

Design of the Bistable Compliant Four-bar Linkage with Changing the Position of the Flexible Limb

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Varedi-Koulaei S.M.^{*1} PhD,
Ghanbari F.² BSc

How to cite this article

Varedi-Koulaei S.M, Ghanbari F.
Design of the Bistable Compliant
Four-bar Linkage with Changing
the Position of the Flexible Limb.
Modares Mechanical Engineering,
2019;19(8):2047-2055.

ABSTRACT

Bistable mechanisms have two distinct stable positions that can move from one of these situations to other by a small stimulus. These stable positions, as well as the movement between them, have increased the use of these mechanisms in devices such as valves, switches, and etc. This bistable behavior is the result of the storage and release of the potential energy. Therefore, it is obvious that these mechanisms must have one or more flexible links or joints. In this paper, flexible members are modeled, using torsional springs based on the pseudo-rigid-body-model (PRBM). The existence of one flexible member is sufficient for bi-stability of the four-bar linkage. However, with changing the location of this flexible member as the input, the output, or the coupler link (or changing the location of equivalent torsional spring), various conditions are generated for the design of a four-bar linkage, which is discussed in this study. The results show that in all cases (the crank-crank, the crank-rocker, the rocker-crank, and the rocker-rocker), the equivalent torsion spring should not be connected to a smaller link in order to create a bistable four-bar linkage.

Keywords Bistable; Flexibility; Four-bar Linkage; Torsional Springs

¹Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Mechanical And Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Mechanical And Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
Phone: +98 (23) 32392204
Fax: +98 (23) 32392204
varedi@shahroodut.ac.ir

Article History

Received: August 15, 2018
Accepted: January 29, 2019
ePublished: August 12, 2019

CITATION LINKS

[1] Optimization of H4 parallel manipulator using genetic algorithm [2] Reducing the undesirable effects of joints clearance on the behavior of the planar 3-RRR parallel manipulators [3] Kinematics of an offset 3-UPU translational parallel manipulator by the homotopy continuation method [4] Identification of compliant pseudo-rigid-body four-link mechanism configurations resulting in bistable behavior [5] Compliant mechanisms [6] Design of bistable compliant mechanisms using precision-position and rigid-body replacement methods [7] Single piece compliant spatial slider-crank mechanism [8] ADLIF: A new large-displacement beam-based flexure joint [9] Influence of joints flexibility on overall stiffness of a 3-PRUP compliant parallel manipulator [10] Synthesis of multistable equilibrium compliant mechanisms [11] Reliability-based optimal design of a bistable compliant mechanism [12] Design of two-link, in-plane, bistable compliant micro-mechanisms [13] Synthesis of compliant multistable mechanisms through use of a single bistable mechanism [14] A self-retracting fully compliant bistable micromechanism [15] Identification of macro- and micro-compliant mechanism configurations resulting in bistable behavior [16] Design and analysis of a high pressure piezoelectric actuated microvalve [17] Design optimization of bistable microdiaphragm valves [18] A thermopneumatically actuated bistable microvalve [19] On-chip actuation of an in-plane compliant bistable micromechanism [20] Parametric deflection approximations for end-loaded, large-deflection beams in compliant mechanisms [21] Evaluation of equivalent spring stiffness for use in a pseudo-rigid-body model of large-deflection compliant mechanisms

طراحی مکانیزم چهارمیله‌ای دوپایا با تغییر محل قرارگیری عضو انعطاف‌پذیر

سیدمجتبی واردی کولایی * PhD

گروه مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

فائزه قنبری BSc

گروه مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

مکانیزم‌های دوپایا دارای دو موقعیت پایدار مجزا هستند که می‌توانند با یک تحریک جزئی از یکی از این موقعیت‌ها به دیگری حرکت کنند. این نقاط پایدار و همچنین حرکت بین آنها موجب شده است که استفاده از این مکانیزم‌ها در وسایلی همچون شیرها، کلیدها، سوئیچ‌ها و دریچه‌ها روزبه‌روز در حال افزایش باشد. رفتار دوپایا در این مکانیزم‌ها نتیجه ذخیره و آزاد شدن انرژی است. در نتیجه، بدیهی است که این مکانیزم‌ها باید دارای یک یا چند عضو یا مفصل انعطاف‌پذیر باشند. در این مقاله، عضوهای انعطاف‌پذیر با استفاده از فنرهای پیچشی و براساس مدل شبه‌جسم صلب مدل می‌شوند. وجود یک عضو انعطاف‌پذیر در مکانیزم چهارمیله‌ای برای ایجاد حالت دوپایا شدن در آن کافی است، اما با تغییر مکان این عضو به عنوان عضو ورودی، عضو خروجی یا عضو رابط (یا تغییر محل فنر پیچشی معادل)، حالت‌های مختلفی برای طراحی مکانیزم چهارمیله‌ای دوپایا ایجاد می‌شود که در این پژوهش مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد برای دوپایا شدن مکانیزم چهارمیله‌ای در هر یک از حالات لنگ-لنگ، لنگ-لنگ، لنگ-لنگ، لنگ-لنگ و لنگ-لنگ، فنر پیچشی معادل باید به عضو کوتاه‌تر متصل نباشد.

کلیدواژه‌ها: دوپایا، انعطاف‌پذیری، مکانیزم چهارمیله‌ای، فنر پیچشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۹

* نویسنده مسئول: varedi@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

مکانیزم‌های موازی به دلیل قابلیت‌ها و مزیت‌های نسبی در مقایسه با مکانیزم‌های سری، همواره از مقبولیت بیشتری نزد پژوهشگران و صنعتگران برخوردار بوده‌اند، به گونه‌ای که تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی این مکانیزم‌ها همواره مورد توجه بوده است [1-3]. مکانیزم‌های متداول سنتی، نیرو و جابه‌جایی را از طریق اعضای صلب (سفتی زیاد) و مفاصل سنتی (دارای نرمی زیاد) منتقل می‌کردند. اما طی دو دهه اخیر، محققان با گنجاندن نرمی در تئوری‌های طراحی مکانیزم‌ها، به سیستم‌های جدیدی به نام مکانیزم‌های نرم دست یافته‌اند که نیرو و جابه‌جایی را از طریق اعضای قابل انعطاف خود منتقل می‌کنند. از مزایای این مکانیزم‌ها می‌توان به حذف اصطکاک، سایش و پس‌زنی موجود در مفاصل مکانیکی معمول، سادگی مونتاژ این مکانیزم‌ها، کاهش وزن نسبت به مکانیزم‌های معمولی، ساخت آسان‌تر، قابلیت ارتجاع بهتر در برابر بار بیش از حد و جذب شوک اشاره کرد. از مهم‌ترین کاربردهای این مکانیزم‌ها می‌توان به استفاده از آنها در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، رباتیک، کاربردهای پزشکی و بیومکانیک (از قبیل پای خمشی، سنسورهای زیستی و ماهیچه‌های مصنوعی)، طراحی بدون نیاز به سرهم‌بندی و در طراحی مکانیزم‌های دوپایا و چندپایا اشاره نمود [4-6].

