



طراحی و تحلیل مدل نوینی از مهره محرک کابلی برای ربات‌های پیوسته

مهدی بامداد^{1*}، آرمان مردانی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

*شاهرود، صندوق پستی 3619995161، bamdad@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 مهر 1393

پذیرش: 24 دی 1393

ارائه در سایت: 25 بهمن 1393

کلید واژگان:

ربات ساختار پیوسته

بازوی مهره‌ای

کابل شاخه‌ای

طراحی بهینه

چکیده

در این پژوهش، تلاش شده است تا با ارائه مدل نوینی برای ساختار بازوی مهره‌ای، کاستی نمونه‌های موجود ربات‌های پیوسته در تولید و انتقال حرکت برطرف گردد. بازوهای مهره‌ای، مانند ساختارهای طبیعی، از مهره‌های به هم پیوسته‌ای تشکیل شده‌اند که دارای ویژگی‌های ممتازی نظیر قابلیت انطباق با محیط هستند. قوای محرکه روی طول بازو توزیع شده و با تغییر شکل آن، حرکت پیوسته را رقم می‌زند. در این مقاله، اضافه نمودن یک میله بندی به میانه مهره و بهره‌گیری از کابل‌های شاخه‌ای برای انتقال قدرت بین محرکه و مهره‌ها پیشنهاد می‌شود. نسبت گشتاور موتور به گشتاور اعمالی روی مهره به عنوان نسبت تبدیل معرفی می‌گردد. طراحی جدید، توانایی ایجاد نسبت‌های تبدیل متنوع را در یک سیکل حرکتی دارد. معادلات دینامیک با روش لاگرانژ به دست آمده است. برخورد مهره-مهره و دو میله‌ای-مهره به عنوان قیود هندسی در طراحی به کار گرفته شده و بازه مجاز پارامترهای هندسی بازوی پیوسته را مشخص می‌کند. طراحی با شبیه‌سازی‌های صفحه‌ای آزموده شده است. برای نمایش اثربخشی طراحی پیشنهاد شده، چندین نتیجه شبیه‌سازی ارائه شده است. مقدار بهینه پارامتر هندسی، برای ثابت نگه داشتن نسبت تبدیل گشتاور محاسبه می‌شود. در مقایسه با نمونه‌های گذشته که به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند، هدف با ربات پیوسته مهره‌ای نوین محقق شده است.

Design and analysis of a novel cable-driven backbone for continuum robots

Mahdi Bamdad*, Arman Mardany

Department of Mechanical Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran

*P.O.B.3619995161, Shahrood, Iran, bamdad@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 September 2014
Accepted 14 January 2014
Available Online 14 February 2015

Keywords:
Continuum robot
backbone arm
branched tendon
optimal design

ABSTRACT

In this study, an attempt has been made to provide a new model for the structure of a backbone arm to repel the shortcoming in the generation and transmission of the motion for the continuum robots. Backbone arms such as natural structures include continuum backbones with superior properties such as the ability to adapt to the environment. The actuation power is distributed over the robot's length and makes the shape continuously deformable. In this paper, it has been suggested that a linkage between the backbones and the branched tendons be added for power transfer between the drive and backbones. The ratio of the drive torque to backbone torque is introduced as the transfer ratio. The new design is able to create a variety of transfer ratios during a cycle of motion. The state space equations are extracted by Lagrange equations. The interference of bone-bone and bone-links as geometric constraints are applied to the design and it determines the allowable range of the continuum robot's geometric parameters. This design is examined with planar simulations. To show the effectiveness of the proposed design, several simulation results are illustrated. Optimum geometrical parameters for the constant torque ratio are calculated. The goal is achieved with this novel backbone continuum robot.

1- مقدمه

در صنعت [4] را در بر می‌گیرد. در این میان، اشکال متنوعی از بازو که رسیدن به نقاط غیرقابل دسترسی را ممکن می‌سازد، با ایجاد بیشینگی درجه آزادی فراهم می‌شود. مزایایی که از پیوستگی ساختار قابل دستیابی است، سبب بهره‌گیری از بازوان خرطوم در کاربردهایی جدید نظیر امداد رسانی‌های پیچیده می‌گردد [5]. این موارد علاوه بر کاربردهای عمومی بازوان رباتیک در هدایت اجسام است [1].

تا کنون چندین نوع متفاوت از ربات‌های پیوسته از سوی محققان،

در پاسخ به خواسته بهبود سازگاری و تطبیق پذیری ربات‌ها، به تازگی پژوهش در ربات‌های پیوسته، شکل گرفته است. ساختار این ربات‌ها همچون ساختارهای طبیعی از پیوستگی برخوردار است نظیر خرطوم فیل [1] و دم کانگورو [2]. همچنین به عنوان نمونه، ربات‌های مارگون که با ساختار مشابه حرکت می‌کنند، قابل ذکر است. کارکرد این ربات‌ها از راکتورهای اتمی [3] تا قلاب

Please cite this article using:

M. Bamdad, A. Mardany, Design and analysis of a novel cable-driven backbone for continuum robots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 322-332, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Bamdad, A. Mardany, Design and analysis of a novel cable-driven backbone for continuum robots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 322-332, 2015 (In Persian)

با تغییر جهت اعمال نیرو به مهره توسط کابل با زاویه اتصال می‌توان روی نحوه حرکت مهره‌ها و کشش کابلها اثر گذاشت. در کار گذشته همین نویسندگان تلاش شده است تا با بررسی نسبت هندسی عرض مهره به طول مهره در یک ربات مهره‌ای و کابلی با ساختار موجود، نسبت هندسی مناسب جهت کمینه سازی گشتاور پاسخ دینامیکی استخراج شود [15]. در این پژوهش تلاش شده است تا کابل با یک میله‌بندی متصل به هسته اصلی شود. با اعمال قیود هندسی برخورد در طراحی، شامل مهره-مهره و دو میله‌ای-مهره، یک ساختار نوین برای مهره و نحوه اتصال آن به کابل شاخه‌ای پیشنهاد گردید. این بازوی ماهر قابلیت اعمال نیروی بیشتری در زوایای بالاتر چرخش دارد. نشان داده خواهد شد که با تحلیل ابعادی، می‌توان نسبت گشتاور خروجی به ورودی ربات را تنظیم و کنترل نمود.

در ابتدا ساختار نوین معرفی می‌گردد. سپس معادلات سینماتیک و دینامیک ساختار نوین و مهره‌های موجود استخراج می‌شود. نسبت گشتاور موتور به گشتاور منتقل شده بر روی مهره، به عنوان یک معیار برای سنجش توانایی هندسی و دینامیک تعریف می‌شود. در ادامه قیود مساله شناسایی و بر روی معادلات دینامیک اعمال می‌شود. این امر به مقایسه توانایی‌های دینامیک بر اساس معیار تعریف شده منجر خواهد شد.

در سنجش و مقایسه مهره نوین، چهار دسته شبیه‌سازی مطرح شده است. در آزمایش اول، تأثیر تغییرات عرض مهره و طول دو میله‌ای، بر روی نسبت تبدیل گشتاور بررسی شده است. در آزمایش دوم و سوم نسبت گشتاور در دو نوع مهره، با دو عرض مهره بررسی شده است که هدف از آن نشان دادن توانایی مهره نوین در ایجاد نسبت تبدیل‌های متنوع است. در آزمایش چهارم، نسبت گشتاور ثابت به عنوان یکی از توانایی‌های مهره نوین به صورت بررسی پاسخ دینامیک و مقایسه با نمونه‌های متداول مورد بررسی قرار گرفته است. این پاسخ دینامیکی به صورت یک فرایند کنترل استخراج شده است.

2- معرفی ساختار نوین

نیروی عملگری از طریق ایجاد کشش مثبت در کابل‌ها، به مهره‌ها در روی بدنه اصلی بازوی رباتیکی اعمال می‌شود. در اغلب مهره‌های به کار گرفته شده در بازوان ماهر ساختار پیوسته کابل عمود بر عرض مهره، d ، به مهره متصل شده است در نتیجه مطابق شکل 1-د، با افزایش زاویه نسبی دو مهره متوالی، موتور باید گشتاور بیشتری را اعمال کند. این به خاطر ایجاد مؤلفه غیر مؤثر کشش، در کابل‌های متصل به هر مهره است. در ساختار نوین، که در شکل 1-الف و ج نشان داده شده است؛ این فرایند به گونه‌ای متفاوت ایجاد می‌شود.

