_2, \quad a_4 + a_1 < a_3 + a_2, \quad a_4 + a_2 < a_1 + a_3 \quad (۸۶)$$

دو نامساوی اول رابطه‌ی (۱۸) نیز صحت دو رابطه‌ی (۱۳) را با دلایلی مشابه قبل، مشخص می‌گردد. بنابراین امکان رخداد تکنیکی نوع

II، در مکانیزم‌های گراشفی فقط در انواع آونگ-لنگ و آونگ-آونگ وجود دارد.

ب- با فرض $C_1 = |a_4 - a_3|$ نیز صحت روابط (۱۳) با توجه به رابطه‌ی گراشف و رابطه‌ی (۱۷) با دلایلی مشابه بخش الف، در صورتی که $s = a_3$ یا $s = a_4$ باشد، برقرار است.

با توجه به بررسی‌های فوق، امکان رخداد هر دو تکنیکی نوع II در مکانیزم‌های گراشفی از انواع آونگ-آونگ و آونگ-لنگ وجود دارد. وجود تکنیکی سینماتیکی نوع I، با توجه به شرط گراشف، صحت روابط (۱۴) در صورتی برقرار خواهد بود که $s = a_3$ یا $s = a_2$ باشد، یعنی مکانیزم گراشفی از نوع آونگ-آونگ یا لنگ-آونگ باشد. اما مطابق بررسی‌های فوق در مکانیزم لنگ-آونگ، امکان رخداد تکنیکی نوع II وجود ندارد، بنابراین فقط مکانیزم از نوع آونگ-آونگ و آونگ-لنگ برای حصول به هدفمان در اینجا کاربرد خواهد بود. زیرا مطابق با بررسی‌های فوق، وجود تکنیکی نوع II که شرط لازم در مکانیزم‌های مفصل امن است، اثبات شده‌است.

۴-۱- نوع آونگ-آونگ

با توجه به شرط گراشف، چنانچه $s = a_3$ باشد، عضو ورودی و خروجی هر دو آونگ خواهند بود و شرط گراشف به صورت $a_3 + l \leq p + q$ خواهد شد. رفتار متفاوت این نوع مکانیزم در چهار نوع شاخه با توجه به شرط گراشف در دو دسته قابل بررسی است:

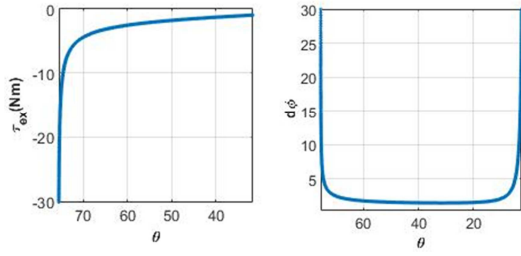
الف- با شرط گراشف $a_3 + l < p + q$ ، بر اساس بررسی‌های فوق که وجود چهار موقعیت تکنیکی سینماتیکی در مکانیزم‌های آونگ-آونگ را تایید می‌کند، هر چهار شاخه حرکت در این نوع از مکانیزم امکان‌پذیر است؛ دو شاخه به ازای گشتاور خارجی چپگرد و دو شاخه نیز به واسطه‌ی گشتاور خارجی راستگرد.

ب- شرط خاص گراشف $a_3 + l = p + q$ ، با توجه به این شرط، امکان کاربردی نبودن برخی شاخه‌ها به علت عدم برقراری روابط (۱۳) و (۱۴) و وجود تکنیکی سینماتیکی نوع III وجود دارد که در جدول ۲ آمده است. این نوع تکنیکی در موقعیت زاویه‌ای که هر دو نوع تکنیکی نوع I و II با هم رخ می‌دهند، بوجود می‌آید [۱۲].

