

# بهبود طراحی روباتهای متحرک مارشکل با استفاده از آناتومی مار

فرشاد برازنده<sup>۱\*</sup>; محمدصادق حیدرزاده<sup>۲</sup>; سیدمهدی رضاعی<sup>۳</sup>; محمد علی سادات<sup>۴</sup>; سیف دلیل صفایی<sup>۵</sup>

## چکیده

بیشتر تمرکز تحقیقات انجام شده روی روباتهای مارشکل بر روی چگونگی ایجاد حرکت، کنترل و یا حل دینامیک روبات بوده است و تلاش کمتری در مطالعه ساختار بدن مار و اقتباس از ظرایف آن در طراحی شده است. در نتیجه روباتهای متحرک مارشکل ساخته شده تاکنون چیزی فراتر از یک نمونه آزمایشگاهی نیستند و هنوز پا به عرصه صنعت نگذاشته اند. هدف این مقاله، مطالعه آناتومی مار و ارائه راه کارهای تازه در طراحی روباتهای مارشکل است تا قابلیت تبدیل آنها به یک روبات صنعتی متحرک افزایش یابد. نتیجه این کار یافتن اثر آناتومی مار در کاهش گشتاور محرکها و طرز تولید نقاط تکیه گاهی در حرکت موجی کناری است که به طراحی روباتهای مارشکل بدون چرخ کمک می کند.

کلمات کلیدی: روبات مارسان، حرکت ماری شکل، کاهش گشتاور، آناتومی مار.

## *Design Enhancement of Mobile Snake Robots Based on Snake Anatomy*

F. Barazandeh ; M.S. Heydarzadeh; S.M. Rezaei; M.A. Sadat; S. Dalilsafaei

### ABSTRACT

The main concentration of most of the snake robot researches has been on mechanism, control or dynamics. They have rarely focused on snake anatomy to adopt it in design. So far, snake robots are nothing more than an experimental prototype. They have not yet converted to an industrial mobile robot. This paper focuses on snake anatomy to employ its principle in the design of snake robots and increase their chance of being industrial mobile robots. The result was to find the impact of snake anatomy to reduce actuators' torque, as well as the way peg points are established during serpentine motion. This finding will help to remove wheels under snake robots.

**KEYWORDS :** Snake robot, snake movement, torque reduction, snake anatomy.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۵/۲۲

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۷/۹/۱۸

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول و استادیار - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email: fbarazandeh@aut.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email: s\_heydarzadeh@yahoo.com

<sup>۳</sup> دانشیار - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی امیرکبیر smrezaei@aut.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشجوی کارشناسی - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی امیرکبیر seid.sadat@gmail.com

<sup>۵</sup> کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی قزوین Email: seif.dalilsafaei@gmail.com

زمینها استفاده می‌کنند. این حرکت سریعترین و قابل انعطاف ترین حرکت در مار است و توانایی ایجاد آن در روبات، قابلیت آن را به گونه چشمگیری افزایش می‌دهد.

- به دلیل استفاده از ساختار ماهیچه ای ماهی در ساخت روباتهای مار شکل، گشتاور محرکها و در نتیجه وزن آنها از سمت سر به دم افزایش می‌یابد. به همین دلیل در اکثر طرحها از محرکهای قوی یکسان در سراسر قسمتهای روبات استفاده می‌گردد. این امر باعث افزایش وزن روباتها، کاهش انعطاف پذیری و افزایش انرژی مصرفی می‌شود. ساختار ماهیچه ای ماهی، برای اولین بار توسط هیروس در ساخت روباتهای مارشکل استفاده شد [۱۴] و توسط سایرین در طراحی تقلید شد.

- به دلیل استفاده از سیستم ماهیچه ایمای که توانایی اعمال نیروی کمی در برابر مانع دارد، و همچنین به دلیل استفاده از مفصل های صلب در محل اتصال مدولها، اکثر روباتهای ساخته شده تنها قابلیت انجام یک یا دو حرکت از حرکتهای مار را دارند و تا کنون روباتی که بتواند چهار حرکت اصلی مار را انجام دهد ساخته نشده است. به همین دلیل این روباتها قابلیت اصلی مار که استفاده از حرکت مناسب در محیط مناسب است را نمی‌توانند داشته باشند.

- مشکل اصلی روباتهای ساخته شده ایجاد نقاط تکیه گاهی در هنگام حرکت است (بخش ۵ مقاله). به همین دلیل این روباتها یا دارای چرخ هستند (شکل ۱-الف)، یا نقاط تکیه گاهی بصورت مصنوعی تعبیه می‌شوند (شکل ۱-ب)، و یا از حرکتی غیر از حرکت موجی کناری برای پیشروی استفاده می‌کنند (شکل ۱-ج). در هر سه حالت روبات توانایی حرکت در زمینهای ناهموار و محیطهای پر مانع را ندارد.

- این مشکلات باعث شده است تا تحقیق روی روباتهای مارشکل به یک بن بست عملی برسد و با همه محاسن بالقوه خود به تدریج از صحنه فعالیت‌های پژوهشی خارج شوند. روباتهای متحرک ساخته شده تاکنون، چیزی فراتر از یک اسباب بازی علمی نیستند. هدف از این تحقیق بررسی آناتومی مار به منظور یافتن راه حلی مناسب برای حذف چرخها، افزایش کاری و نزدیکتر کردن قابلیت‌های روباتهای متحرک مار شکل به توانایی های مار واقعی است. امید است نتیجه این بررسیها، طراحی روباتهای مار شکل را از بن بست موجود خارج کند.

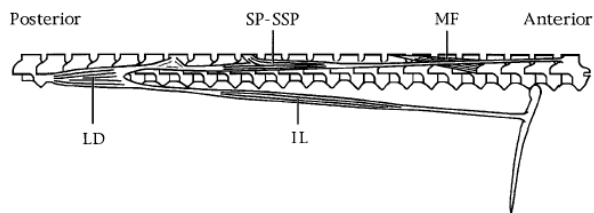
در طبیعت الگوهای فراوانی وجود دارد که الهام بخش محققان در دستاوردهایشان بوده است. بدن مار نیز دارای مشخصه هایی است که از دیدگاه مهندسی بسیار قابل توجه است. بدن باریک مارها آنها را قادر می‌سازد تا در زمین های بسیار ناهموار، مسیر های مارپیچ و داخل مجاری تنگ حرکت کنند. مارها بدلیل گسترش وزن، می‌توانند در زمین هایی که محکم نیستند نظیر زمین های باتلاقی و شن زارها حرکت کنند. پایداری سینماتیکی بدن، مارها را قادر می‌سازد تا از شکافهای موجود در زمین و شاخه های درختان براحتی عبور کنند.