یک مکانیزم دوپایا در محدوده حرکتی خود دارای دو موقعیت تعادل پایا است. هرچند که این خصوصیت برای برخی از کاربردهای خاص بسیار مناسب بوده، اما طراحی این مکانیزم‌ها دارای

پیچیدگی‌هایی است. زیرا حرکت مکانیزم و تغییرات انرژی در اعضای انعطاف‌پذیر به هم وابسته‌اند. نکته مهم در طراحی این مکانیزم‌ها این است که انرژی پتانسیل سیستم باید در طول حرکت مکانیزم، دو نقطه کمینه داشته باشد [4].

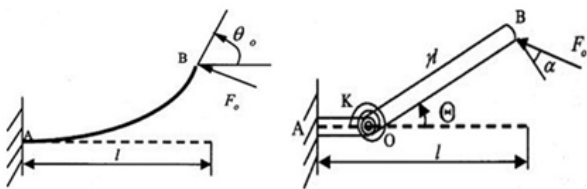
پژوهش در زمینه مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر (نرم) و طراحی انواع مختلفی از این مکانیزم‌ها، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. در برخی از این پژوهش‌ها به طراحی مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر یکپارچه [7]، طراحی مفاصل انعطاف‌پذیر [8] و تأثیر انعطاف‌پذیری مفاصل بر سفتی ربات‌های موازی [9] پرداخته شده است. برخی نیز به‌طور ویژه روی مکانیزم‌های دوپایا، چندپایا و کاربردهای آنها تمرکز کرده‌اند [10-14]. در این میان، به دلیل مزایای مکانیزم‌های دوپایا، طراحی و ساخت آنها برای کاربردهایی در حوزه میکرومکانیزم‌ها نظیر طراحی میکروشیرها، میکروسوئیچ‌ها و میکرولوله‌های دوپایا در حال افزایش است [15-19]. در این مکانیزم‌ها، برای ماندن در موقعیت تعادل، هیچ انرژی صرف نمی‌شود و فقط برای تغییر حالت نیازمند صرف انرژی هستند. در نتیجه انرژی مورد نیاز برای آنها بسیار کاهش خواهد یافت.

در این مقاله از مفهوم معکوس هندسی برای طراحی یک مکانیزم چهارمیله‌ای دوپایا بهره برده شده است. در واقع سعی شده است تا با استفاده از مدل شبه‌جسم صلب، اعضای انعطاف‌پذیر با فنرهای پیچشی معادل جایگزین شوند و براساس تغییر مکان فنر مورد نظر در هر یک از مفاصل مکانیزم چهارمیله‌ای، یک مکانیزم انعطاف‌پذیر دوپایا ایجاد شود. بنابراین در ابتدا به توضیح این مدل پرداخته می‌شود.

۲- مدل‌سازی و بررسی مکانیزم چهارمیله‌ای

۲-۱- مدل شبه‌جسم صلب (PRBM)

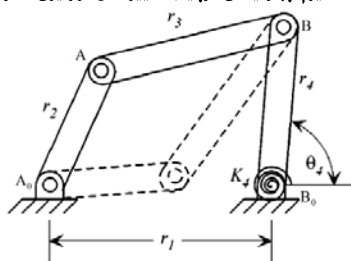
این مدل برای ساده‌سازی تحلیل مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر یا نرم ابتدا توسط هاوِل و میدا [20] و همچنین هاوِل و همکاران ارائه شد [21]. یک مثال از چنین سیستمی را می‌توان در شکل ۱ ملاحظه نمود. در این مدل، مکانیزم نرم توسط اجزای صلب مدل می‌شود و عکس‌العمل بین این اجزا توسط مفاصل و فنر پیچشی نشان داده می‌شود. این مدل تمامی مزایای موجود در یک تحلیل سینماتیک را دارا است و سیستم، قابلیت تغییر شکل بزرگ را نیز خواهد داشت. بنابراین برای توپولوژی موجود، بدون استفاده از روش‌های غیرخطی می‌توان تحلیل تغییر شکل بزرگ برای مکانیزم را انجام داد [4]. همچنین با استفاده از این مدل، امکان استفاده از روش‌های طراحی مکانیزم‌های صلب برای مکانیزم‌های نرم وجود دارد.



شکل ۱) مدل‌سازی شبه‌جسم صلب [4]

۲-۲- مدل‌سازی مکانیزم چهارمیله‌ای

مدل PRBM، یک مکانیزم چهارمیله‌ای با عضوهای و مفاصل انعطاف‌پذیر در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس این مدل، اعضای مکانیزم، صلب فرض شده و در عوض از فنرهای پیچشی برای مدل‌سازی انعطاف‌پذیری اعضا استفاده می‌شود. K_i سفتی

شکل ۳) دو شکل متفاوت مکانیزم به‌ازای زاویه مشخص θ_4

بنابراین برای بررسی اینکه فنر K_4 می‌تواند دو موقعیت پایا را ایجاد کند یا خیر، کافی است نمودار θ_4 برحسب زاویه ورودی θ_2 رسم شود. در این مثال خاص، اگر به‌ازای زاویه دلخواه θ_4 ، دو مقدار مجزا برای θ_2 روی نمودار وجود داشته باشد، در این صورت فنر قادر به ایجاد مکانیزم دوپایا است. ولی اگر طول‌های مکانیزم به‌گونه‌ای باشند که نتوانند دو موقعیت شکل ۳ را ایجاد نمایند، این نتیجه استخراج می‌شود که در شکل فوق فنی که بین لینک واسط و لینک خروجی قرار بگیرد (فنر K_4)، نمی‌تواند موقعیت دوپایا ایجاد کند.

نمودار انرژی پتانسیل نیز می‌تواند نشان‌دهنده درستی و دقت روش فوق باشد. انرژی پتانسیل کل مکانیزم، از مجموع انرژی پتانسیل هر یک از لینک‌ها به دست می‌آید. با فرض مکانیزم افقی و عدم تغییر انرژی پتانسیل گرانشی، انرژی پتانسیل تنها شامل انرژی کشسانی خواهد بود. با رسم نمودار انرژی پتانسیل برحسب زاویه ورودی و وجود دو کمینه در شکل، مکانیزم می‌تواند دو موقعیت پایا داشته باشد.

با تغییر موضع فنر پیچشی و همچنین با تغییر نوع مکانیزم (لنگ-لنگ، لنگ-آونگ، آونگ-لنگ و آونگ-آونگ) می‌توان حالات مختلف را مورد بررسی قرار داد. این کار در بخش بعدی و با ارائه مثال‌های عددی انجام می‌شود.

۴- بررسی انواع مکانیزم‌های چهارمیله‌ای

در مکانیزم چهارمیله‌ای، با تغییر طول اعضا و در نتیجه تغییر موضع عضو کوچک‌تر، چهار دسته مکانیزم مختلف براساس دوران کامل یا غیرکامل اعضا ایجاد می‌شود که به‌صورت زیر هستند:

- ۱- مکانیزم لنگ-لنگ (وقتی عضو زمین کوتاه‌ترین باشد).
- ۲- مکانیزم لنگ-آونگ (وقتی عضو ورودی کوتاه‌ترین باشد).
- ۳- مکانیزم آونگ-لنگ (وقتی عضو خروجی کوتاه‌ترین باشد).
- ۴- مکانیزم آونگ-آونگ (وقتی عضو رابط کوتاه‌ترین باشد).