استفاده از مفاصل و اعضای خمشی در مکانیزم‌های نرم قابلیت‌های حرکتی را بهبود بخشیده است [16]. در اینجا از مفصلی غیرفعال در آرایش حرکتی ربات مهره‌ای استفاده می‌شود. اتصال کابل با افزودن یک دو میله‌ای (شکل 1-ج) امکان‌پذیر شده است. در این مقاله نشان داده خواهد شد که با تغییر ابعادی در پارامترهای تعریف شده، می‌توان نسبت گشتاور خروجی به ورودی ربات را تنظیم و کنترل نمود.

ساختار مهره‌ای نوین، در شکل 2 با جزئیات بیشتری نشان داده شده است. یک کابل بصورت سراسری در بدنه ساختار هدایت می‌شود. این کابل محرک از دو طرف به موتور متصل شده و یک حلقه بسته عملگر را تشکیل می‌دهد. همچنین در نقطه رسیدن به هر مهره دارای یک شاخه است که به

پیشنهاد شده است. تنوع این ربات‌ها عموماً بر اساس تفاوت‌هایی در معماری و ساختار فیزیکی اجزای سازنده و نوع محرکه ایجاد شده است [6]. اجزای سازنده ربات‌های پیوسته را می‌توان مهره‌هایی در نظر گرفت که پلی بین بازوان مجزای رباتیک و ساختارهای یکپارچه هستند [1].

بنا بر معماری گسسته و پیوسته مهره‌ها، همچنین جنس و رفتار الاستیک آن‌ها می‌توان مرزهایی بین ساختارهای نرم رباتیکی قائل شد. با این حوزه نسبتاً وسیع تعریف شده، می‌توان گونه‌هایی از ربات‌های ابرافزونه مارگون را نیز در دسته ربات‌های ساختار پیوسته جای داد. در آن‌ها از مهره‌هایی مجزا و عموماً غیرقابل انعطاف بهره برده می‌شود [6]. در دسته دیگر ربات‌های پیوسته، مفاصل معمول لولایی و کشویی حذف شده و ساختار اصلی دارای یک هسته یکپارچه مرکزی است. تغییر طول، خمش و یا حتی پیچش بدنه ربات باعث حرکت در صفحه و یا فضا می‌شود [7].

ربات پیوسته با هر ساختاری نیازمند سیستم عملگری است. یکی از راه‌های متداول تحریک مهره‌ها، گسسته و یا پیوسته، کابل‌های انتقال قدرت در یک مجموعه تاندون است. در این مقاله، تمرکز روی ربات‌های مهره‌ای است که نقش عملگر کابلی، تغییر شکل بازوی رباتیک پیوسته است.

ربات‌هایی که با کابل هدایت می‌شوند، بنا بر نوع اتصال کابل‌ها، به دو دسته پایان پذیر و بی‌پایان تقسیم می‌شوند [8]. ساختارهای مهره‌ای-کابلی، اغلب از وزن کم برخوردارند. یکی از معروف‌ترین کارکردهای این عملگرها، ربات داوینچی جراح است. در این ربات مهره‌ای، یک کابل، چندین درجه آزادی را به طور هم زمان کنترل می‌کند طوری که بازوها دارای تغییرات زاویه‌ای نسبی برابر هستند [9]. در ربات‌های کابلی-مهره‌ای، حرکت می‌تواند با اختصاص یک کابل به هر مفصل و یا یک کابل به چند مفصل به منظور کنترل چند درجه آزادی با یکدیگر انجام گیرد [10]. انگشتان رباتیک که به وسیله یک کابل و یا چند کابل کنترل می‌شوند نمونه‌ای متداول است. کابل-های شاخه‌ای به ربات کمک می‌کند تا با یک رشته کابل متصل به محرکه، چندین بازوی رباتیکی را کنترل کند.

در این ساختارها، نحوه اتصال و آرایش کابلها یکی از تأثیرگذارترین عوامل کارکردی است. در حالت عمومی ربات‌های مهره‌ای-کابلی، یک کابل از دو طرف به موتور متصل می‌گردد ولی در گروه دیگر این کابل از هر طرف به یک موتور مجزا متصل می‌شود [11، 12]. نحوه اتصال بدنه مهره به کابل نیز تأثیر زیادی بر روی گشتاور موتورها می‌گذارد. گاهی این بازوان رباتیکی بر مبنای سایش مهره به کابل حرکت می‌کنند. به عبارتی هر چه ضریب اصطکاک بیشتر باشد، ربات راحت‌تر به شعاع انحنا یکسان می‌رسد و یا برای رسیدن به یک زاویه چرخش خاص در انتهای ربات، به چرخش و کشش کمتری نیاز دارد [13]. در برخی موارد، کابل از مهره‌ی قبلی به عنوان پایه اعمال نیرو استفاده کرده و نیروی خود را بر روی مهره بعد اعمال می‌کند.

در این ساختارها علاوه بر نحوه اتصال کابلها، تعداد مهره‌ها و سامانه انتقال حرکت از کابلها هم اهمیت می‌یابد. در مواردی نظیر انگشتان رباتیک، یک کابل از پایه ثابت، چند مهره را به واسطه پولی حرکت می‌دهد [14]. هندسه و نوع مهره می‌تواند تعیین کننده رفتار دینامیکی باشد. اگر از پولی استفاده شود، نسبت تبدیل گشتاور موتور به مهره، به صورت ثابت، فراهم خواهد شد. ولی این امر سبب ایجاد اختلالات و کاستی‌هایی می‌گردد که عموماً در یک ربات ساختار پیوسته با پولی وجود دارد [15]. عدم توانایی حفظ پیکربندی ساختار، در تنش‌های خارجی بالا و خطر لغزش یا گسستگی کابل‌ها، از جمله این مشکلات به حساب می‌آیند. توانایی تحمل نیروی خارجی در یک ساختار مهره‌ای بیشتر از یک ساختار تسمه پولی است [15].

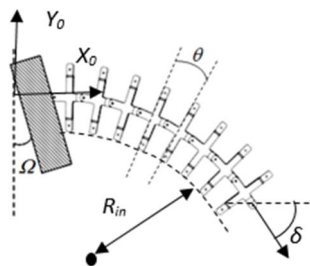
چرخش مهره‌ها، a طول مهره، b عرض مهره و c طول دو میله‌ای پارامترهای ساختاری مهره است. R_{in} شعاع داخلی انحنا و δ زاویه انتهای بازوی پیوسته را نشان می‌دهد. رابطه (1) بیان گر سینماتیک مساله است.

$$q_i = \begin{cases} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{i-1} \cos\left(\Omega + \sum_{k=1}^j \theta\right) + 0.5 \cos\left(\Omega + \sum_{c=1}^i \theta\right) \\ \sum_{j=1}^{i-1} \sin\left(\Omega + \sum_{k=1}^j \theta\right) + 0.5 \sin\left(\Omega + \sum_{c=1}^i \theta\right) \\ \Omega + \sum_{k=1}^i \theta \end{bmatrix} & i > 1 \\ \begin{bmatrix} 0.5 \cos(\Omega + \theta) \\ 0.5 \sin(\Omega + \theta) \\ \Omega + \theta \end{bmatrix} & i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

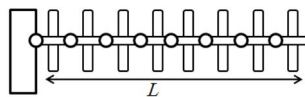
که q_i نشان گر موقعیت مرکز جرم مهره i ام در دستگاه مختصات دوبعدی X_0-Y_0 است. در این رابطه، جایجایی مرکز مهره در راستای افقی، قائم و زاویه مرکز مهره نسبت به مرجع لخت نمایش داده شده است.

4-دینامیک

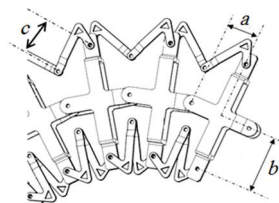
فرض عدم تغییر طول کابل‌ها در یک تحلیل صفحه‌ای دو بعدی در نظر گرفته شده است. همچنین قسمت‌های جانبی مهره‌ها در محاسبه جرم و اینرسی صرف نظر شده است. اگر برای بازوی کامل، جرم m_t و طول ثابت l_t در نظر گرفته شود؛ اینرسی، طول و جرم هر مهره (میله‌ای به طول مهره) بنا بر تعداد مهره‌ها (n) به دست می‌آید. رابطه جرم کل ربات و طول کل ربات با اینرسی و جرم مهره در رابطه (2) بیان شده است.