حرکت مارها اولین بار توسط گری<sup>۱</sup> و لیسمن<sup>۲</sup> مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت ([۹] و [۱۱]). هیروس<sup>۳</sup> بیشترین تحقیق بر روی روباتهای مارسان را انجام داده است و اولین کسی بود که سعی در اقتباس از ساختار بدن مار در طراحی روبات نموده است [۱۴]. در زمینه فرمول بندی سینماتیکی و کاهش گشتاور روباتهای مارسان می‌توان به کارهای چیریکجیان<sup>۴</sup> و بوردیک<sup>۵</sup> اشاره نمود [۸]. یک نوع روبات مدولار که به نام روبات تطبیق پذیر از آن یاد شده است، توسط محققین دو دانشگاه ژاپن ساخته شد [۱۳]. روبات بایراکتاراغلو<sup>۶</sup> و کیلی شارلسان<sup>۷</sup> شاید نزدیکترین اقتباس از ساز و کار حرکتی مار در روباتهای مارسان بدون چرخ است [۷]. روبات با فشار به نقاط تکیه گاهی<sup>۸</sup> مصنوعی که پیشتر در صفحه حرکت توسط طراح تعبیه شده است به جلو حرکت می‌کند.

از نمونه کارهای محققان ایرانی می‌توان به کارهای نویسندگان در زمینه طراحی و کنترل روبات مار شکل سه بعدی [۵]، بررسی مفاصل جدید [۱] و کاهش گشتاور محرکهای روبات [۶] اشاره نمود. نمونه دیگری از کار محققان ایرانی، توسط حاجی آقا معمار و همکاران در زمینه طراحی و ساخت روباتی با قابلیت تبدیل به پیکربندی های متفاوت و تطبیق پذیری با شرایط محیط صورت گرفته است [۲]. عزیزاده نیز روی تولید مسیر برای حرکت روباتهای کرم شکل برای حرکت در زیر آب کار کرده است [۳].

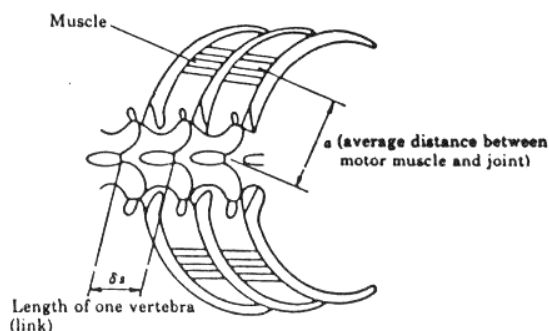
در بیشتر روباتهایی که تاکنون ساخته شده اند اشکالات اساسی دیده شده که عبارتند از:

- روباتها یا قادر به انجام حرکت موجی کناری<sup>۹</sup> نیستند و یا در صورت توانایی در انجام این نوع حرکت، نیاز به چرخ دارند. چرخها در زمینهای غیر هموار مشکل ساز هستند و قدرت مانور روبات را کاهش می‌دهند. حرکت موجی کناری، حرکتی است که مارها در اکثر جابجایی‌های



شکل ۲- سیستم ماهیچه های محوری بدن مار [۱۲]

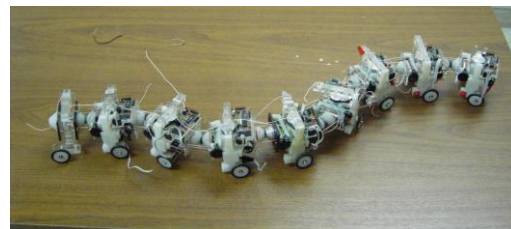
حرکت بدن ماهیان در آب به حرکت مار بسیار شبیه است. ولی ساختار ماهیچه ای این جانور بسیار با مار متفاوت است. در اکثر ماهیان حرکت بدن ماهی از طریق فعالیت ماهیچه های قطعه ای انجام می شود. دو انتهای هر ماهیچه قطعه ای، روی دو دنده متوالی از ستون فقرات نصب است (شکل ۳). در این ساختار نیروی ماهیچه ها در انجام کار با یکدیگر جمع نمی شوند. به دلیل اینکه محیط اطراف جانور همیشه با آب پر شده است و ماهی هیچگاه عملی مانند شکستن استخوانهای شکار یا حرکت های متفاوت در محیط های مختلف انجام نمی دهد، این ساختار ماهیچه ای برای جانور کاملا مناسب است.



شکل ۳- سیستم ماهیچه ای ماهی [۱۴]

یک ماهی در خشکی بسیار سخت حرکت می کند، زیرا محیطی که حرکت در آن انجام می شود به جای احاطه جانور، تنها در زیر بدن قرار دارد. بدن جانوران خشکی باید علاوه بر حرکت جانبی، حرکت های کمری- شکمی نیز ایجاد کند. سیستم ماهیچه ای بدن ماهی، که در آن ماهیچه هایی حرکتی بین دو دنده متوالی قرار دارند، برای خزندگان مناسب نیست [۴]. اکثر روبات های مارسان ساخته شده در حقیقت از چنین سیستمی استفاده نموده اند و به همین دلیل انعطاف حرکتی مار واقعی را ندارند.

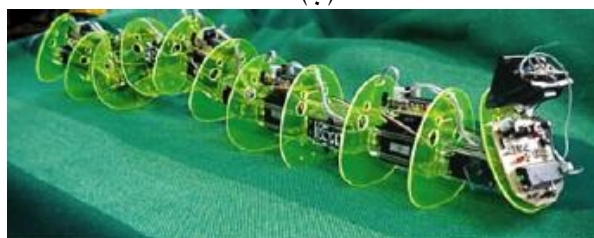
وجه تمایز روباتی با سیستم تحرک مار نسبت به روباتی با سیستم تحرک ماهی در آن خواهد بود که محرک فعال کننده یک مدول، به جای قرار گرفتن در مدول بعدی در چندین مدول دورتر قرار می گیرد. در هر دو سیستم در هنگام ایجاد حرکت، محرکها همزمان فعال می شوند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱- الف) روبات چرخدار ساخته شده توسط نگارندگان مقاله (ب) روبات بدون چرخ با میله نصب شده در زمین بعنوان نقطه تکیه گاهی [۷] ج) روبات آنا ۲ با حرکت کرم شکل [۱۵]