بدیهی است طراحی مکانیزم چهارمیله‌ای دوپایا برای هر یک از مکانیزم‌های فوق متفاوت خواهد بود، زیرا محدوده دوران اعضای مکانیزم در هر یک متفاوت از دیگری است. در ادامه، هر یک از دسته‌بندی‌های فوق به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و طراحی مکانیزم دوپایا و در نتیجه تعیین موضع فنر پیچشی برای آن انجام خواهد شد. هم‌زمان، با ارائه یک مثال عددی، فرآیند طراحی بهتر تشریح خواهد شد.

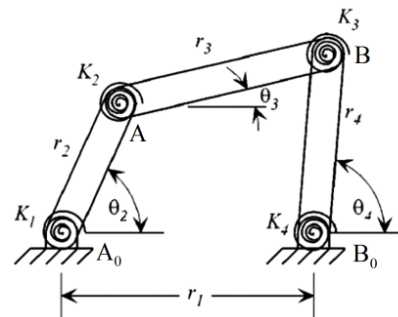
۴-۱- مکانیزم لنگ-لنگ

مکانیزمی با طول‌های زیر را در نظر بگیرید:

$$r_1 = 3 \text{ cm}, r_2 = 4 \text{ cm}, r_3 = 5.5 \text{ cm}, r_4 = 5 \text{ cm} \quad (1)$$

بدیهی است با داشتن طول لینک‌ها و اطلاع از زاویه ورودی، می‌توان با تحلیل جابه‌جایی، زاویه بقیه لینک‌ها را نیز به دست آورد. در نتیجه، زوایای اولیه لینک‌ها با انتخاب زاویه ورودی اولیه به‌صورت زیر تعیین می‌شوند:

فنرهای پیچشی مورد نظر است. همچنین طول عضوهای r_i و زاویه آنها با θ_i نمایش داده شده است.

شکل ۴) مکانیزم چهارمیله‌ای با فنر پیچشی در هر مفصل^[4]

هرچند همه اعضای مکانیزم چهارمیله‌ای می‌توانند انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شوند، اما برای دوپایا شدن مکانیزم چهارمیله‌ای، وجود یک عضو انعطاف‌پذیر در آن کافی است. بنابراین هدف، تعیین عضو انعطاف‌پذیر یا فنر پیچشی معادل آن است. بدین منظور، اثر هر یک از فنرهای پیچشی، به‌تنهایی و در حالی که از وجود بقیه فنرها صرف‌نظر می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف، پیدا کردن مکان مناسب تک‌فنر پیچشی برای ایجاد یک مکانیزم دوپایا است. بنابراین در این پژوهش با تغییر محل عضو انعطاف‌پذیر یا تغییر موضع یک فنر پیچشی در مفاصل مختلف، به طراحی مکانیزم دوپایا و یافتن مکان مناسب فنر مورد نظر پرداخته می‌شود.

۳- دستیابی به مکانیزم دوپایا

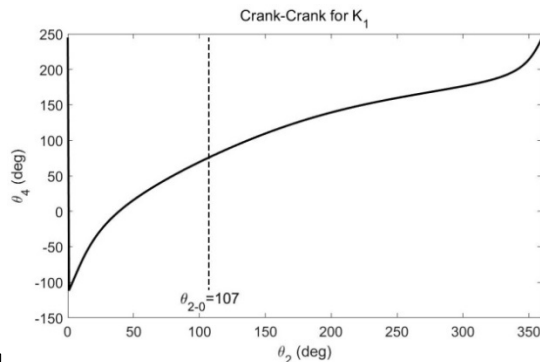
فرض می‌شود β زاویه‌ای است که در آن، فنر در حالت آزاد خود قرار دارد (زاویه اولیه مونتاژ یا موقعیت اولیه مکانیزم). بنابراین وقتی زاویه بین دو عضو که توسط فنر پیچشی به هم مرتبط شده‌اند برابر β شود، انرژی پتانسیل فنر در این لحظه صفر می‌شود. از آنجا که در این وضعیت، مکانیزم در حالت تعادل است و نسبت به تغییر موقعیت لینک‌ها از خود مقاومت نشان می‌دهد (به‌دلیل وجود فنر)، در نتیجه، یکی از حالت‌های پایا در این موقعیت رخ می‌دهد و فقط کافی است حالت پایای دوم مشخص شود. برای این کار فنر باید بار دیگر در حالت آزاد خود قرار بگیرد، به عبارت دیگر، انرژی پتانسیل سیستم باید بار دیگر به کمینه مقدار خود برسد.

براساس توضیحات فوق می‌توان از روش‌های متفاوتی برای یافتن دو موقعیت پایا استفاده کرد. در این مقاله روشی به کار رفته است که ضمن درک آسان‌تر و سریع‌تر، نیازی به حل معادلات ندارد و به‌راحتی می‌توان هر مکانیزم چهارمیله دلخواهی را به‌صورت دوپایا طراحی کرد.

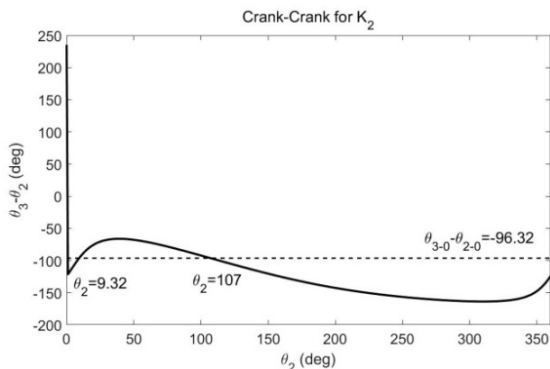
در حالت پایای اولیه، اگر زاویه بین دو لینک متصل به فنر، β نامیده شود، برای ایجاد حالت پایای دوم، مکانیزم باید در حین حرکت خود بار دیگر زاویه β را بین دو لینک مذکور تولید کند، اما با شکلی متفاوت نسبت به حالت قبل که در واقع همان مفهوم معکوس هندسی را نشان می‌دهد.

به‌عنوان مثال، فنر k_4 متصل به لینک چهارم را در نظر بگیرید. در شکل ۳ می‌توان مشاهده نمود که به‌ازای θ_4 مشخص، مکانیزم می‌تواند در دو شکل متفاوت قرار گیرد. به عبارت دیگر، به‌ازای زاویه دلخواه θ_4 ، دو مقدار مجزا برای سایر زوایا وجود دارد و در این صورت، این دو شکل از مکانیزم، همان دو موقعیت پایا خواهد بود.

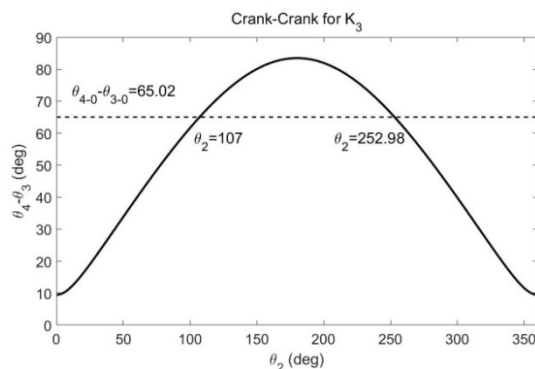
فقط در صورت وجود فنر در مفاصل دوم و سوم مکانیزم، امکان ایجاد مکانیزم چهارمیله‌ای دوپایا در حالت لنگ-لنگ وجود خواهد داشت. نمودار ۲، دو موقعیت پایای مکانیزم چهارمیله‌ای را در دو حالت فوق (وجود فنر در مفاصل دوم و سوم مکانیزم) نشان می‌دهد. بدیهی است موقعیت پایای اول در هر دو حالت، همان موقعیت اولیه مکانیزم است.