در شکل ۳ یک SJM با یک مکانیزم چهار میله‌ای از نوع آونگ-آونگ به عنوان مثال نشان داده شده‌است. این مفصل از دو مکانیزم متقارن به دلیل امن شدن در برابر نیروی برخورد در هر دو جهت، تشکیل شده‌است. قبل از برخورد هر دو مکانیزم در نزدیکی وضعیت تکنیکی سینماتیکی نوع II توسط نیروی پیش فشردگی فنر در تعادل استاتیکی می‌باشند و به محض برخورد با نیروی حد، گشتاور خارجی توسط محور انتقال به مکانیزم انتقال می‌یابد و عضو ربات منحرف می‌شود. چنانچه مقادیر هندسی مکانیزم مفصل شکل ۳ به صورت $a_1 = 95mm, a_2 = 74mm, a_3 = 36mm, a_4 = 72mm, K = 1N.m/rad$ فرض شود، مطابق با رابطه‌های (۱۶) و (۱۷)، بازه‌ی حرکت چنین مکانیزمی مقادیر $\theta_f = 40^\circ, \theta_s = 78^\circ$ خواهد شد. همچنین با فرض پیش فشردگی اولیه به صورت $T_s = 1.3 Nm$ ، نمودار گشتاور-جابجایی در شاخه یک چپگرد آن مطابق با شکل ۴ خواهد شد که بیشترین مقدار گشتاور در 78° و مقدار صفر آن در 40° رخ می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که به محض برخورد و ورود گشتاور حدی 30 نیوتن به بازو، به ازای جابجایی زاویه‌ای تقریباً 5 درجه‌ای عضو ربات، گشتاور در حدود 25 نیوتن متر افت خواهد

¹ Rocker - Rocker
² Rocker-Crank

Π نوع II هر دو تکنیکی سینماتیکی نوع Π در زاویای $\theta_1 = 75^\circ$ و $\theta_2 = 2.13^\circ$ رخ می‌دهد. نمودار تغییرات $\frac{d\phi}{d\theta}$ نسبت به جابجایی در شکل ۵-الف نمایش داده شده است. با توجه به این نمودار، مقدار کمینه گشتاور در $\theta = 31.6^\circ$ رخ می‌دهد. بنابراین با فرض ثابت فنر و پیش فشردگی اولیه به صورت $K = 1N.m/rad$ و $T_s = 1.95N.m$ ، نمودار گشتاور-جابجایی آن در شاخه یک چپگرد مطابق با شکل ۵-ب خواهد شد. در این نمودار همانطور که مشاهده می‌شود به ازای 30° درجه جابجایی عضو ورودی حدود 30 نیوتن متر افت گشتاور خواهد داشت.



شکل ۵- تغییرات گشتاور-جابجایی یک مکانیزم نوع آونگ-آونگ با ابعاد هندسی $a_1 = 94, a_2 = 92, a_3 = 59, a_4 = 55$

۵- نتایج

این مقاله اصولی برای طراحی مفاصل امن مکانیزمی پیشنهاد داده‌است. این اصول بر اساس دو خاصیت بارز این مفاصل، حفظ دقت قبل از برخورد و حفظ امنیت ارائه شده است. نشان داده شد که خاصیت اول در صورتی تضمین خواهد شد که مکانیزم در نزدیکی تکنیکی نوع Π متعادل گردد که البته منجر به بیشینه مقدار گشتاور خارجی در عضو ورودی می‌شود. خاصیت دوم نیز با گذر مکانیزم به سمت تکنیکی نوع I و کمینه شدن گشتاور پس از برخورد ممکن خواهد شد. نتایج طراحی برای انواع گراشفی مکانیزم چهار میله‌ای صفحه‌ای حاوی فنر پیچشی نشان داد که در انواع آونگ-آونگ و آونگ-لنگ در چهار شاخه، افت مقدار گشتاور نسبت به جابجایی مشهود است. این نتایج استفاده از آنها را برای طراحی در مفصل امن کاربردی می‌سازد که در این میان نوع آونگ-آونگ وضعیت بهتری در افت گشتاور دارد. همچنین افت گشتاور برخورد برای یک نمونه از مفصل امن مکانیزمی نیز تحقیق شده است.