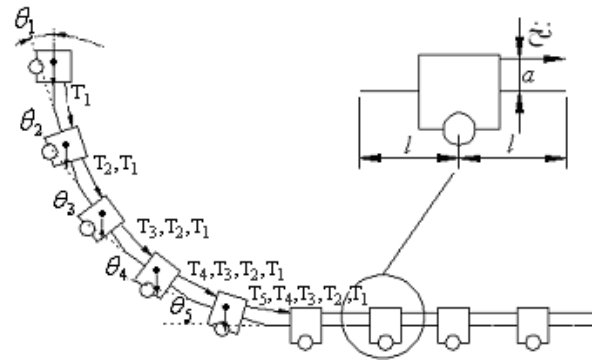
## ۲- مقایسه سیستم ماهیچه ای مار و ماهی

ستون مهره های مار یک کمان انعطاف پذیر است که بخش های مختلف بدن به آن متصل می شوند و برای نخاع یک تونل محافظت کننده فراهم می کند. در شکل (۲) قسمتی از ستون مهره مار (بین مهره های ۱۰۰ تا ۱۳۰)، دیده می شود. همانطور که دیده می شود، ماهیچه ای که به یک مهره نیرو وارد می کند (مانند زنجیره های ماهیچه ای LD، SP-SSP، MF و IL در شکل (۲))، انتهایش روی چند مهره عقب تر قرار گرفته است. در بیشتر مواقع این ماهیچه ها در چند نقطه در طول خود نیز به ستون فقرات متصل هستند. در این آرایش ماهیچه ای، نیروی ماهیچه ها در انجام کار با یکدیگر جمع می شوند. به همین دلیل قابلیت اعمال نیروی بیشتری دارند و باعث می شود تا مار استخوانهای شکار خود را بشکند و آن را ببلعد. این مطلب در قسمت بعد در مورد بلند کردن سر ثابت شده است. همچنین این ساختار جانور را قادر می سازد تا حرکات متفاوتی در شرایط مختلف ایجاد کند که ساز و کار حرکتی هریک با دیگری تفاوت دارد.

### ۳- محاسبه گشتاور محرکها در تحرک روبات با

#### سیستم ماهیچه ای مار و ماهی

برای تشخیص تفاوت عملکرد سیستم ماهیچه ای مار و ماهی، بلند کردن سر روبات بعنوان نمونه در نظر گرفته می شود و به ارائه مدل ریاضی مکانیزم ماهیچه ای مار و ماهی در انجام آن پرداخته می شود. در شکل (۴) ساز و کار بلند شدن سر یک روبات با آرایش ماهیچه های مار نشان داده شده است. برای پیاده سازی ساز و کار ماهیچه مار از سیستم نخ و قرقره استفاده شده است. در شکل هر مدول روبات بصورت یک مستطیل در نظر گرفته شده است که با نخ که از مجرای هدایت نخ سایر مدولها می گذرد، به موتوری که روی چند مدول دورتر قرار دارد، متصل است. با چرخش موتور، نخ به دور قرقره متصل به موتور جمع می شود (شکل (۵)) و مدول بلند می شود.



شکل ۴- شماتیکی از سیستم بلند کننده سر روبات



شکل ۵- شماتیکی از سیستم بلند کننده

دو مدول متوالی بوسیله یک قطعه لاستیکی به یکدیگر متصل می شوند. برای بررسی، فرضیهایی زیر در نظر گرفته می شوند که عبارتند از:

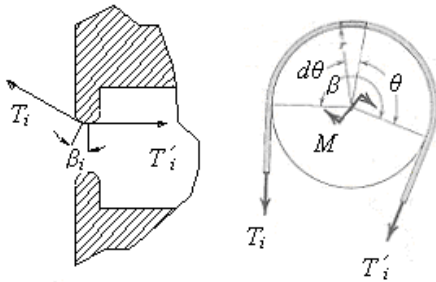
- شماره گذاری مدولها از سر آغاز می شود.
- حرکتها مدولها آهسته است (شتاب حرکت صفر است).
- اگر  $n$  مدول از زمین بلند شوند، موتور مدول اول روی مدول  $n+1$ ، موتور مدول دوم روی مدول  $n+2$ ، و موتور مدول  $n$  روی مدول  $2n$  قرار دارد (موتورها در مدولهایی که روی زمین هستند نصب شده اند). طبیعی است که مدولهای انتهایی موتور محرک نخواهند داشت.
- نخ ها از روی هم می گذرند و از زاویه بین نخها با راستای

افق در مدولهای زمینی، چشم پوشی می شود.

در چرخش یک نخ بدور یک قرقره با اصطکاک (شکل (۶)) - راست، کشش نخ در دو سمت قرقره متغیر خواهد بود و از رابطه (۱) پیروی خواهد کرد [۱۰]:

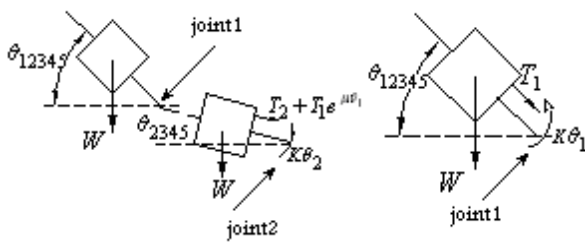
$$T_i' = T_i e^{\mu\beta} \quad (1)$$

بدلیل مشابه، در عبور نخ از بین مدولها، کشش آن در حین عبور از مجرای عبور نخ در هر مدول تغییر می کند (شکل (۶)) - چپ). چنانچه فرض شود که لبه های سوراخ ها بصورت قوسی از دایره باشند، می توان رابطه (۱) را برای بدست آوردن کشش نخ قبل و بعد از سوراخ استفاده کرد. با توجه به توضیحات داده شده، می توان معادلات تعادل گشتاور در هر یک از مفصلها را از روابطی که در ادامه می آید، محاسبه نمود.



شکل ۶- راست: تغییر کشش نخ پیچیده شده به دور یک قرقره که گشتاور  $M$  به آن وارد می شود [۱۰]. - چپ شماتیکی از مجرای عبور نخ در هرمدول.

در شکل (۷) نمودار آزاد مدولهای اول و دوم روبات نشان داده شده است. با نوشتن معادلات تعادل گشتاورها در محل اتصال مدول ۱ و ۲ (joint1 در شکل (۷)) برای مدول اول، رابطه (۲) بدست می آید.