الف

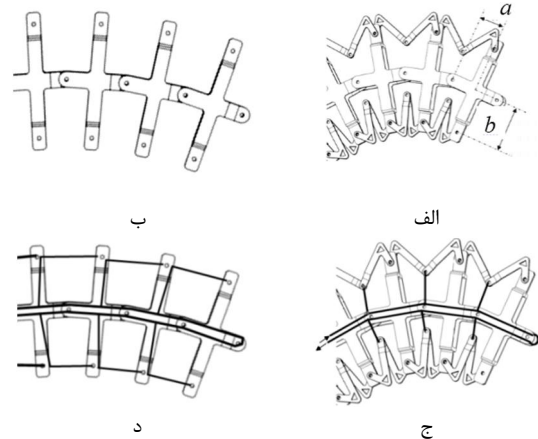


ب



ج

شکل 3 پارامترهای سینماتیک (الف) زاویه پایه، زاویه نسبی (ب) طول کل بازو (ج) پارامترهای ساختاری

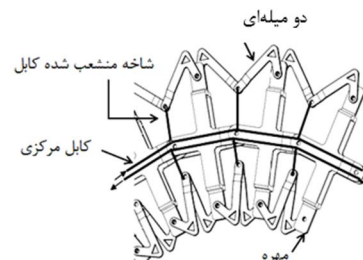


شکل 1 سینماتیک ساختارها (الف) بدنه ساختار پیشنهادی (ب) بدنه ساختار متداول (ج) جایگیری کابل در بدنه نوین (د) جایگیری کابل در بدنه متداول [15]

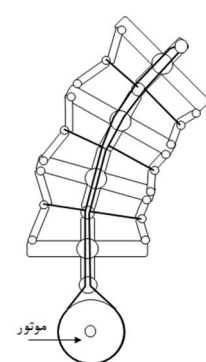
میانه دو میله‌ای متصل می‌گردد. با کشیده شدن کابل، دو میله‌ای حرکت کرده و مهره می‌چرخد. هر کابل، در گذر از میانه‌ی مفصل دو مهره، از میان دو چرخک هرز گرد، عبور می‌کند. امتداد کابل گذرنده در این سیستم شاخه‌ای، راستای اعمال نیرو به بدنه اصلی بازوی پیوسته را تعریف می‌کند. اگر راستا از محل مفصل مهره‌ای غیر فعال بازو بگذرد، امکان به صفر رساندن گشتاور روی مهره‌ها فراهم می‌شود.

3- حرکت شناسی

در حرکت صفحه‌ای بازوی پیوسته، پارامترهای سینماتیکی در شکل 3 به تصویر کشیده شده‌اند. L طول کل بازو، Ω زاویه پایه بازو، θ زاویه نسبی



الف



ب



ج

شکل 2 شناسایی بخش‌های بازوی نوین (الف) ساختار اتصال کابل (ب) ساختار اتصال موتور (ج) ساختار انتقال قدرت

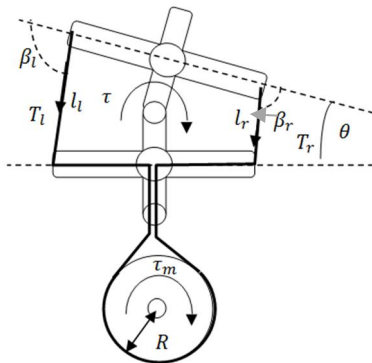
$$\beta_r = \tan^{-1} \left(\frac{-a - a \cos(\theta) + b \sin(\theta)}{b + a \sin(\theta) + b \cos(\theta)} \right) - \theta - \pi \quad (7)$$

2-2-4- مهره پیشنهادی

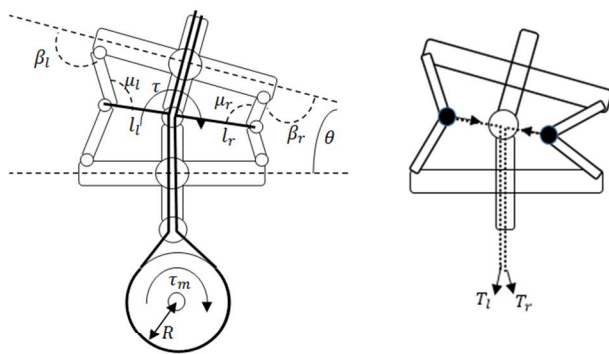
شکل 5، ساختار انتقال حرکت را در مهره نویین به تصویر می‌کشد. با کشیده شدن میانه دو میله‌ای به سمت داخل و مرکز اتصال دو مهره، ساختار خم می‌شود و در ادامه، به خاطر قید سینماتیک اتصال، بازوی دو مهره به هم نزدیک می‌شود و در نتیجه دو مهره نسبت به هم می‌چرخند. رابطه (9.8) بیان گر ارتباط زاویه ریسمان‌ها با زاویه موتور است.

$$\begin{cases} \mu_r = \beta_r - \theta \\ \mu_l = \beta_l + \theta \end{cases} \quad (8)$$

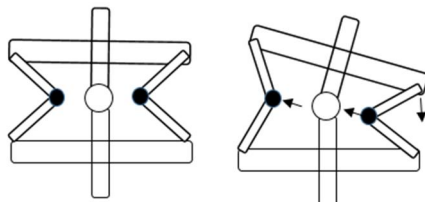
$$\begin{cases} \beta_l = \sin^{-1} \left(\frac{a}{c} \cos(\theta) - \frac{b}{c} \sin(\theta) \right) - \theta \\ \beta_r = \sin^{-1} \left(\frac{a}{c} \cos(\theta) + \frac{b}{c} \sin(\theta) \right) + \theta \end{cases} \quad (9)$$



شکل 4 نحوه انتقال توان موتور با کابل‌ها در مهره متداول



(الف)



(ب)

شکل 5 نحوه انتقال توان موتور با کابل‌ها در مهره پیشنهادی (الف) پارامترهای

سینماتیک (ب) ترتیب حرکت

$$\begin{cases} m_b = \frac{m_t}{n} \\ a = \frac{l_t}{2n} \\ I_b = \frac{m_b l_b^2}{12} \end{cases} \quad (2)$$

1-4-دینامیک مهره‌ها

به منظور تحلیل دینامیکی بازوی ربات، به استخراج ماتریس ژاکوبین نیاز است. در رابطه (3)، J ژاکوبین هر مهره است و در دینامیک برای n مهره، n ماتریس ژاکوبین به کار گرفته می‌شود.

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_i(1)}{\partial \theta} \\ \frac{\partial q_i(2)}{\partial \theta} \\ \frac{\partial q_i(3)}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

و دینامیک ساختار در رابطه (4) با توجه به روش لاگرانژ استخراج می‌گردد.

$$\begin{cases} H\ddot{\theta} + G + C\dot{\theta} + J^T F = \tau \\ H = \sum_n m_b J_i^T(1:2) J_i(1:2) + \sum_n I_b J_i^T(3) J_i(3) \\ C = 0.5 \frac{\partial H}{\partial t} \\ J = J_{i=n}(1:2) \\ G = \frac{\partial U}{\partial \theta} \\ U = g \sum_n m_b q_i \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -a \sin(\theta) \\ a \cos(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \cos(\theta) \\ b \sin(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_r \cos(\theta + \beta_r) \\ l_r \sin(\theta + \beta_r) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

که H ماتریس اینرسی، C ماتریس کریولیس و گریز از مرکز، g مقدار شتاب جاذبه، G ماتریس نیروی گرانش، F نیروی خارجی وارد شده به انتهای بازو، J ماتریس ژاکوبین نقطه انتهای بازو، τ گشتاور روی مهره و U انرژی پتانسیل است.

2-2-4- اعمال گشتاور موتور

تفاوت دو مهره نویین و متداول [14]، نحوه انتقال نیروی موتور به مهره‌ها است. این نحوه انتقال، در شکل 4 برای مهره‌های متداول و در شکل 5 برای مهره نویین به همراه پارامترهای سینماتیک و سینتیک به تصویر کشیده شده است.

1-2-4-مهره متداول

ساختار انتقال حرکت یک مهره در ساختار پیوسته رایج در شکل 4 نمایش داده شده است. رابطه (5)، معادله حلقه بسته سینماتیکی را نشان می‌دهد. در رابطه (7.6) دو زاویه اعمال نیروی کابل‌های چپ و راست بر روی مهره به دست آمده‌اند.

$$\beta_l = \tan^{-1} \left(\frac{-a - a \cos(\theta) - b \sin(\theta)}{b + a \sin(\theta) - b \cos(\theta)} \right) - \theta \quad (6)$$

3-2-4- نسبت تبدیل گشتاور

نیروی عملگر با ایجاد کشش در کابلها به بدنه اصلی بازو اعمال می‌شود. کشش هر کابل منجر به ایجاد گشتاور در مهره‌ها می‌شود. نسبت تبدیل گشتاور موتور به گشتاور مهره، در رابطه (10) نمایش داده شده است.

$$Z = \frac{\tau}{\tau_m} = \frac{b}{R(B_2 - B_1)} \quad (10)$$

که رابطه (11)، B_1 و B_2 را به دست می‌دهد.

$$\begin{cases} B_1 = \frac{A_1}{A_1^2 + A_2^2} \\ B_2 = \frac{A_2}{A_1^2 + A_2^2} \end{cases} \quad (11)$$

که A_1 و A_2 در مهره با ساختار متداول، بصورت رابطه (12) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} A_1 = \sin(\beta_l) \\ A_2 = \sin(\beta_r) \\ Z = Z_o \end{cases} \quad (12)$$

از طرف دیگر عبارات A_1 و A_2 در مهره با ساختار نوین در رابطه (13) نمایش داده شده است.

$$\begin{cases} A_1 = \sin(\beta_l)\cos(\mu_l) \\ A_2 = \sin(\beta_r)\cos(\mu_r) \\ Z = Z_n \end{cases} \quad (13)$$

و معادله جامع دینامیک (4)، با در نظر گرفتن نسبت تبدیل گشتاور به صورت رابطه (14) به دست می‌آید.