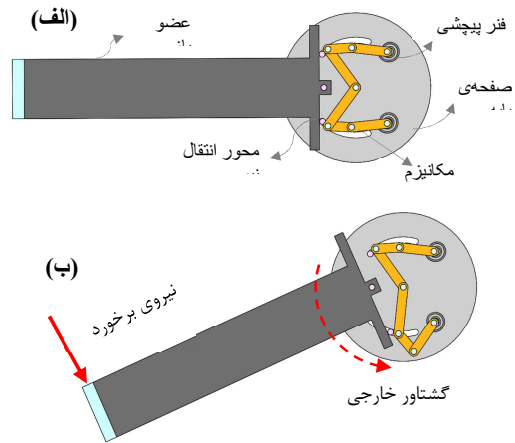
۶- مراجع

- [1] ISO 10218 I, Robots for Industrial Environments— Safety Requirements. Part1: Robot. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.
- [2] Lu Y., Zeng L., and Bone G.M. Multisensor system for safer human-robot interaction. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). IEEE, 2005.
- [3] De Luca A., Albu-Schaffer A., Haddadin S., and Hirzinger G. Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm. Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2006.
- [4] Tonietti G., Schiavi R., and Bicchi A. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast

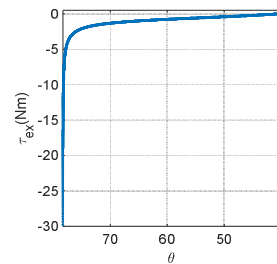
کرد و البته این میزان افت پس از 30° درجه جابجایی به صفر می‌رسد. این مکانیزم در مفصل امن قادر است بازوی یک ربات به طول 60 سانتی متر را در برخورد با نیروی بیش از 50 نیوتن امن کند و در برخورد با نیروهای کمتر از آن صلب رفتار کند.

جدول ۲- شاخه‌های معتبر در مکانیزم آونگ-آونگ

شاخه	1CCW	2CCW	1CW	2CW
$a_3 + l < p + q$	✓	✓	✓	✓
$l = a_4$			✓	✓
$l = a_1$	✓	✓		
$l = a_2$	✓	✓		
$l = a_1 = a_2$	✓	✓		
$l = a_2 = a_4$				
$l = a_1 = a_4$				



شکل ۴- SJM الف- قبل از برخورد ب- بعد از برخورد



شکل ۴- تغییرات گشتاور-جابجایی یک مکانیزم نوع آونگ-آونگ با ابعاد هندسی $a_1 = 95, a_2 = 74, a_3 = 36, a_4 = 72$

۲-۴- نوع آونگ-لنگ

همانطور که بیان شد، در این نوع از مکانیزم، وضعیت تکنیکی سینماتیکی نوع Π رخ می‌دهد اما نوع I رخ نمی‌دهد. بنابراین برای تشکیل هر شاخه بایستی مقدار کمینه محلی گشتاور خارجی بین هر دو وضعیت سینماتیکی نوع Π ، تعیین گردد. برای مثال، در یک مکانیزم چهار میله‌ای نوع آونگ-لنگ با مقادیر هندسی $a_1 = 94mm, a_2 =$

- physical human/robot interaction. Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 2005.
- [5] Bicchi A., Tonietti G., Bavaro M., and Piccigallo M. Variable stiffness actuators for fast and safe motion control. Robotics research. The eleventh international symposium. Springer, 2005.
- [6] Choi J., Hong S., Lee W., Kang S., and Kim M., A robot joint with variable stiffness using leaf springs. IEEE Transactions on Robotics. 27(2): p. 229-238, 2011.
- [7] Park J.-J., Song J.-B., and Kim H.-S., Safe joint mechanism based on passive compliance for collision safety, in Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human. Springer. p. 49-61. 2007.
- [8] Park J.-J. and Song J.-B. Safe joint mechanism using inclined link with springs for collision safety and positioning accuracy of a robot arm. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2010.
- [9] Park J.-J., Kim H.-S., and Song J.-B. Safe robot arm with safe joint mechanism using nonlinear spring system for collision safety. IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA) IEEE, 2009.
- [10] Park J.-J., Kim B.-S., Song J.-B., Kim H.-S.J.M., and Theory M., Safe link mechanism based on nonlinear stiffness for collision safety. 43(10): p. 1332-1348, 2008.
- [11] Gosselin C. and Angeles J., Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. IEEE transactions on robotics and automation. 6(3): p. 281-290, 1990.
- [12] Daniali H.R.M., Zsombor-Murray P.J., and Angeles J. Singularity analysis of a general class of planar parallel manipulators. Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1995.
- [13] Chang W.-T., Lin C.-C., and Wu L., A note on Grashof's Theorem. Journal of Marine Science and Technology. 13(4): p. 239-248, 2005.