شکل ۷- راست دیاگرام آزاد مدول اول - چپ: دیاگرام آزاد مدول اول و دوم روبات مار سان با سیستم تحرک مار

$$\sum M_{joint,1} = 0 \quad (2)$$

$$\therefore T_1 \cdot a - w \cdot l \cdot c_{12345} - k\theta_1 = 0$$

به روش مشابه تعادل گشتاورهای مدول دوم بصورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$wl \begin{bmatrix} c_{12..n} \\ c_{12..n} + 3c_{2..n} \\ c_{12..n} + 3c_{2..n} + 5c_{3..n} \\ \dots \\ c_{12..n} + 3c_{2..n} + \dots + (2n-1)c_n \end{bmatrix} - a \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix} = 0 \quad (V)$$

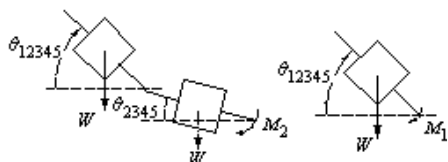
از حل رابطه (V) مقادیر کشش نخ هر مدول ( $T_i$ ) و گشتاور موتورهای هر مدول ( $M_i$ ) بدست می‌آیند (روابط (8) و (9)).

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix} = \frac{wl}{a} \begin{bmatrix} c_{12..n} \\ 3c_{2..n} \\ \dots \\ (2n-1)c_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \dots \\ M_n \end{bmatrix}_S = a \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix} = wl \begin{bmatrix} c_{12..n} \\ 3c_{2..n} \\ \dots \\ (2n-1)c_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

در روباتهای مارسانی که تحرک بر مبنای سیستم ماهیچه‌ای مای صورت می‌گیرد، بین هر دو مدول متوالی یک موتور قرار دارد که گشتاور آن بوسیله یک سیستم انتقال نیرو به مدول جلویی اعمال می‌شود. در شکل (8) نمودار آزاد نیروها برای چنین روباتهایی نشان داده شده است. چنانچه از اصطکاک موجود در مفصل مدول‌ها صرف نظر شود، با نوشتن معادلات تعادل گشتاورها حول مفصل هر مدول، گشتاور موتورها از رابطه (10) بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \dots \\ M_n \end{bmatrix}_F = wl \begin{bmatrix} c_{12..n} \\ c_{12..n} + 3c_{2..n} \\ c_{12..n} + 3c_{2..n} + 5c_{3..n} \\ \dots \\ c_{12..n} + 3c_{2..n} + \dots + (2n-1)c_n \end{bmatrix} \quad (10)$$



شکل ۸- راست: دیاگرام آزاد مدول اول - چپ: دیاگرام آزاد مدول اول و دوم در طرح روبات مارسان با سیستم تحرک ماهی

$$\sum M_{joint,2} = 0 \quad (3)$$

$$\therefore (T_1 e^{\mu\beta_1} + T_2)a - wl.(c_{12345} + 2c_{2345}) - wl.c_{2345} - K\theta_2 = 0$$

در حالت کلی اگر  $n$  مدول از زمین بلند شود، برای مدول  $i$  از این  $n$  مدول، تعادل گشتاورها بصورت رابطه (4) در می‌آید:

$$\sum M_{joint,i} = 0 \therefore (T_1 e^{\mu\beta_{2..i-1}} + T_2 e^{\mu\beta_{3..i-1}} + \dots + T_{i-1} e^{\mu\beta_{i-1}} + T_i)a - wl((2i-1)c_{i..n} + (2i-3)c_{i-1..n} + \dots + 3c_{23..n} + c_{12..n}) - K\theta_i = 0 \quad (4)$$

رابطه (4) را می‌توان به شکل رابطه (5) ساده نمود:

$$a \sum_{h=1}^{i-1} T_h e^{\mu\beta_{h2..i-1}} + aT_i - wl \sum_{h=1}^i (2h-1)c_{h..n} - K\theta_i = 0 \quad (5)$$

نمایش ماتریسی رابطه (5) برای  $n$  مدول که از زمین بلند شده اند بصورت رابطه (6) خواهد بود.

$$wl \begin{bmatrix} c_{12..n} \\ c_{12..n} + 3c_{2..n} \\ c_{12..n} + 3c_{2..n} + 5c_{3..n} \\ \dots \\ c_{12..n} + 3c_{2..n} + \dots + (2n-1)c_n \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \dots \\ \theta_n \end{bmatrix} - a \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ e^{\mu\beta} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ e^{\mu\beta_2} & e^{\mu\beta_2} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{\mu\beta_{2..n-1}} & e^{\mu\beta_{3..n-1}} & \dots & e^{\mu\beta_{n-1}} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

ماتریس ضریب بردار کشش نخ (ماتریس با ضریب  $a$ ) در رابطه (6)، یک ماتریس پایین مثلثی است. براحتی اثبات می‌شود که درمیان یک ماتریس مثلثی برابر با حاصلضرب عناصر روی قطر آن است. چون تمام عناصر قطری مخالف صفر هستند بنابراین وارون ماتریس وجود دارد و می‌توان از حل رابطه (6) میزان کشش نخ و گشتاورهای مورد نیاز را بدست آورد. در صورتیکه از  $K$  و  $\mu$  صرف‌نظر شود، رابطه (6) به رابطه (7) ساده می‌شود.

## ع- تاثیر استفاده از ساختار ماهیچه ای مار در

### طراحی روبتهای مارشکل

با استفاده از روابط قسمت قبل، به مقایسه گشتاور بیشینه محرکها در روبات با سیستم تحرک مار و ماهی در هنگام بلند نمودن سر پرداخته می شود. با بالا رفتن سر روبات، به علت نزدیک شدن مرکز ثقل سر به مدول های تکیه گاهی، گشتاور مورد نیاز کاهش می یابد. این مطلب در شکل (۹) بصورت شماتیک نشان داده شده است. برای بالا آمدن مدول A (مدول جلوی مدول تکیه گاهی) در شکل (۹-چپ) لازم است تا محرک مربوط به آن، بر ممان ناشی از وزن W (وزن مدولهای جلویی) غلبه کند ولی در شکل (۹-راست) گشتاور لازم برای بالا آمدن مدول A بوسیله ممان کمک کننده ناشی از W، کاهش می یابد. به همین دلیل در این مقایسه فرض شده است که وضعیت نهایی سر حداکثر در زاویه  $90^\circ$  قرار می گیرد.



شکل ۹- طرز بلند شدن مدولهای روبات -راست: وزن مدولها به بلند شدن مدول A کمک می کند -چپ: وزن مدولها بصورت گشتاور مقاوم در برابر بلند شدن مدول A عمل می کند.