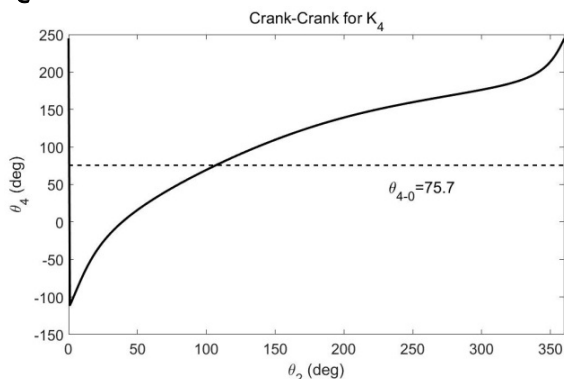
الف



ب



ج



د

نمودار ۱ تغییرات زاویه‌ای مفاصل مختلف مکانیزم در حالت لنگ-لنگ (الف) وجود فنر در مفصل اول (K_1)، (ب) وجود فنر در مفصل دوم (K_2)، (ج) وجود فنر در مفصل سوم (K_3)، (د) وجود فنر در مفصل چهارم (K_4)

$$\theta_{2,0} = 107^\circ, \theta_{3,0} = 10^\circ, \theta_{4,0} = 75^\circ \quad (۲)$$

ضمناً زاویه لینک زمین صفر در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که از طول لینک‌ها مشخص بوده، در این مکانیزم به دلیل اینکه عضو زمین کوتاه‌ترین است، عضوهای ورودی و خروجی، دوران کامل دارند. در ادامه با تغییر موضع فنر پیچشی در چهار مفصل مختلف، چگونگی ایجاد مکانیزم دوپایا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) وجود فنر در مفصل اول مکانیزم (K_1)

در صورت وجود فنر پیچشی در مفصل بین عضو زمین و عضو ورودی (مفصل اول مکانیزم)، زاویه فنر با زاویه عضو ورودی متناظر خواهد بود. در نتیجه، برای ایجاد مکانیزم دوپایا در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\theta_2 = \theta_{2,0} = 107^\circ$ عبور کند. با رسم نمودار θ_4 برحسب θ_2 می‌توان مشاهده نمود که به دلیل لنگ بودن عضو ورودی، مکانیزم در یک سیکل حرکتی خود فقط یک بار از زاویه مورد نظر عبور می‌کند (نمودار ۱-الف). بنابراین می‌توان دریافت فنر K_1 در این مکانیزم، حالت دوپایا ایجاد نمی‌کند.

ب) وجود فنر در مفصل دوم مکانیزم (K_2)

در صورت وجود فنر پیچشی در مفصل بین عضو ورودی و عضو رابط (مفصل دوم)، زاویه فنر با زاویه $(\theta_3 - \theta_2)$ متناظر خواهد بود. در نتیجه، برای ایجاد مکانیزم دوپایا در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\beta = \theta_{3,0} - \theta_{2,0} = -97^\circ$ عبور کند. با رسم نمودار $(\theta_3 - \theta_2)$ برحسب θ_2 می‌توان مشاهده نمود که در این حالت، مکانیزم در یک سیکل حرکتی خود می‌تواند دو بار زاویه ثابتی را بین لینک‌های ورودی و رابط ایجاد نماید (نمودار ۱-ب). بنابراین می‌توان دریافت فنر K_2 در مکانیزم لنگ-لنگ، حالت دوپایا ایجاد می‌کند. نمودار ۲-الف موقعیت پایای دوم را در مقایسه با موقعیت اولیه مکانیزم (موقعیت پایای اول) در حالت لنگ-لنگ و در صورت وجود فنر در مفصل دوم را نشان می‌دهد.

ج) وجود فنر در مفصل سوم مکانیزم (K_3)

در صورت وجود فنر پیچشی در مفصل بین عضو رابط و عضو خروجی (مفصل ۳)، زاویه فنر با زاویه $(\theta_4 - \theta_3)$ متناظر خواهد بود. در نتیجه، برای ایجاد مکانیزم دوپایا در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\beta = \theta_{4,0} - \theta_{3,0} = 65^\circ$ عبور کند. با رسم نمودار $(\theta_4 - \theta_3)$ برحسب θ_2 می‌توان مشاهده نمود که در این حالت، مکانیزم در یک سیکل حرکتی خود می‌تواند دو بار زاویه ثابتی را بین لینک‌های ورودی و رابط ایجاد نماید (نمودار ۱-ج). بنابراین می‌توان دریافت فنر K_3 در مکانیزم لنگ-لنگ، حالت دوپایا ایجاد می‌کند. نمودار ۲-ب، موقعیت پایای دوم را در مقایسه با موقعیت پایای اول در حالت لنگ-لنگ و در صورت وجود فنر در مفصل سوم نشان می‌دهد.

د) وجود فنر در مفصل چهارم مکانیزم (K_4)

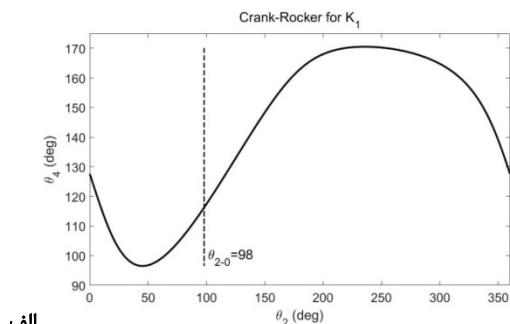
در صورت وجود فنر پیچشی در مفصل بین عضو رابط و عضو خروجی (مفصل چهارم)، زاویه فنر با زاویه θ_4 متناظر خواهد بود. در نتیجه، برای ایجاد مکانیزم دوپایا در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\beta = \theta_4 = 75^\circ$ عبور کند. با مشاهده دوباره نمودار θ_4 برحسب θ_2 می‌توان دریافت که این امر به دلیل دوران کامل عضو خروجی اتفاق نمی‌افتد (نمودار ۱-د). بنابراین می‌توان دریافت فنر K_4 در این مکانیزم، حالت دوپایا ایجاد نمی‌کند.

در نتیجه، از بین چهار موقعیت مختلف برای وجود فنر پیچشی،

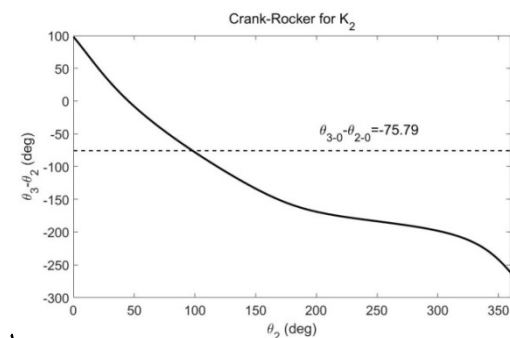
رسم نمودار θ_4 برحسب θ_2 می‌توان مشاهده نمود که باز هم به دلیل لنگ بودن عضو ورودی، مکانیزم در یک سیکل حرکتی خود فقط یک بار از زاویه مورد نظر عبور می‌کند (نمودار ۳- الف). بنابراین می‌توان دریافت، فنر K_1 در این مکانیزم حالت دوپایا ایجاد نمی‌کند.