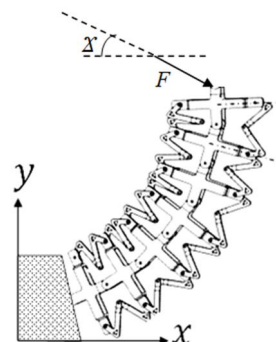
$$H\ddot{\theta} + G + C\dot{\theta} = Z\tau_m \quad (14)$$

3-4- اعمال نیروی خارجی

شکل 6 نیروی خارجی اعمالی به انتهای بازوی ماهر و پارامترهای اصلی آن را نشان می‌دهد. رابطه (15) نیز بردار نیرو کل را بر حسب اندازه و جهت آن نشان می‌دهد. این نیرو بر روی انتهای ربات اعمال می‌گردد. رابطه (16)، معادله جامع دینامیک هر دو مهره متداول و نوین را به ترتیب بیان می‌کند.

$$\vec{F} = F \begin{bmatrix} \cos(X) \\ \sin(X) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{cases} H\ddot{\theta} + G + C\dot{\theta} + J^T F \begin{bmatrix} \cos(X) \\ \sin(X) \end{bmatrix} = Z_o \tau_m \\ H\ddot{\theta} + G + C\dot{\theta} + J^T F \begin{bmatrix} \cos(X) \\ \sin(X) \end{bmatrix} = Z_n \tau_m \end{cases} \quad (16)$$



شکل 6 ساختار و پارامترهای اعمال نیروی خارجی

5- پارامترهای طراحی

پارامترهای اساسی در طراحی یک بازوی مهره‌ای، شعاع انحنای داخلی (R_{in})، بیشینه زاویه چرخش انتها (δ)، طول کل (L_t)، جرم کل (m_t) و زاویه پایه (Ω) در نظر گرفته شده است که در جدول 1 مشاهده می‌شوند.

ربات پیوسته می‌تواند از طول بازوی خود به عنوان یک خرطوم رباتیک و از نقطه انتهایی بازو در قالب مجری نهایی بهره گیرد. شعاع داخلی، از آن جهت اهمیت می‌یابد که اندازه جسمی را که یک بازوی مهره‌ای، در حالت خرطوم، دور آن می‌پیچد تشریح می‌کند. از طرف دیگر، اگر وظیفه ربات توسط نقطه انتهایی انجام شود مانند حمل دوربین، نیاز به تعیین بیشینه زاویه چرخش است. این زاویه بایستی در بازه‌ای با زاویه کمینه انتها (δ_{min}) و زاویه بیشینه انتها (δ_{max}) قرار گیرد.

6- قیود هندسی و دینامیک

برخورد مهره-مهره و دو میله‌ای-مهره به عنوان قیود هندسی در طراحی به کار گرفته می‌شوند و تعیین کننده بازه قابل قبول برای پارامترهای هندسی بازوی پیوسته است.

6-1- بیشینه زاویه نسبی چرخش

اگر مهره‌ها، نسبت به هم بیش از زاویه خاصی بچرخند، برخورد اتفاق می‌افتد که اعمال قید نابرابری بیشینه زاویه، مطابق شکل 7 الزامی است.

از هئندسه برخورد دو مهره رابطه سینماتیکی (17) حاصل می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -a\sin(\theta_{max}) \\ a\cos(\theta_{max}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b\cos(\theta_{max}) \\ b\sin(\theta_{max}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

که بیشینه زاویه برخورد θ_{max} به صورت رابطه (18) دست می‌آید.

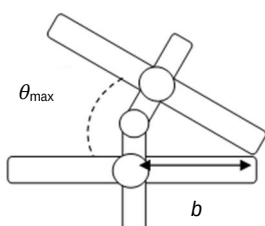
$$\theta_{max} = \cos^{-1}\left(\frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2}\right) \quad (18)$$

6-2- بیشینه عرض مهره

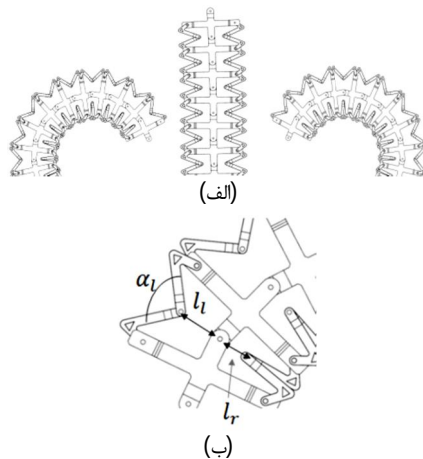
برای اعمال قید سینماتیک روی اندازه عرض مهره، از شعاع انحنای بازوی

جدول 1 پارامترهای طراحی

پارامتر	نشانه
Ω	زاویه پایه
δ	زاویه نقطه انتها
R_{in}	زاویه کمان کمینه
m_t	جرم کل
L_t	طول کل



شکل 7 برخورد مهره‌ها در چرخش نسبی



شکل 9 محدود حرکت دو میله‌ای (الف) حداکثر چرخش به طرفین (ب) تعریف دو فاصله میانه دو میله‌ای از بدنه مهره

6-4- معیار توانایی در مقایسه دو ساختار

در این مقاله، معیار مقایسه ساختار پیشنهادی و متداول، نسبت تبدیل گشتاور Z در نظر گرفته شده است. با یکسان بودن قوای محرکه، هر چه نسبت تبدیل بزرگ‌تر باشد، سهم بیشتری از گشتاور موتور، به گشتاور مفید اعمالی روی مهره تبدیل می‌شود. مهره نوین، به دلیل اضافه شدن دو میله‌ای، می‌تواند نسبت‌های تبدیل متنوع را با تغییرات دلخواه ایجاد کند. از جمله این نسبت‌ها، نسبت تبدیل ثابت است. ابعاد دو میله‌ای به گونه‌ای تعیین می‌گردد که مهره‌ها گشتاور موتور را با یک نسبت ثابت در طول حرکت، دریافت می‌کنند. پس در حقیقت، توانایی ایجاد حالت چرخش و تسمه در مهره‌های مثلثی ایجاد می‌شود. این امر، خود می‌تواند در طراحی ساختارهای پیوسته مهره‌ای شایان توجه باشد.

7- شبیه‌سازی

در سنجش و مقایسه مهره نوین، چهار دسته شبیه‌سازی مطرح شده است. در آزمایش اول، تأثیر تغییرات عرض مهره و طول دو میله‌ای، بر روی نسبت تبدیل گشتاور بررسی شده است. در آزمایش دوم و سوم، نسبت گشتاور نسبت به طول میله بندی، با دو عرض مهره بررسی شده است. در آزمایش چهارم، نسبت گشتاور ثابت به عنوان یکی از توانایی‌های مهره نوین مورد بررسی قرار گرفته است.

7-1- نسبت تبدیل مهره نوین

در این آزمون، تأثیر تغییرات عرض مهره و طول دو میله‌ای، بر روی نسبت تبدیل گشتاور بررسی شده است. نسبت گشتاور بر حسب طول دو میله‌ای و زاویه چرخش $\theta_{\max}$ با توجه به هندسه مسأله تحلیل می‌گردد. هدف از این آزمون بیان میزان رشد متفاوت نسبت تبدیل بر مبنای عرض مهره‌های (b) و طول دو میله‌ای‌های مختلف (c) است که از دو جهت اهمیت می‌یابد. اول آنکه تنوع و آزادی طراحی این مهره جدید را نشان می‌دهد و دیگر، نموداری بدون تیزی راس (ماکزیمم نسبی تند) برای عرض مهره مطلوب به دست می‌-

پیوسته بهره برده می‌شود. شکل 8 نشان‌دهنده شعاع انحنا (R_b) و شعاع داخلی انحنا (R_{in}) می‌باشد. با خم شدن محور ربات، شعاع انحنا داخلی کاهش می‌یابد. در این صورت یک کمینه شعاع انحنا داخلی به عنوان پارامتر طراحی در نظر گرفته می‌شود.