برای بلند شدن سر روبات دو حالت وجود دارد: در حالت اول ابتدا مدول اول، سپس مدول دوم و به ترتیب تا مدول n یکی بعد از دیگری برخاسته، در وضعیت پایانی قرار می گیرند. در حالت دوم تمام مدولها همزمان بلند می شوند. برتری سیستم اول کاهش گشتاور موتورها در بلند نمودن سر و برتری سیستم دوم در سرعت حرکت است. در سیستم ماهیچه ای مار گشتاور بیشینه موتورها در هر دو حالت یکسان است و از صفر قرار دادن  $\theta_i$  در رابطه (۹) بدست می آید (۱۱).

$$[M]_{S,max} = \begin{bmatrix} M_{1,max} \\ M_{2,max} \\ \dots \\ M_{n,max} \end{bmatrix}_S = wl \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ \dots \\ 2n-1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

در بین درایه های ماتریس  $[M]_{S,max}$  در رابطه (۱۱)، درایه  $M_{n,max}$  گشتاور بیشینه در سیستم ماهیچه ای مار است که در ادامه با  $M_{max,S}$  نشان داده می شود. در روبات با سیستم تحرک ماهی، میزان گشتاور در دو حالت بلند شدن سر متفاوت است. در حالت اول با فرض آنکه میزان چرخش پایانی مدولها یکسان باشد ( $\theta_{max}=90/n$ )، گشتاور بیشینه هر موتور در زمان شروع

حرکت ( $\theta_i=0$ ) اتفاق می افتد. بنابراین در محاسبه گشتاور بیشینه موتور روی مدول i، مدول i-1 در زاویه  $\theta_{i-1}=90/n$ ، مدول i-2 در زاویه  $\theta_{i-2}=2 \times 90/n$ ، و به همین ترتیب مدول nام در زاویه  $\theta_1=i-1$  در زاویه  $\theta_1=90/n$  نسبت به زمین قرار خواهد گرفت. با جایگزاری در رابطه (۱۰)، گشتاور بیشینه هر موتور از زمان شروع حرکت سر تا رسیدن به وضعیت قائم از رابطه (۱۲) بدست می آید.

$$\begin{bmatrix} M_{1,max} \\ M_{2,max} \\ \dots \\ M_{n,max} \end{bmatrix}_{F1,max} = wl \begin{bmatrix} 1 \\ c_1 + 3 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n (2n - (2i - 1)) \cos((i - 1) \times 90/n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در آن درایه  $M_{n,max}$  گشتاور بیشینه است که در ادامه با  $M_{max,F1}$  نشان داده می شود. علت این امر مثبت بودن عبارت  $(2n - 2i + 1) \cos((i - 1) \times 90/n)$  به ازای  $1 \leq i \leq n$  است.  $M_{max,F1}$  را می توان بصورت رابطه (۱۳) نوشت:

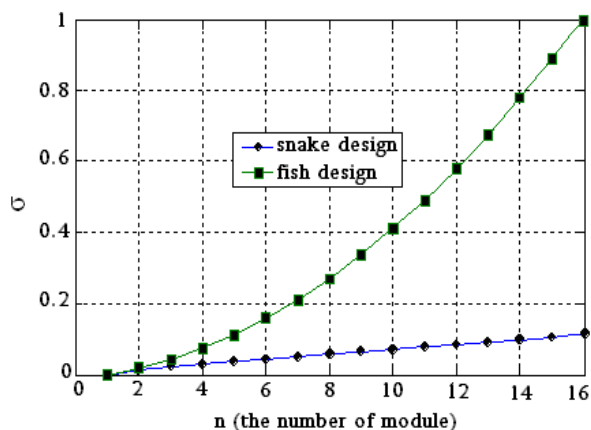
$$M_{max,F1} = (2n - 1) + \sum_{i=2}^n (2n - (2i - 1)) \cos((i - 1) \times 90/n) > (2n - 1) \quad (13)$$

رابطه (۱۳) نشان می دهد که  $M_{max,F1}$  از  $M_{max,S}$  بیشتر است. در روش دوم بلند نمودن سر، گشتاور موتورها از صفر قرار دادن  $\theta_i$  در رابطه (۱۰) بدست می آید:

$$\begin{bmatrix} M_{1,max} \\ M_{2,max} \\ \dots \\ M_{n,max} \end{bmatrix}_{F2,max} = wl \begin{bmatrix} 1 \\ 1 + 3 \\ 1 + 3 + 5 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n (2i - 1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

گشتاور بیشینه در این حالت  $M_{max,F2} = M_{n,max}$  است، که آشکارا از  $M_{max,S}$  بیشتر است.

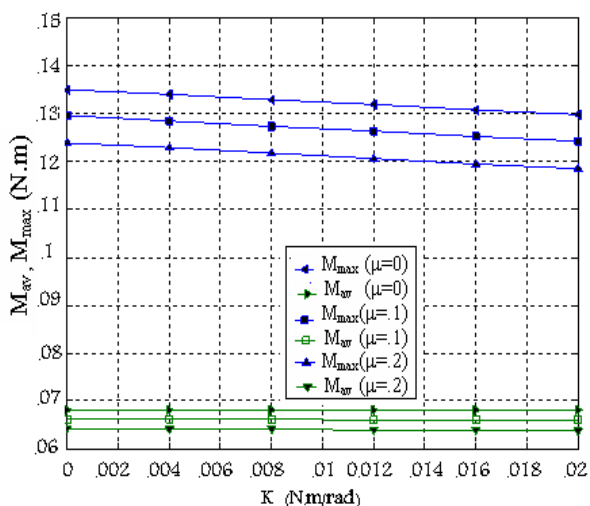
در شکل (۱۰) تغییرات گشتاور بیشینه در برابر تعداد مدول برخاسته از زمین، برای دو نوع سیستم ماهیچه ای مار و ماهی نشان داده شده است. تمامی نمودارهای این مقاله برای وزن (W) برابر با ۳۰۰ گرم و طول (l) برابر با ۱۰۰ میلیمتر و a برابر با ۶ میلیمتر محاسبه شده اند. دیده می شود که با افزایش تعداد مدولها، تفاوت گشتاورها در دو سیستم چگونه زیاد می شود. در سیستم ماهیچه ای مار، نرخ افزایش نیز بسیار کمتر از سیستم ماهی است. از آنجا که هدف یافتن طرح با کمترین گشتاور در بین دو سیستم ماهی و مار است، در نمودارهای بعدی به مقایسه طرح مار و طرح ماهی حالت اول که گشتاور کمتری نسبت به حالت دوم دارد پرداخته می شود.