ب) وجود فنر در مفصل دوم مکانیزم (K_2)

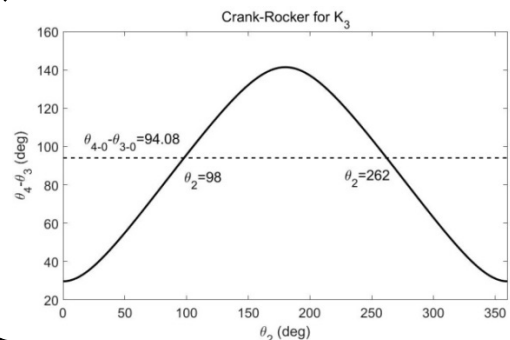
در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\beta = \theta_{3,0} - \theta_{2,0} = -77^\circ$ عبور کند. نمودار ۳- ب، نمودار $(\theta_3 - \theta_2)$ برحسب θ_2 را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان مشاهده نمود که در این حالت نیز مکانیزم دوپایا نمی‌تواند تشکیل شود.



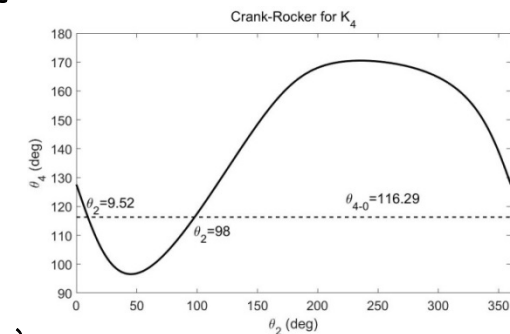
الف



ب

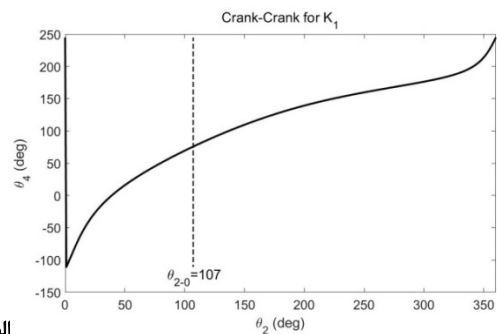


ج

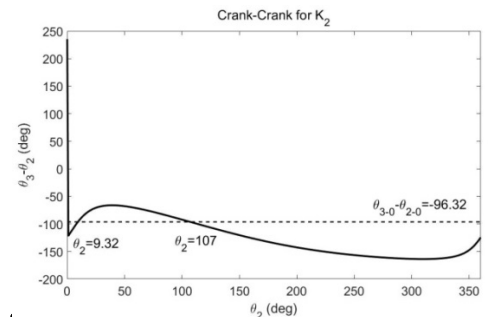


د

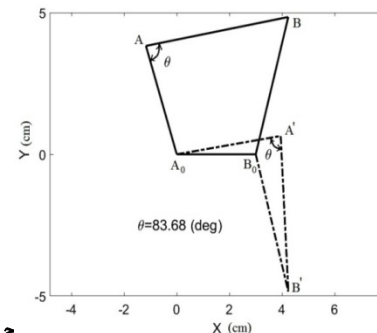
نمودار ۳) تغییرات زاویه‌ای مفاصل مختلف مکانیزم در حالت لنگ- آونگ:
الف) وجود فنر در مفصل اول (K_1)، ب) وجود فنر در مفصل دوم (K_2)، ج) وجود فنر در مفصل سوم (K_3)، د) وجود فنر در مفصل چهارم (K_4)



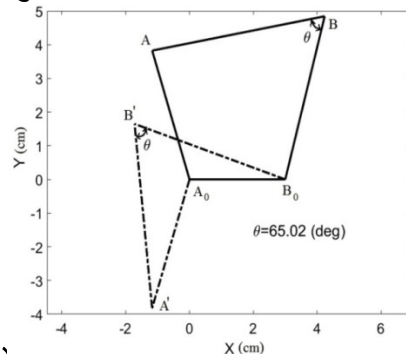
الف



ب



ج



د

نمودار ۲) دو موقعیت پایای مکانیزم در حالت لنگ- لنگ در صورت وجود فنر در مفصل دوم و سوم مکانیزم: الف) وجود فنر در مفصل اول (K_1)، ب) وجود فنر در مفصل دوم (K_2)، ج) وجود فنر در مفصل سوم (K_3)، د) وجود فنر در مفصل چهارم (K_4)

۴-۲- مکانیزم لنگ- آونگ

در این حالت، طول لینک‌های مکانیزم به صورت زیر خواهند بود تا بتوانند مکانیزم لنگ- آونگ را تولید نمایند:

$$r_1 = 5.5 \text{ cm}, r_2 = 3 \text{ cm}, r_3 = 4 \text{ cm}, r_4 = 5 \text{ cm} \quad (۳)$$

با انتخاب زاویه ورودی، زوایای اولیه لینک‌ها به صورت زیر خواهند بود:

$$\theta_{2,0} = 98^\circ, \theta_{3,0} = 22^\circ, \theta_{4,0} = 116^\circ \quad (۴)$$

الف) وجود فنر در مفصل اول مکانیزم (K_1)

با توجه به توضیحات قبلی، در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\beta = \theta_{2,0} = 98^\circ$ عبور کند. با

ج) وجود فنر در مفصل سوم مکانیزم (K_3)

بدیهی است در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\beta = \theta_{4,0} - \theta_{3,0} = 94^\circ$ عبور کند. با رسم نمودار $(\theta_4 - \theta_3)$ برحسب θ_2 می‌توان مشاهده نمود که در مکانیزم لنگ-آونگ نیز، وجود فنر پیچشی در مفصل سوم حالت دوپایا ایجاد می‌کند (نمودار ۳-ج). دو موقعیت پایای مکانیزم در این حالت را می‌توان در نمودار ۴-الف مشاهده نمود. در هر دو موقعیت نشان داده شده، زاویه بین لینک‌های رابط و خروجی (که فنر پیچشی در این مفصل قرار دارد) برابر $94/08^\circ$ خواهد بود.

د) وجود فنر در مفصل چهارم مکانیزم (K_4)

برای ایجاد مکانیزم دوپایا در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\beta = \theta_4 = 116^\circ$ عبور کند. با مشاهده نمودار θ_4 برحسب θ_2 (نمودار ۳-د) می‌توان دریافت که این امر به دلیل آونگ بودن عضو خروجی می‌تواند اتفاق بیفتد. نمودار ۴-ب نیز دو موقعیت پایا را در این حالت نشان می‌دهد. در هر دو موقعیت پایا، زاویه لینک چهار نسبت به جهت مثبت محور افقی برابر 116° است.

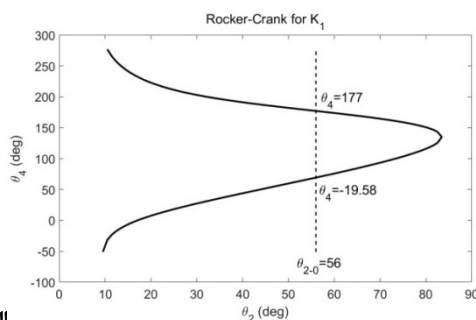
در نتیجه، در حالت لنگ-آونگ، از بین چهار موضع مختلف برای وجود فنر پیچشی، فقط در صورت وجود فنر در مفاصل سوم و چهارم، امکان ایجاد مکانیزم چهارمیله‌ای دوپایا وجود خواهد داشت. نمودار ۴، دو موقعیت پایای مکانیزم چهارمیله‌ای را در دو حالت فوق (وجود فنر در مفاصل سوم و چهارم مکانیزم) نشان می‌دهد.