این کمینه شعاع در رابطه (19) بر مبنای طول، تعداد و عرض مهره به دست آمده است.

$$R_{in} = R_{min} = \frac{L}{\delta} - b \quad (19)$$

از آنجا که شعاع با عرض مهره رابطه عکس دارد، کمینه شعاع متناظر با بیشینه عرض مهره است. در نتیجه رابطه (20) نشان‌دهنده عرض مهره بیشینه بر مبنای پارامترهای طراحی است. رابطه (21) نشانگر دو قید عمومی هندسی برای مهره‌های موجود است.

$$b_{\max} = \frac{L}{\delta} - R_{min} \quad (20)$$

$$\begin{cases} b_{\max} \geq 0 \rightarrow L > \delta R_{min} \\ \delta \leq n\theta_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

6-3- بیشینه و کمینه اندازه طول دو میله‌ای

مطابق شکل 9، نباید تداخلی بین دو میله‌ای و بدنه مهره رخ بدهد. به این منظور باید قید نابرابری رابطه (22)، همواره برقرار باشد. پارامترهای مورد نیاز در شکل 9 نشان داده شده است.

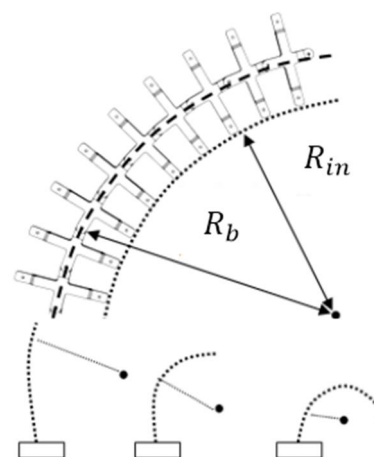
$$\begin{cases} l_l \geq 0 \\ l_r \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

از طرفی، بیشینه باز شدن دو میله‌ای به طرفین (راست α_r و چپ α_l) باید به صورت ذکر شده در رابطه (23) باشد.

$$\begin{cases} \alpha_l \leq 180^\circ \\ \alpha_r \leq 180^\circ \end{cases} \quad (23)$$

این دو قید، خود تابع بیشینه زاویه چرخش و ابعاد a و b هستند. مجموعه محدودیت‌های روی طول مهره به صورت رابطه (24) حاصل می‌شود.

$$\begin{cases} 2b\sin(\theta_{\max}) \leq c \leq \sqrt{b^2 + a^2} \\ c_{\min} = 2b\sin(\theta_{\max}) \\ c_{\max} = \sqrt{b^2 + a^2} \end{cases} \quad (24)$$



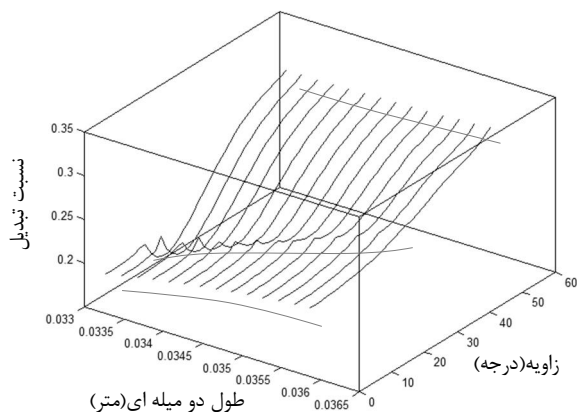
شکل 8 شعاع کمان اصلی و شماتیک کاهش شعاع داخلی در حرکت

آید. از آنجا که یکی از اهداف رسیدن به نسبت گشتاور ثابت است، در نتیجه این آزمایش باید به نموداری رسید که در محدوده خاصی از b و c بتواند نسبت تبدیل ثابت را ایجاد کند.

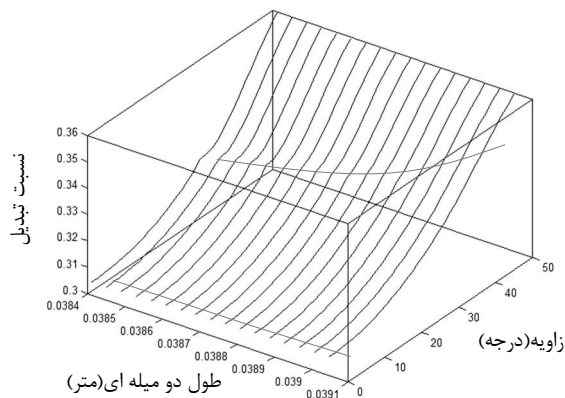
شرایط این آزمایش به گونه‌ای است که a ثابت و برابر $0/03$ متر در نظر گرفته شده است. این مقدار می‌تواند هر عدد دیگری باشد چون در نهایت این نسبت پارامترها است که اهمیت می‌یابد نه مقدار عددی آن‌ها. محاسبات با a ثابت و b متغیر انجام می‌شود و به علاوه برای هر b در کنار a ثابت گفته شده طبق رابطه (24) یک محدوده مجاز برای c به دست می‌آید. در نهایت هر شکل شامل نموداری سه بعدی است که تغییرات زاویه را متناسب با b خاص و طول دو میله‌ای قابل قبول برای آن عرض مهره نمایش می‌دهند.

در اولین نمودار که در شکل 10 نشان داده شده است، بازه قابل قبول برای طول دو میله‌ای حدود یک سانتیمتر تغییر می‌کند و بیشینه زاویه چرخش 80° درجه است. در این حالت، در طول دو میله‌ای‌های پایین، دارای یک بیشینه نسبی و در طول دو میله‌ای‌های بلندتر، روند افزایشی مشاهده می‌شود. در شکل 11، عرض مهره $0/015$ متر بررسی شده است.

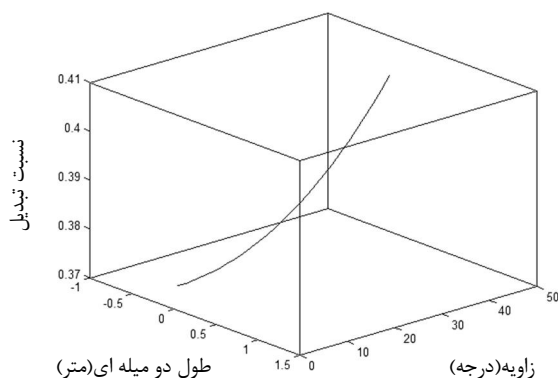
در عرض مهره $0/015$ متر، بازه قابل قبول برای طول دو میله‌ای کاهش یافته است. این کاهش تا رسیدن به یک مقدار واحد که در آن بیشینه و کمینه طول دو میله‌ای با یک عدد برابرند ادامه می‌یابد. در این عرض مهره



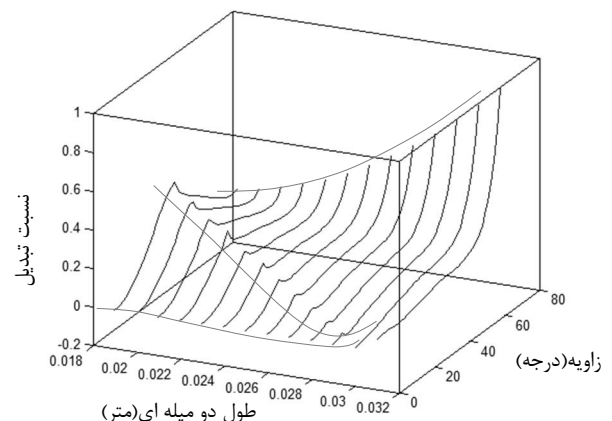
شکل 12 میزان نسبت تبدیل گشتاور با عرض مهره $0/02$ متر



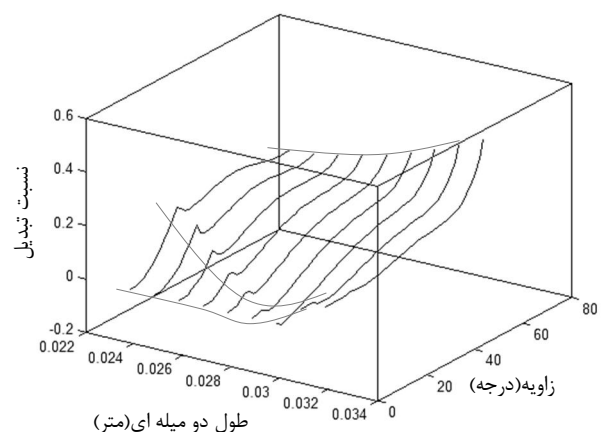
شکل 13 میزان نسبت تبدیل گشتاور با عرض مهره $0/025$ متر