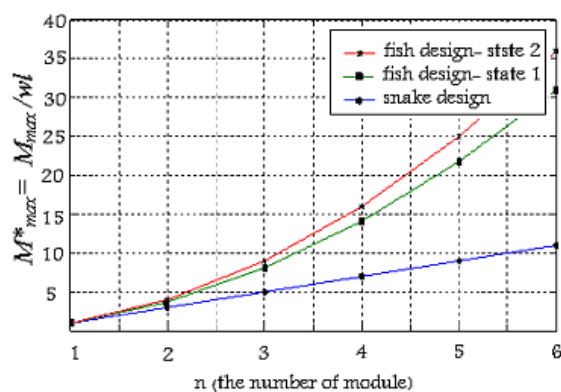
شکل ۱۲- انحراف معیار گشتاور موتورهای موثر در برابر n

همانگونه که شکل (۱۱) نشان می‌دهد گشتاور متوسط در طرح مار بسیار کمتر از گشتاور متوسط در طرح ماهی است. بنابراین فرض یاد شده مردود است. همچنین به دلیل کمتر بودن انحراف معیار در طرح با آناتومی مار (شکل (۱۲))، محرکها در سیستم مار وضعیت یکنواخت تری نسبت به یکدیگر دارند و از ظرفیت محرکها استفاده بهتری شده است. به این ترتیب مصرف انرژی سیستم کاهش می‌یابد و از یک نوع محرک برای تمام قسمت‌های روبات می‌توان استفاده نمود.

اثر K و  $\mu$  که در بخش قبل برای ساده سازی از معادلات حذف شده بودند بر روی گشتاور چندان زیاد نیست. نمودار شکل (۱۳) تغییرات گشتاور در طرح مار را با در نظر گرفتن K و  $\mu$  نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- تغییرات گشتاور بیشینه و متوسط با K و  $\mu$

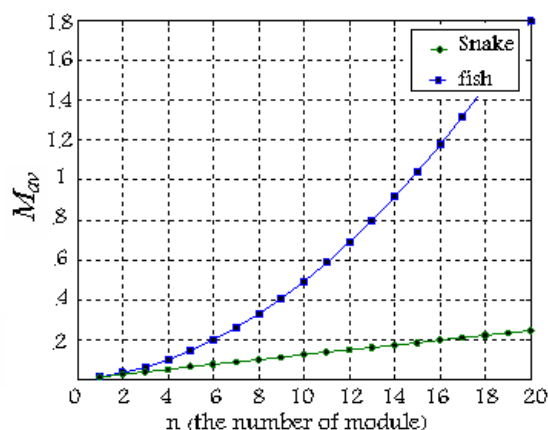


شکل ۱۰- نمودار تغییرات گشتاور بیشینه بی بعد در دو سیستم مار و ماهی و با دو ترتیب متفاوت عملکرد موتورها

در بلند شدن سر روبات چندین موتور همزمان کار می‌کنند. بنابراین کاهش گشتاور بیشینه به تنهایی نمی‌تواند نشانگر برتری روبات با آناتومی مار نسبت به روبات با ساختار ماهی باشد. زیرا ممکن است گشتاور موتورهای دیگر که در بالا آمدن سر روبات موثر هستند در طرح مار بسیار نزدیک به گشتاور بیشینه باشد حال آنکه در طرح ماهی گشتاور سایر موتورها بسیار کوچکتر از گشتاور بیشینه باشد. برای رفع این ابهام میانگین گشتاور تمامی موتورهای موثر در بالا آمدن سر روبات و انحراف معیار آنها در دو طرح مار و ماهی در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) با یکدیگر مقایسه شده اند. میانگین ( $M_{av}$ ) و انحراف معیار ( $\sigma$ ), از روابط (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آیند:

$$M_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{i,max}}{n} \quad (15)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{av} - M_i)^2}{n}} \quad (16)$$

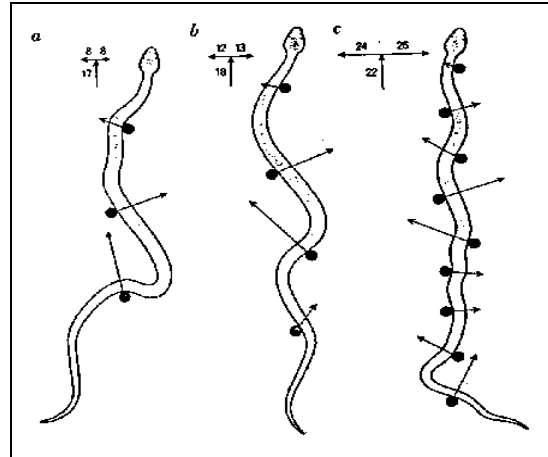


شکل ۱۱- میانگین گشتاور موتورهای موثر در بالا آمدن سر روبات در دو طرح ماهی و مار نسبت به n.

## ۵- چگونگی ایجاد نقاط تکیه گاهی در حرکت موجی

### کناری مارها

طبق تحقیقات انجام شده، در حرکت موجی کناری، مارها قسمتی از برجستگی های زمین را بعنوان نقاط تکیه گاهی در نظر می گیرند (شکل (۱۴)). بدن مار با وارد کردن فشار به این نقاط، نیروی لازم برای پیش رانی را ایجاد می کنند [۱۶].



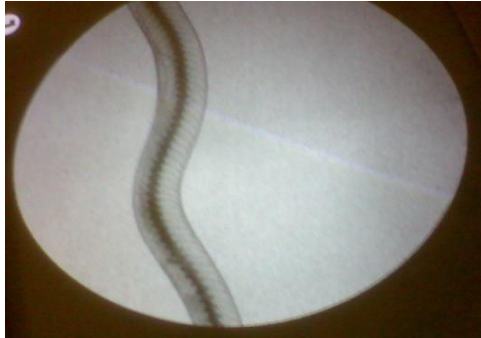
شکل ۱۴- طرز استفاده از ناهمواریهای زمین برای پیش روی [۱۶].

در صورت درستی این مطلب، مار نباید توانایی حرکت موجی کناری روی سطوح صاف مانند موزائیک و سرامیک را داشته باشد. زیرا این سطوح برجستگی قابل توجهی ندارند. به این منظور یک مار پلنگی تهیه شد و آزمایشهایی بر روی آن در دانشکده دامپزشکی دانشگاه شهید بهشتی صورت گرفت. همانطور که در شکل (۱۵) نیز دیده می شود، مار روی سطح صاف موزائیک نیز به خوبی حرکت موجی کناری را انجام می دهد.