در یک سیکل حرکتی مکانیزم می‌تواند دو بار از زاویه $\beta = \theta_{2,0} = 56^\circ$ عبور نماید. در نتیجه توانایی ایجاد یک مکانیزم دوپایا امری بدیهی است. مشاهده دو حالت پایا در نمودار ۶-الف گواه این مدعا است.

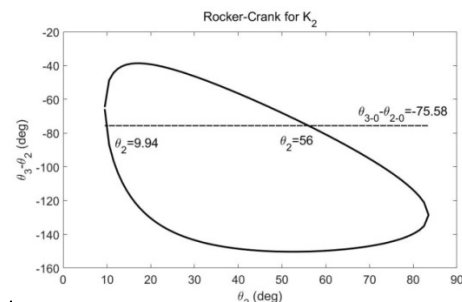
ب) وجود فنر در مفصل دوم مکانیزم (K_2)

در نمودار ۵-ب، با رسم نمودار $(\theta_3 - \theta_2)$ برحسب θ_2 می‌توان مشاهده نمود که در این حالت، زاویه بین دو عضو می‌تواند دو بار مقدار $\beta = \theta_{3,0} - \theta_{2,0} = -75.58^\circ$ را پذیرا باشد. در نتیجه وجود فنر در مفصل دوم می‌تواند منجر به حالت دوپایا در مکانیزم آونگ-لنگ شود. بنابراین، توانایی ایجاد یک مکانیزم دوپایا امری بدیهی است.

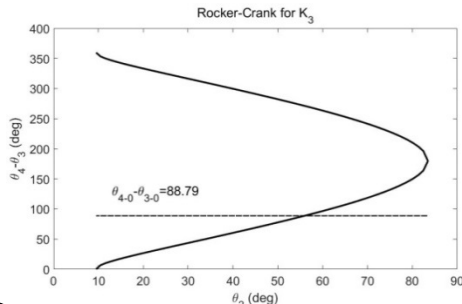
نمودار ۵-ب نشان می‌دهد که این دو موقعیت تعادل در زوایای $\theta_2 = 56^\circ$ و $\theta_2 = 9.94^\circ$ از عضو و ورودی رخ می‌دهند. نمودار ۶-ب دو حالت پایای مکانیزم را به خوبی نمایش می‌دهد.



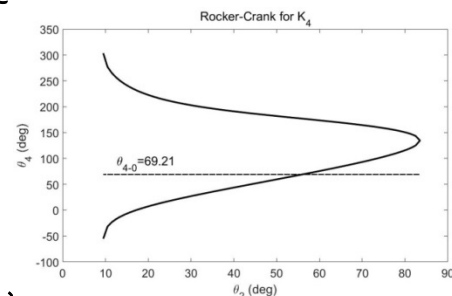
الف



ب

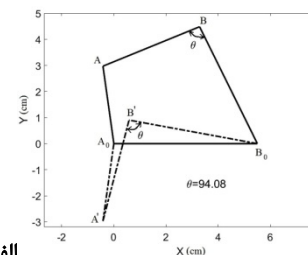


ج

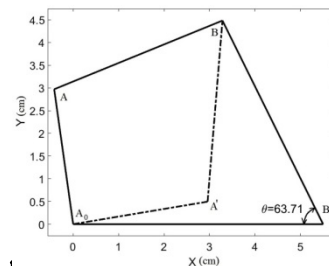


د

نمودار ۵) تغییرات زاویه‌ای مفاصل مختلف مکانیزم در حالت آونگ-لنگ: الف) وجود فنر در مفصل اول (K_1)، ب) وجود فنر در مفصل دوم (K_2)، ج) وجود فنر در مفصل سوم (K_3)، د) وجود فنر در مفصل چهارم (K_4)



الف



ب

نمودار ۴) دو موقعیت پایای مکانیزم در حالت لنگ-آونگ در صورت وجود فنر در مفاصل سوم و چهارم مکانیزم؛ الف) وجود فنر در مفصل سوم (K_3)، ب) وجود فنر در مفصل چهارم (K_4)

۴-۳ مکانیزم آونگ-لنگ

در این حالت، طول لینک‌های مکانیزم به گونه‌ای تغییر می‌کنند تا بتوانند مکانیزم آونگ-لنگ را تولید نمایند. بدیهی است طول لینک چهارم باید کوتاه‌ترین باشد. در این حالت طول اعضا به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$r_1 = 5.5 \text{ cm}, r_2 = 5 \text{ cm}, r_3 = 4 \text{ cm}, r_4 = 3 \text{ cm} \quad (5)$$

زوایای اولیه لینک‌ها نیز به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\theta_{2,0} = 56^\circ, \theta_{3,0} = -19^\circ, \theta_{4,0} = 69^\circ \quad (6)$$

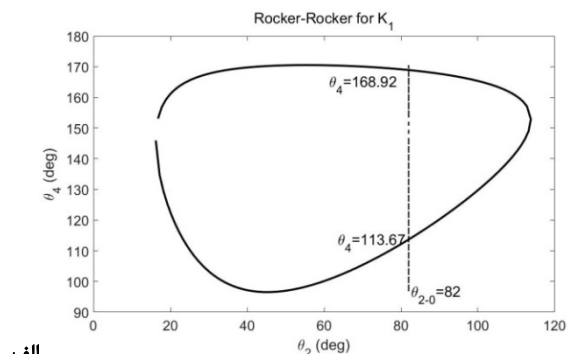
الف) وجود فنر در مفصل اول مکانیزم (K_1)

با رسم نمودار θ_4 برحسب θ_2 (نمودار ۵-الف) می‌توان مشاهده نمود که در این حالت با توجه به آونگ بودن عضو ورودی، این عضو

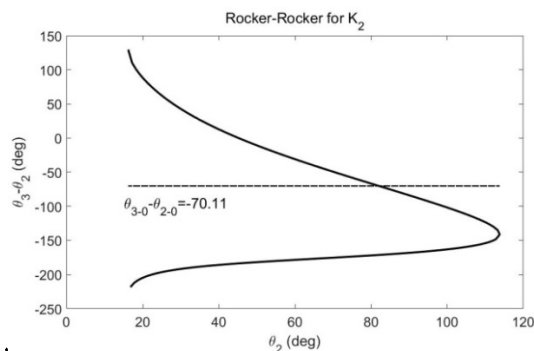
الف نشان می‌دهد که این دو موقعیت، معکوس هندسی یکدیگر برای یک زاویه ورودی مشخص هستند.