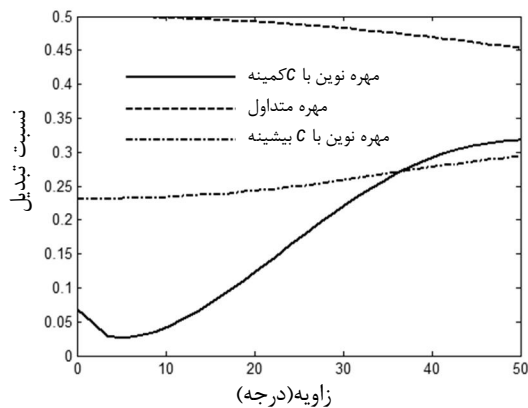
شکل 14 میزان نسبت تبدیل گشتاور با عرض مهره $0/03$ متر



شکل 10 میزان نسبت تبدیل گشتاور با عرض مهره $0/01$ متر



شکل 11 میزان نسبت تبدیل گشتاور با عرض مهره $0/015$ متر



شکل 17 مقایسه میزان نسبت تبدیل گشتاور با عرض مهره 0/02 متر

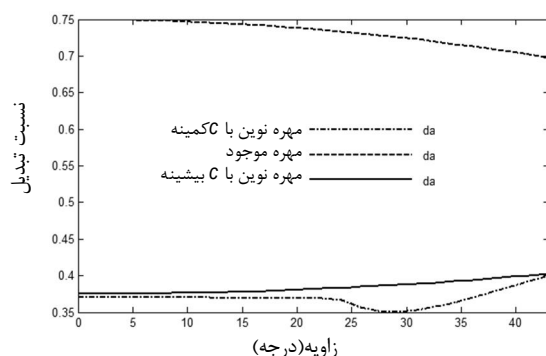
در این عرض مهره، مهره متداول، نسبت گشتاور بالاتری دارد، ولی همچنان مهره نوین می‌تواند نسبت افزایشی را ایجاد کند. با ایجاد نسبت تبدیل افزایشی، بر خلاف دیگر ربات‌های مهره‌ای، می‌توان در زوایای نسبی بالاتر، اعمال نیروی بالاتری داشت. در شکل 18 نیز در عرض مهره 0/03 متر نسبت تبدیل بررسی شده است.

با افزایش میزان عرض مهره، نسبت گشتاور مهره نوین، نسبت به مهره متداول، افت پیدا می‌کند ولی همچنان افزایشی است. این نسبت به سمت ثابت بودن، پیش رفته است. این امر، نشان می‌دهد که می‌توان با طراحی خاص، روی مهره نوین، امکان ایجاد نسبت تبدیل گشتاور ثابت را فراهم کرد.

7-3- ایجاد نسبت تبدیل ثابت

یکی از برتری‌های سیستم‌های چرخ و تسمه، نسبت به مهره‌ای، امکان ایجاد نسبت تبدیل گشتاور ثابت، در طول چرخش است که مهره نوین، این امکان را مطابق شکل 16 فراهم آورده است. با تمرکز بر روی ایجاد این نسبت تبدیل گشتاور ثابت و استخراج دقیق نسبت‌های هندسی بین پارامترهای a, b, c به پروفیلی می‌توان دست یافت که بیش‌ترین انطباق را با نمودار زاویه و نسبت گشتاور ثابت داشته باشد.

اگر شرایط هندسی جدول 2، فراهم گردد، نسبت تبدیل گشتاور ثابت خواهد بود. در چنین شرایطی، مهره متداول، همچنان نسبت گشتاور کاهشی را فراهم آورده است. این امر در شکل 19 قابل مشاهده است.



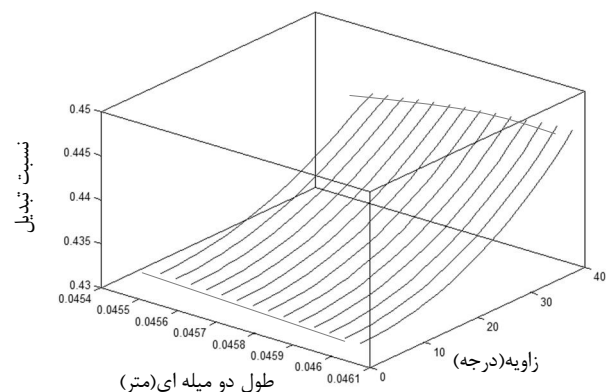
شکل 18 مقایسه میزان نسبت تبدیل گشتاور با عرض مهره 0/03 متر

نسبت گشتاور همچنان بر خلاف مهره‌های متداول افزایشی است. اما با دیدن تفاوت نسبت گشتاور، در بالا و پایین بازه زاویه چرخش این نکته قابل حصول است که تغییرات کاهش داشته است. در کنار این موضوع در یک روند دایمی با افزایش عرض مهره زاویه چرخش محدودتر شده است. در شکل 15، تغییرات، با شیب کندتر ادامه دارد.

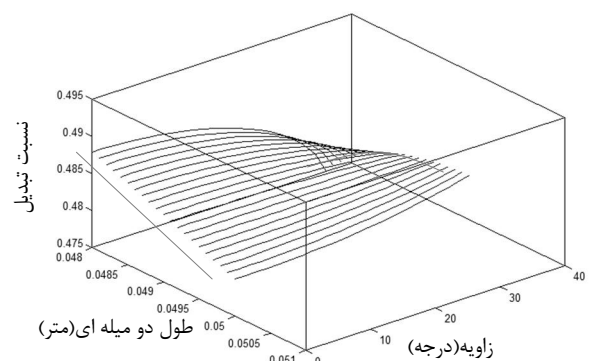
بازه‌ی انتخاب طول دو میله‌ای کوچک‌تر شده و زاویه بیشینه قابل چرخش هم به 40 درجه کاهش یافته است. در شکل 16، با رسیدن عرض مهره به 0/04، هدف آزمایش محقق شده است و نمودار، نسبت تبدیل گشتاور ثابتی را نمایش می‌دهد. این رفتار در بخش‌های بعدی به صورت تحلیلی بررسی می‌گردد.

7-2- مقایسه نسبت تبدیل

در این قسمت برای نمایش تأثیر طول دو میله‌ای C ، تلاش شده است تا در سه وضعیت هندسی، نسبت‌های گشتاور، بررسی شوند. در این شبیه‌سازی با یک عرض مهره مشخص، دو مقدار بیشینه و کمینه قابل قبول برای C مطابق رابطه (24) در نظر گرفته شده است. دو نوع مهره متداول (بدون حضور دو میله‌ای) و پیشنهاد شده مطابق شکل (4) و (5)، با یکدیگر در عرض مهره 0/02 مقایسه شده‌اند. هر کدام در شکل 17، در دو حالت بیشینه و کمینه بازه برای طول دو میله‌ای بررسی شده‌اند.



شکل 15 میزان نسبت تبدیل گشتاور با عرض مهره 0/035 متر



شکل 16 میزان نسبت تبدیل گشتاور با عرض مهره 0/04 متر

نمایان است، در کنار نسبت تبدیل ثابت، با تغییر N میزان عددی نسبت تبدیل نیز تغییر می‌کند.

5-7- معادله دینامیک در نسبت تبدیل ثابت

با توجه به رابطه (27)، معادله دینامیک بازوی مهره‌ای با ساختار دو میله‌ای افزوده، به صورت رابطه (28) ویرایش می‌گردد.

$$H\ddot{\theta} + G + C\dot{\theta} + J^T F \begin{bmatrix} \cos(X) \\ \sin(X) \end{bmatrix} = \frac{N}{\left(\sqrt{\frac{D_1}{D_3+D_4}} + \sqrt{\frac{D_2}{D_5+D_6}}\right)} \tau_m \quad (28)$$

این معادله، ساختار دینامیک بازوی مهره‌ای با ساختار دو میله‌ای افزوده را با نسبت تبدیل گشتاور ثابت تدوین می‌کند. در این مقاله نشان داده شد که ساختار مهره‌ای بدون دخالت دو میله‌ای نمی‌تواند هم چون ساختارهای پیوسته تسمه و پولی انتقال گشتاور با نسبت ثابت را تأمین نماید. ساختار پیشنهاد شده بر خلاف ساختار بازوی مهره‌ای متداول، رفتار خطی در انتقال گشتاور از موتور به مهره دارد.