شکل ۱۵- حرکت موجی کناری روی سطح صاف موزائیک

پس از این آزمایش، این نکته به ذهن می رسد که شاید مار با انجام تغییراتی در بدن خود، نقاط تکیه گاهی را در هر مکان که بخواهد ایجاد می کند و این حرکت برخلاف ادعای انجام شده، ربط چندانی به نوع سطح ندارد. به همین دلیل مطالعاتی روی ساختار بدن مار زیر دستگاه فلوروسکوپی (نوع دستگاه عکس برداری با اشعه X) انجام گرفت و در ادامه بدن مار کالبد شکافی شد.



شکل ۱۶- چگونگی حرکت مار با استفاده از دستگاه فلوروسکوپی (مکان آزمایش دانشگاه شهید بهشتی)

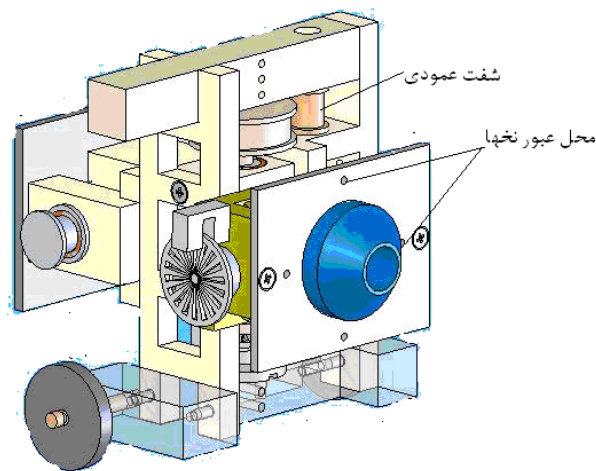
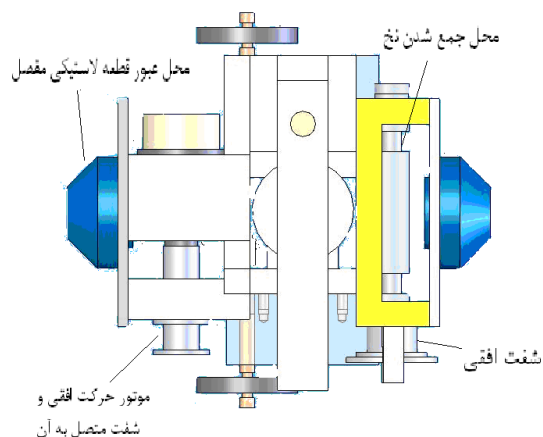
نتیجه کالبد شکافی و فلوروسکوپی نشان داد که دنده های متصل به ستون فقرات مار به نرمی استخوانهای ماهی هستند (شکل (۱۶)). به این ترتیب مار در هر نقطه که بخواهد، با اندک فشاری می تواند دنده ها را خم کند و تکیه گاه مناسب برای حرکت خود ایجاد کند. این موضوع پدیده خیز سینوس<sup>۱۷</sup> در مارها را نیز توجیه می کند (شکل (۱۷)). مار با بلند کردن بدن خود در نقاط غیر تکیه گاهی، به تغییر شکل استخوانها در محل تکیه گاهها کمک می کند. این بلند کردن بدن، باعث ایجاد پیچش کمی در ستون فقرات می گردد که در مراجع مختلف مقدار پیچش اندازه گیری شده است. این مطلب بوسیله شبیه سازی تایید شد و در عمل تغییر شکل استخوانها روی سطح صاف و ایجاد موج ماری شکل باعث پیشروی مدل شد. در مورد شبیه سازی توضیح مختصری در بخش ۶ ارائه گردیده است. در صورتیکه تمایل به ایجاد این حرکت در یک روبات باشد، باید مفصل اتصال مدولها قابلیت پیچش داشته باشند.



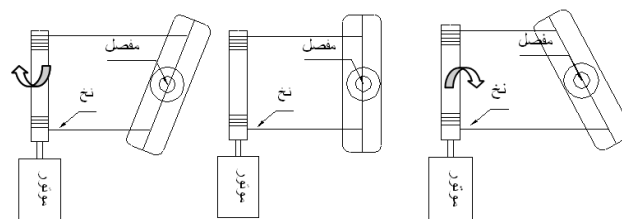
شکل ۱۷- پدیده خیز سینوس (بلند شدن قسمتهای غیر تکیه گاهی بدن در طول حرکت) در حین حرکت موجی کناری [۱۷].



روبات را نشان می‌دهد. در هر مدول یک شفت افقی و یک شفت عمودی نصب شده است. شفت افقی و عمودی به ترتیب وظیفه گردش موتور در صفحه های افقی و عمودی را برعهده دارند. در دو طرف شفت دو تکه نخ در دو جهت مخالف پیچیده شده اند. این نخها از مدولهای مختلف روبات گذشته و انتهای آنها به موتوری که روی چند مدول دورتر قرار دارد، متصل است. این ساز و کار در شکل (۲۰) نشان داده شده است. با چرخش موتور یکی از نخها باز و دیگری بسته می‌شود و باعث چرخش مدول می‌گردد. با جابجا کردن محل بستن نخ به دور شفت عمودی/افقی در مدولهای مختلف، می‌توان آرایش ماهیچه ای مار یا ماهی را به دلخواه ایجاد کرد.



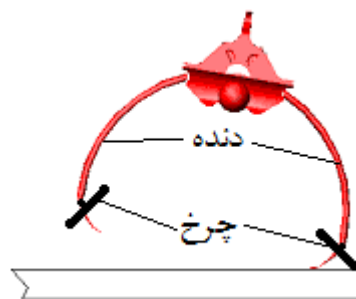
شکل ۱۹- طرح واره مدول روبات طراحی شده



شکل ۲۰- چگونگی کارکرد عملگر طراحی شده برای روبات

آزمایشهای بعدی نشان می‌دهد که در صورت وجود برجستگی روی زمین مار از آن بعنوان تکیه گاه استفاده خواهد کرد و در غیر اینصورت بوسیله بدن خود محل تکیه گاه را ایجاد می‌کند. کشف این مسئله به حذف چرخ در زیر بدن روباتهای مار شکل کمک زیادی خواهد کرد.

گفتنی است که وجود چرخ هنوز نیز می‌تواند در بهتر انجام شدن حرکت موجی کنار کمک کند. ولی محل نصب صحیح آن در زیر بدن نیست بلکه روی دنده ها و به سمت پایین خواهد بود به گونه ای که جهت چرخش چرخ در راستای طولی بدن روبات باشد (شکل (۱۸)). عرض چرخها در این حالت باید اندکی پهن تر باشد. در این حالت چرخها دیگر مانعی بر سر حرکت روبات در محیطهای ناهموار نخواهد بود. چرخها در این وضعیت دیگر وزن روبات را تحمل نخواهند کرد و کار آنها تنها سهولت سرخوردن روبات در نقاط تکیه گاهی خواهد بود.