ب) وجود فنر در مفصل دوم مکانیزم (K_2)

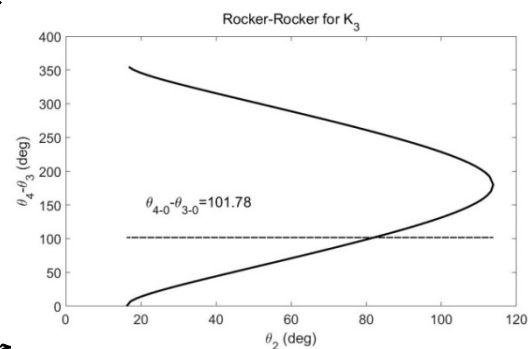
در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\beta = \theta_{3,0} - \theta_{2,0} = -70.11^\circ$ عبور کند. نمودار ۷- ب نمودار $(\theta_3 - \theta_2)$ برحسب θ_2 را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان مشاهده نمود که در این حالت نیز مکانیزم دوپایا نمی‌تواند تشکیل شود.



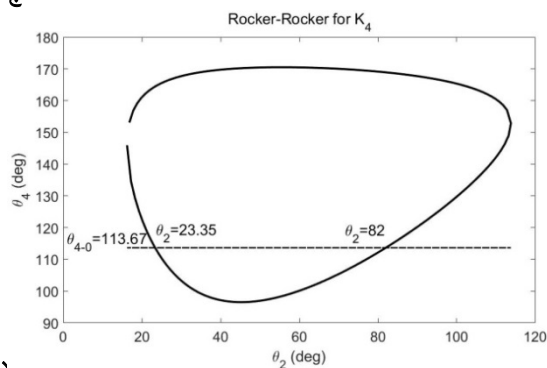
الف



ب

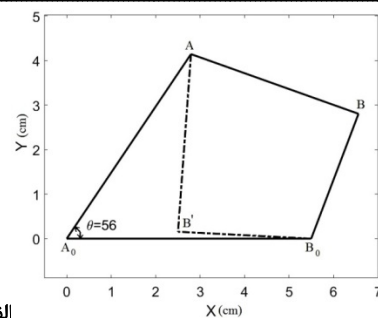


ج

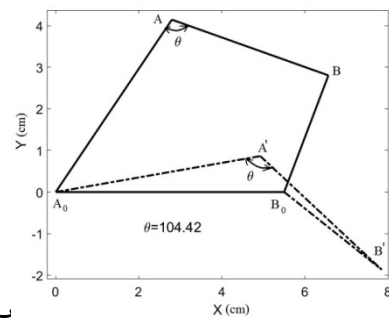


د

نمودار ۷) تغییرات زاویه‌ای مفاصل مختلف مکانیزم در حالت آونگ- آونگ؛ (الف) وجود فنر در مفصل اول (K_1)، (ب) وجود فنر در مفصل دوم (K_2)، (ج) وجود فنر در مفصل سوم (K_3)، (د) وجود فنر در مفصل چهارم (K_4)



الف



ب

نمودار ۶) دو موقعیت پایای مکانیزم در حالت آونگ- لنگ در صورت وجود فنر در مفاصل اول و دوم مکانیزم؛ (الف) وجود فنر در مفصل اول (K_1)، (ب) وجود فنر در مفصل دوم (K_2)

ج) وجود فنر در مفصل سوم مکانیزم (K_3)

با رسم نمودار $(\theta_4 - \theta_3)$ برحسب θ_2 (نمودار ۵- ج)، می‌توان مشاهده نمود که در مکانیزم آونگ- لنگ، وجود فنر پیچشی در مفصل سوم، حالت دوپایا ایجاد نمی‌کند و مکانیزم در یک سیکل حرکتی خود فقط یک‌بار از زاویه $\beta = \theta_{4,0} - \theta_{3,0} = 88^\circ$ می‌گذرد.

د) وجود فنر در مفصل چهارم مکانیزم (K_4)

در نمودار ۵- د، با مشاهده نمودار θ_4 برحسب θ_2 می‌توان دریافت که در مکانیزم آونگ- لنگ، وجود فنر پیچشی در مفصل چهارم نیز حالت دوپایا ایجاد نمی‌کند و مکانیزم در یک سیکل حرکتی خود فقط یک‌بار از زاویه $\beta = \theta_{4,0} = 69^\circ$ می‌گذرد. در نتیجه، در حالت آونگ- لنگ نیز، فقط در صورت وجود فنر در مفاصل اول و دوم مکانیزم، امکان ایجاد مکانیزم چهارمیله‌ای دوپایا وجود خواهد داشت. نمودار ۶، دو موقعیت پایای مکانیزم چهارمیله‌ای را در دو حالت فوق (وجود فنر در مفاصل اول و دوم) مکانیزم آونگ- لنگ به‌خوبی نمایش می‌دهد.

۴-۴-۴ مکانیزم آونگ- آونگ

در این حالت، عضو رابط مکانیزم باید کوتاه‌ترین باشد تا مکانیزم آونگ- آونگ تولید شود. طول لینک‌های مکانیزم و زوایای اولیه مکانیزم به‌صورت زیر است:

$$r_1 = 5.5 \text{ cm}, r_2 = 4 \text{ cm}, r_3 = 3 \text{ cm}, r_4 = 5 \text{ cm} \quad (7)$$

زوایای اولیه لینک‌ها نیز به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\theta_{2,0} = 82^\circ, \theta_{3,0} = 12^\circ, \theta_{4,0} = 113.67^\circ \quad (8)$$

الف) وجود فنر در مفصل اول مکانیزم (K_1)

با رسم نمودار θ_4 برحسب θ_2 می‌توان مشاهده نمود که در این حالت با توجه به آونگ‌بودن عضو ورودی، این عضو در یک سیکل حرکتی مکانیزم می‌تواند دو بار از زاویه $\beta = \theta_{2,0} = 82^\circ$ عبور نماید (نمودار ۷- الف). در نتیجه ایجاد یک مکانیزم دوپایا در این حالت شدنی است. همچنین مشاهده دو حالت پایا در نمودار ۸-

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به طراحی مکانیزم چهارمیله‌ای دوپایا، در صورت وجود تنها یک مفصل یا یک عضو انعطاف‌پذیر، براساس مفهوم معکوس هندسی پرداخته شده است. انعطاف‌پذیری عضو یا مفصل براساس مدل PRBM با استفاده از یک فنر پیچشی شبیه‌سازی می‌شود. خلاصه نتایج در جدول ۱ نشان می‌دهد که در حالت لنگ-لنگ، وجود فنر پیچشی در مفاصل دوم و سوم می‌تواند منجر به حالت دوپایا شود. همچنین در حالت لنگ-آونگ وجود فنر پیچشی در مفاصل سوم و چهارم، در حالت آونگ-لنگ، وجود فنر پیچشی در مفاصل اول و دوم و در نهایت در حالت آونگ-آونگ، وجود فنر پیچشی در مفاصل اول و چهارم می‌تواند به طراحی مکانیزم دوپایا بیانجامد و در بقیه حالات باقیمانده، ایجاد مکانیزم دوپایا امکان‌پذیر نیست. با بررسی نتایج فوق می‌توان دریافت که در یک مکانیزم چهارمیله‌ای، تنها در حالتی می‌توان مکانیزم دوپایا ایجاد نمود که فنر جایگزین شده (فنر معادل) برای عضو یا مفصل انعطاف‌پذیر، به عضو کوتاه‌تر مکانیزم متصل نباشد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

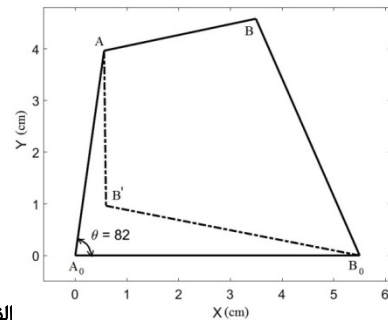
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