6-7- محاسبه کشش و پیش کشش کابل‌ها

برای محاسبه کشش کابل‌ها از تصویر گشتاور بر روی امتداد کابل‌ها استفاده شده و در دو حالت مهره نوین و مهره متداول به کار گرفته می‌شود. کشش کابل‌ها از رابطه (29) حاصل می‌شود.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_r \end{bmatrix} = \frac{\tau}{A_1^2 + A_2^2} \begin{bmatrix} A_1 \\ -A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \tau \quad (29)$$

که T_r و T_1 کشش کابل چپ و راست مهره است.

7-7- تحلیل دینامیکی

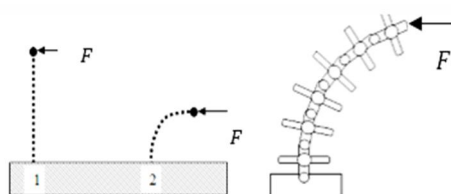
تحلیل دینامیک و کنترل، با شبیه‌سازی دینامیک و مقایسه دو ساختار در این بخش تدوین می‌شود. همان طور که در شکل 20 نشان داده شده است، یک نیروی افقی مقاوم بر انتهای بازو، وارد می‌گردد. تحلیل دینامیک ناظر به رابطه (28) صورت می‌گیرد.

در فرایند کنترل، با قانون کنترل PID، کنترلر ورودی مکان موتور را دریافت می‌کند و فرمان کنترلی گشتاور را بر روی موتور قرار می‌دهد. ضرایب این کنترلر $(P=250, D=1, I=0.05)$ است. مهره نوین یک رفتار هندسی خطی را برای ساختار کنترلی فراهم می‌آورد و در بررسی‌ها و شبیه‌سازی‌های دینامیک انتظار می‌رود تا پاسخ کنترلی نسبت به مهره متداول، کم نوسان‌تر باشد.

در شبیه‌سازی کنترلی، شرایط حرکت مورد نظر، بر روی بازوی با شرایط هندسی جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 3 رابطه نسبت هندسی و N در نسبت‌های ثابت

N	0/5	1	1/5	2	2/5
Z_c	0/24	0/45	0/7	0/9	1/1



شکل 20 شماتیک مساله دینامیک

از آنجا که نسبت پارامترها در ایجاد نسبت تبدیل گشتاور ثابت اهمیت می‌یابد و مقدار آن‌ها اهمیتی نمی‌یابد در نتیجه با بی بعد کردن مقادیر بر مبنای a ، جدول 2 برای ایجاد نسبت ثابت حاصل می‌شود. مقدار R تأثیری در شیب و ثبات نمودار ندارد بلکه فقط محور عمودی نمودار نسبت گشتاور را در مقداری ثابت ضرب می‌کند.

در ادامه از نسبت‌های جدول 2 برای ساده‌سازی رابطه (10) استفاده خواهد شد. هدف رسیدن به رابطه‌ای است که هم تغییرات جزئی نسبت تبدیل را نسبت به زاویه بیان کند و هم مقدار کلی آن را به صورت یک عدد نمایش دهد.

4-7- تدوین رابطه نسبت گشتاور ثابت

نسبت تبدیل گشتاور، برای یافتن نسبت تبدیل ثابت، به صورت رابطه (25) تدوین می‌شود:

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta} \approx 0 \quad (25)$$

Z_c ، نمایانگر نسبت تبدیل ثابت می‌باشد که از رابطه (25)، به دست می‌آید و در رابطه (26) نمایش می‌یابد.

$$Z_c = \frac{b}{R \left(\sqrt{\frac{D_1}{D_3+D_4}} + \sqrt{\frac{D_2}{D_5+D_6}} \right)} \quad (26)$$

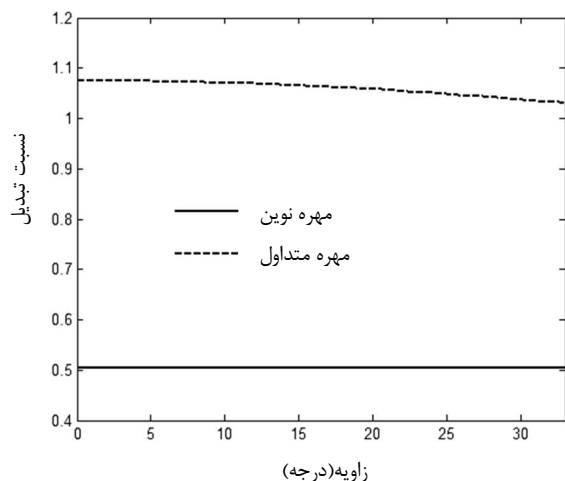
اگر نسبت هندسی عرض مهره (b) به شعاع بازوی گشتاور موتور (R) ، به صورت نسبت مستقلی با نماد (N) ، تعریف گردد، رابطه (26) به صورت رابطه (27) ساده می‌گردد.

$$Z_c = \frac{N}{\left(\sqrt{\frac{D_1}{D_3+D_4}} + \sqrt{\frac{D_2}{D_5+D_6}} \right)} \quad (27)$$

با توجه به رابطه نهایی (27) و با تغییر N ، نمودار Z_c بر مبنای زاویه چرخش موتور (θ) به صورت شکل 19 به دست می‌آید. همان گونه که در جدول 3

جدول 2 شرایط هندسی نسبت تبدیل گشتاور ثابت

R	b	c	a
0/0231	0/0429	0/0501	0/03
0/77	1/43	1/67	1



شکل 19 ایجاد نسبت تبدیل ثابت

شکل 23 نشانگر مسیر حرکت ربات در تحقق مسیر مطلوب انتهای بازو است. در این نمودار با استناد به خطای کمتر و نوسانات پایین تر، برتری پاسخ ساختار نوین به ساختار متداول قابل مشاهده است. هر دو ساختار دارای مشخصات مهره، موتور و مسیر مرجع یکسان هستند ولی به دلیل ساختار انتقال قدرت با نسبت خطی، کنترلر بر روی ساختار نوین پاسخ بهتری دارد. میزان قدر مطلق خطای کنترل در شکل 24 نشان داده شده است.

8- نتیجه گیری

در این پژوهش، تلاش شده است تا با پیشنهاد ساختار یک مهره جدید برای بازوی پیوسته مهره‌ای، توانایی‌های جدیدی را در این دسته از بازوان رباتیکی ایجاد نمود. در این طراحی، با افزودن یک دو میله‌ای، به میانه مهره‌ها، قابلیت ایجاد نسبت تبدیل‌های گشتاور متنوع به دست آمده است. به دلیل جهت اعمال نیروی کشش کابل‌ها در مهره جدید، که در شکل 1 و شکل 2 نشان داده شده است، رفتار ساختار نوین، با رفتار ساختارهای متداول، متفاوت است. ایجاد نسبت‌های گشتاور ثابت، بنا بر ضرورت‌های کاربردی، در این مهره جدید بررسی شد. با تغییر نسبت هندسی طول دو میله‌ای به عرض مهره، در بازه تعیین شده، رفتار ساختار تغییر می‌کند. مهره‌های متداول، مطابق

همچنین جدول 5، بیان کننده مشخصات دینامیکی و سینماتیکی شبیه‌سازی دو مهره نوین و متداول است. این مقادیر برای مهره نوین ایجادکننده نسبت تبدیل ثابت است.

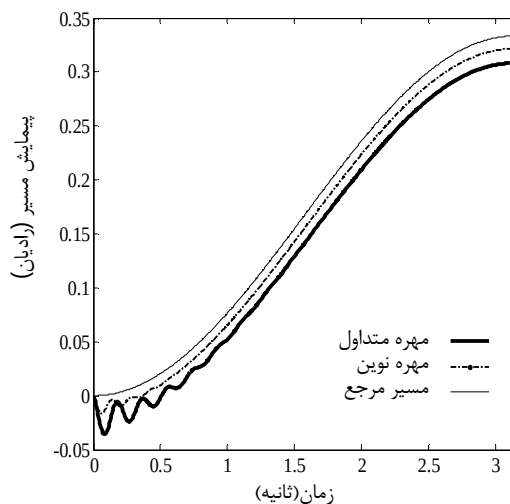
در شکل 21، گشتاور کنترلی بر روی مسیر مرجع و مطلوب، نشان داده شده است. همچنین کشش کابل‌ها در هر دو مهره در شکل 22 نمایش داده شده و کمتر بودن نوسانات کششی در مهره نوین قابل مشاهده است.