سهم نویسندگان: سیدمجتبی واردی کولایی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روشن‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۷۰٪)؛ فائزه قنبری (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۰٪)

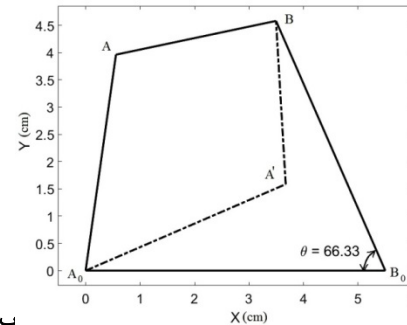
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Falahian M, Daniali HM, Varedi SM. Optimization of H₄ parallel manipulator using genetic algorithm. In: Küçük S, editor. Serial and parallel robot manipulators-kinematics, dynamics, control and optimization. London: IntechOpen; 2012. pp. 401-416.
- 2- Varedi Koulaei SM, Daniali HM, Farajtabar M, Fathi B, Shafiee Ashtiani M. Reducing the undesirable effects of joints clearance on the behavior of the planar 3-RRR parallel manipulators. Nonlinear Dynamics. 2016;86(2):1007-1022.
- 3- Varedi Koulaei SM, Daniali HM, Domiri Ganji D. Kinematics of an offset 3-UPU translational parallel manipulator by the homotopy continuation method. Nonlinear Analysis Real World Applications. 2009;10(3):1767-1774.
- 4- Jensen BD, Howell LL. Identification of compliant pseudo-rigid-body four-link mechanism configurations resulting in bistable behavior. Journal of Mechanical Design. 2004;125(4):701-708.
- 5- Howell LL. Compliant mechanisms. New York: John Wiley & Sons; 2001.
- 6- Pucheta MA, Cardona A. Design of bistable compliant mechanisms using precision-position and rigid-body replacement methods. Mechanism and Machine Theory. 2010;45(2):304-326.
- 7- Parlaktas V, Tanik E. Single piece compliant spatial slider-crank mechanism. Mechanism and Machine Theory. 2014;81:1-10.
- 8- Pei X, Yu J. ADLIF: A new large-displacement beam-



الف



ب

نمودار ۸) دو موقعیت پایای مکانیزم در حالت آونگ-آونگ در صورت وجود فنر در مفاصل اول و چهارم مکانیزم؛ الف) وجود فنر در مفصل اول (K_1)، ب) وجود فنر در مفصل چهارم (K_4)

ج) وجود فنر در مفصل سوم مکانیزم (K_3)

با رسم نمودار ($\theta_4 - \theta_3$) برحسب θ_2 (نمودار ۷-ج) می‌توان مشاهده نمود که در مکانیزم آونگ-آونگ، وجود فنر پیچشی در مفصل سوم، حالت دوپایا ایجاد نمی‌کند و مکانیزم در یک سیکل حرکتی خود فقط یک‌بار از زاویه $\beta = \theta_{4,0} - \theta_{3,0} = 101.78^\circ$ می‌گذرد.

د) وجود فنر در مفصل چهارم مکانیزم (K_4)

برای ایجاد مکانیزم دوپایا در این حالت، مکانیزم باید در یک سیکل حرکتی خود دو بار از زاویه $\beta = \theta_4 = 113.67^\circ$ عبور کند. با مشاهده نمودار θ_4 برحسب θ_2 (نمودار ۷-د) می‌توان دریافت که این امر به دلیل آونگ‌بودن عضو خروجی می‌تواند اتفاق بیفتد. نمودار ۷-ب نیز دو موقعیت پایا را در این حالت نشان می‌دهد. نتیجه اینکه، در حالت لنگ-آونگ، در صورت وجود فنر در مفاصل اول و چهارم مکانیزم، امکان ایجاد مکانیزم چهارمیله‌ای دوپایا وجود خواهد داشت. نمودار ۸، دو موقعیت پایای مکانیزم چهارمیله‌ای را در دو حالت فوق (وجود فنر در مفاصل اول و چهارم) نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از بررسی نمودارها در چهار حالت مختلف مکانیزم چهارمیله‌ای در جدول ۱ خلاصه شده است. این جدول نشان می‌دهد که در هر یک از حالات، وجود فنر پیچشی در تنها دو مفصل لولایی می‌تواند حالت دوپایا ایجاد نماید. با بررسی نتایج جدول ۱ می‌توان دریافت که در یک مکانیزم چهارمیله‌ای، فنی قادر به ایجاد موقعیت دوپایا است که به کوتاه‌ترین لینک مکانیزم متصل نباشد.

جدول ۱) بررسی ایجاد موقعیت پایا توسط فنرها

انواع مکانیزم	فنر K_1	فنر K_2	فنر K_3	فنر K_4
لنگ-لنگ	×	دوپایا	دوپایا	×
لنگ-آونگ	×	×	دوپایا	دوپایا
آونگ-لنگ	دوپایا	دوپایا	×	×
آونگ-آونگ	دوپایا	×	×	دوپایا

bistable behavior [Dissertation]. Provo UT: Brigham Young University; 2003.

16- Fazal I, Elwenspoek MC. Design and analysis of a high pressure piezoelectric actuated microvalve. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2007;17(11):2366.

17- Schomburg WK, Goll C. Design optimization of bistable microdiaphragm valves. *Sensors and Actuators A Physical*. 1998;64(3):259-264.

18- Yang B, Wang B, Schomburg WK. A thermopneumatically actuated bistable microvalve. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2010;20(9):095024.

19- Baker MS, Howell LL. On-chip actuation of an in-plane compliant bistable micromechanism. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2002;11(5):566-573.

20- Howell LL, Midha A. Parametric deflection approximations for end-loaded, large-deflection beams in compliant mechanisms. *Journal of Mechanical Design*. 1995;117(1):156-165.

21- Howell LL, Midha A, Norton TW. Evaluation of equivalent spring stiffness for use in a pseudo-rigid-body model of large-deflection compliant mechanisms. *Journal of Mechanical Design*. 1996;118(1):126-131.

based flexure joint. *Mechanical Sciences*. 2011;2:183-188.

9- Rezaei A, Akbarzadeh AR. Influence of joints flexibility on overall stiffness of a 3-PRUP compliant parallel manipulator. *Mechanism and Machine Theory*. 2018;126:108-140.

10- Oh Y. Synthesis of multistable equilibrium compliant mechanisms [Dissertation]. Ann Arbor: University of Michigan; 2008.

11- Howell LL, Rao SS, Midha A. Reliability-based optimal design of a bistable compliant mechanism. *Journal of Mechanical Design*. 1994;116(4):1115-1121.

12- Jensen BD, Howell LL, Salmon LG. Design of two-link, in-plane, bistable compliant micro-mechanisms. *Journal of Mechanical Design*. 1999;121(3):416-423.

13- Chen G, Gou Y, Zhang A. Synthesis of compliant multistable mechanisms through use of a single bistable mechanism. *Journal of Mechanical Design*. 2011;133(8):081007.

14- Masters ND, Howell LL. A self-retracting fully compliant bistable micromechanism. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2003;12(3):273-280.

15- Jensen BD. Identification of macro- and micro-compliant mechanism configurations resulting in