جدول 4 شرایط مسیر طی شده

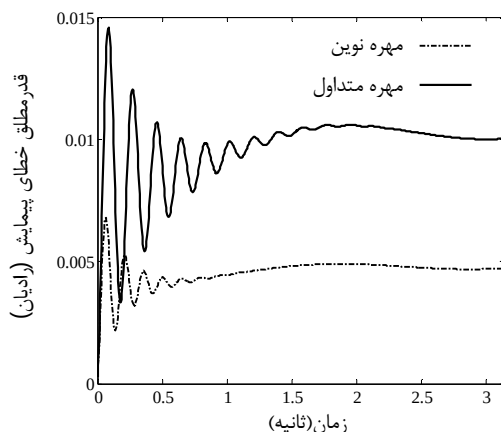
نقاط حرکت	سرعت	زاویه	زمان
1 (ابتدا)	0	0	0
2 (انتها)	0	3/14/2	3/25

جدول 5 شرایط شبیه‌سازی دینامیک

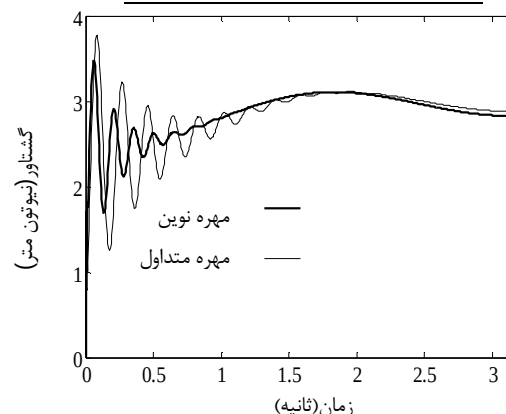
پارامتر	مقدار
a	0/03 متر
b	0/043 متر
c	0/05 متر
N	2/3
وزن کل بازو	1 کیلوگرم
طول کل بازو	0/5 متر
تعداد مهره‌ها	6 عدد
چرخش نقطه انتها	90 درجه
زاویه پایه	90 درجه
بیشینه نیروی انتها	2 نیوتن



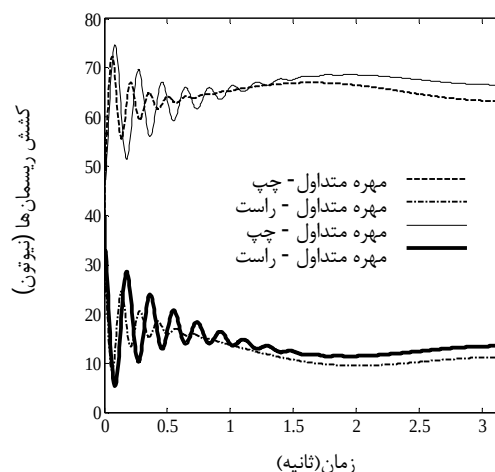
شکل 23 پیمایش مسیر مرجع



شکل 24 خطای پیمایش مسیر مرجع



شکل 21 گشتاور موتورهای دو ساختار



شکل 22 کشش ریسمان‌ها

$$D_6 = \cos(\theta - \text{asin}(8.6 \sin(\theta) - 0.6 \cos(\theta)))^2 \sin(\theta) - \text{asin}(8.6 \sin(\theta) - 0.6 \cos(\theta))^2 \quad (پ-6)$$

10- مراجع

- [1] M.W. Hannan and I.D. Walker, Analysis and experiments with an elephant's trunk robot, *Advanced Robotics*, Vol. 15, No. 8, pp. 847-858, 2001.
- [2] L.S. Cowan, and I. D. Walker, "Soft" Continuum Robots-the Interaction of Continuous and Discrete Elements. In *ALIFE*, pp. 126-133, 2008.
- [3] R. Anscombe, R. Buckingham, A. Graham, N. Parry, Lichon and M. Ferguson, Snake-arm robots conduct nuclear maintenance, *Proceedings of the 2006 International Youth Nuclear Congress*. Finland: Stockholm, Sweden-Olkiluoto, pp. 1-9, 2006.
- [4] Buckingham R. and Graham A, Reaching the unreachable-snake arm robots, *International Symposium of robotics*, 2003.
- [5] H. Tsukagoshi, A. Kitagawa and M. Segawa, Active hose: an artificial elephant's nose with maneuverability for rescue operation, *Robotics and Automation, Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference*, pp. 2454-2459, 2001.
- [6] Webster III, J. Robert, *Design and mechanics of continuum robots for surgery*. Vol. 69. No. 04. 2008.
- [7] M. Dehghani, S. A. Moosavian, Dynamics Modeling of Continuum Manipulators by Constant-Curvature Elements without Numerical Singularities, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 231-240, 2015 (In Persian)
- [8] J.J. Lee and Y.H. Lee, Dynamic analysis of tendon driven robotic mechanisms, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 20, No. 5, pp. 229-238, 2003.
- [9] N.G. Hockstein, J.P. Nolan, B.W. O'Malley, & Y.J. Woo, Robotic microlaryngeal surgery: a technical feasibility study using the daVinci surgical robot and an airway mannequin. *The Laryngoscope*, Vol. 115, No. 5, 2005.
- [10] S.L. Chang, J.J. Lee and H.C. Yen, Kinematic and compliance analysis for tendon-driven robotic mechanisms with flexible tendons, *Mechanism and machine theory*, Vol. 40, No. 6, pp. 728-739, 2005.
- [11] W. Mcmahan, B. Jones, I. Walker, V. Chitrakaran, A. Seshadri and D. Dawson, Robotic manipulators inspired by cephalopod limbs, *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*, 2011.
- [12] S. Ma, S. Hirose and H. Yoshinada, Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulator, *Control Systems, IEEE*, Vol. 13, No. 1, pp. 30-36, 1993.
- [13] J. Jung, R.S. Penning, N.J. Ferrier and M.R. Zinn, A modeling approach for continuum robotic manipulators: effects of nonlinear internal device friction, *Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 5139-5146. 2011.
- [14] Y. Matsuoka, The mechanisms in a humanoid robot hand, *Autonomous Robots*, Vol. 4, No. 2, pp. 199-209. 1997.
- [15] M. Bamdad, A. Mardani, Motion analysis of continuum robots structures with cable actuation, *Modares Mechanical Engineering*, 2014 (in Persian).
- [16] D. B. Camarillo, C. F. Milne, C.R. Carlson, M.R. Zinn, & J.K. Salisbury, Mechanics modeling of tendon-driven continuum manipulators. *Robotics, IEEE Transactions on*, 24(6), 1262-1273, 2008.

رابطه 10، نسبت تبدیل گشتاورهای کاهشی را ایجاد می‌کنند اما در مهره نوین با تغییر ابعاد هندسی می‌توان، نسبت تبدیل ثابت و یا افزایشی ایجاد نمود. مهره جدید، از نظر پاسخ دینامیکی نیز با ایجاد هندسه متفاوت، توانایی پاسخ‌های دینامیک ثابت را دارد. مهره نوین بنا بر نتایج تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها جایگزین مناسبی برای مهره‌های موجود می‌باشد که طراحی منعطف‌تری را نیز دارد. پاسخ دینامیکی با اعمال کنترل کننده، بدون ایجاد گشتاور بیشتر در مهره نوین تحلیل شده است (شکل 21). در بازوی مهره‌ای نوین به دلیل خطی بودن ساختار انتقال قدرت، میزان خطای مهره نوین (0/005 رادیان) کمتر از مهره متداول (0/01 رادیان) است. هم چنین نوسانات آغازین ساختار نوین نیز کمتر است. این مزیت‌ها بدون ایجاد گشتاور بیشتر در مهره نوین ایجاد شده است (شکل 21).

9- پیوست

$$D_1 = \cos(\text{asin}(0.6 \cos(\theta) + 8.6 \sin(\theta)) - 0.5\theta) \sin(\text{asin}(0.6 \cos(\theta) + 8.6 \sin(\theta)) - \theta) \quad (پ-1)$$

$$D_2 = \cos(0.5\theta - \text{asin}(8.6 \sin(\theta) - 0.6 \cos(\theta))) \sin(\theta - \text{asin}(8.6 \sin(\theta) - 0.6 \cos(\theta))) \quad (پ-2)$$

$$D_3 = \cos(\text{asin}(0.6 \cos(\theta) + 8.6 \sin(\theta)) - 0.5\theta)^2 \sin(\text{asin}(0.6 \cos(\theta) + 8.6 \sin(\theta)) - \theta)^2 \quad (پ-3)$$

$$D_4 = \cos(0.5\theta - \text{asin}(8.6 \sin(\theta) - 0.6 \cos(\theta)))^2 \sin(\theta - \text{asin}(\sin(\theta) - \cos(\theta)))^2 \quad (پ-4)$$

$$D_5 = \cos(\text{asin}(0.6 \cos(\theta) + 8.6 \sin(\theta)) - 0.5\theta)^2 \sin(\text{asin}(0.6 \cos(\theta) + 8.6 \sin(\theta)) - \theta)^2 \quad (پ-5)$$