شکل ۱۸- محل نصب درست چرخها در روباتهای مار شکل

## ۶- بحث و بررسی

به منظور بررسی درستی مطالب عنوان شده در بخشهای ۴ و ۵، از آزمایش عملی و شبیه سازی کامپیوتری استفاده شد، که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود.

### ۶-۱- بررسی درستی کاهش گشتاور موتور با استفاده از ساختار ماهیچه ای مار

به منظور بررسی درستی استفاده از ساختار ماهیچه ای در کاهش گشتاور محرکها (بخش ۴)، یک روبات مار شکل طراحی گردید که در آن آرایش محرکها قابل تبدیل به سیستم ماهیچه ای مار، ماهی و یا ترکیبی از این دو باشد.

ماهیچه جانوران به عنوان محرک طبیعی، انعطاف پذیر است و می‌تواند همراه بدن منعطف شود. ماهیچه ها معمولا بوسیله تاندونها به محل اعمال نیرو متصل می‌گردند. در این طرح سعی شد تا با استفاده از نخ (بعنوان تاندون)، موتور DC و قرقره در هر مدول روبات، محرکی مشابه با ماهیچه طراحی شود که بتواند همراه بدن منعطف شود. شکل (۱۹) شمایی از مدول

## ۶-۲- بررسی درستی ایجاد نقاط تکیه گاهی در حرکت

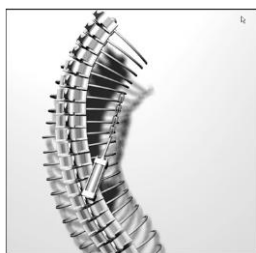
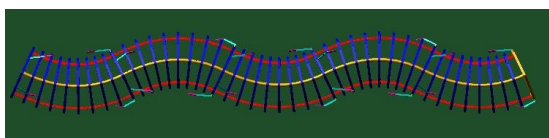
### روبه جلو و حذف چرخ

به منظور بررسی درستی مطالب بخش ۵، حرکت یک مار روی سطح صاف بوسیله نرم افزار ADAMS شبیه سازی شد. مشکل اصلی در شبیه سازی، پیاده سازی مدل به گونه ای بود که یک کامپیوتر عادی بتواند تعداد زیادی مهره و محرک را مدل کند. مشکل دیگر در این راه، مدلسازی نخ بود. مدلی پایانی دارای مهره هایی شبیه شکل (۲۲) بود.



شکل ۲۳- شمای مهره در مدلسازی انجام شده

هر مهره بوسیله سه فنر به مهره بعدی متصل است. این مدل دارای ۶۶ عدد مهره، ۹۰ محرک، و ۹۰ فنر و دمپر می باشد. طراحی مدل به گونه است که مهره نسبت به مهره دیگر علاوه بر چرخش، امکان پیچش نیز دارد. با ایجاد موج حرکت موجی کناری به همراه اثر خیز سینوس در محرکها که برای اولین بار در تحرک یک ساختار ماری شکل مدلسازی شده است (مطابق آنچه در بخش ۵ توضیح داده شد)، پیشروی روی سطح صاف حاصل شد. شکل (۲۴) شمایی از مدل در حال پیشروی را نشان می دهد. در نمودار شکل (۲۵) پیشروی روبات در صفحه XY نشان داده شده است.

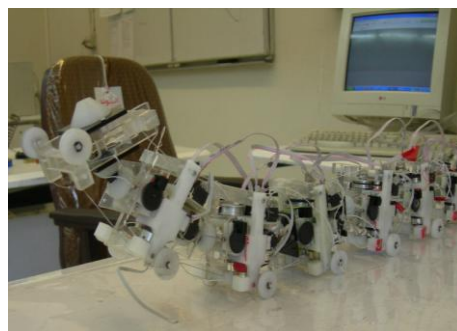


شکل ۲۴- مدل مار در حال پیشروی (بالا) همراه با اثر sine lifting (پایین)

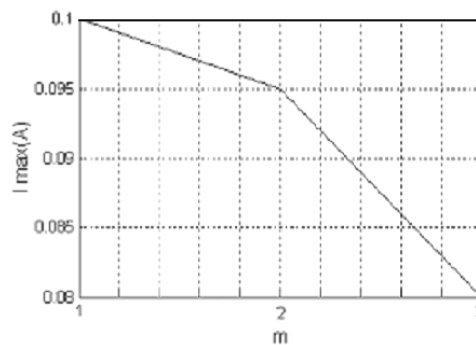
شمای کامل روبات ساخته شده در شکل (۱-الف) نشان

داده شده است.

از آنجا که اندازه گیری گشتاور موتور به طور مستقیم امکان پذیر نبود، و به دلیل آنکه گشتاور یک موتور DC با جریان مصرفی آن متناسب است، جریان موتور به جای گشتاور اندازه گیری شد. برای اندازه گیری جریان، از یک مبدل کارت ۱۷۱۶ PCI، و برنامه نوشته شده با نرم افزار Matlab استفاده شد. آزمایش با سه آرایش مختلف محرکها تکرار شد. در آزمایش اول نخهای هر موتور به دور شفت عمودی مدول جلویی پیچیده شدند ( $m=1$ ) یا آرایش ماهیچه ای (ماهی). در آزمایش دوم نخها به دور شفت دو مدول جلوتر از خود بسته شدند ( $m=2$ ) یا آرایش ماهیچه ای بین مار و ماهی). در پایان (در آزمایش سوم) نخها به دور شفت سه مدول جلوتر از خود بسته شدند ( $m=3$ ) یا آرایش ماهیچه ای مار). در هر بار آزمایش، سه مدول متوالی از زمین بلند شدند. شکل (۲۱) این روبات را در حین آزمایش نشان می دهد. نمودار شکل (۲۲) نتیجه این آزمایشها را نشان می دهد. محور قائم جریان مصرفی موتور با بیشترین گشتاور را نشان می دهد. محور افقی ( $m$ ) محل قرار گرفتن محرکها را نشان می دهد. همانگونه که در بخش ۴ نیز پیش بینی شد، سیستم ماهیچه ای مار کمترین جریان مصرفی و در نتیجه گشتاور را برای بلند کردن سر نیاز دارد.



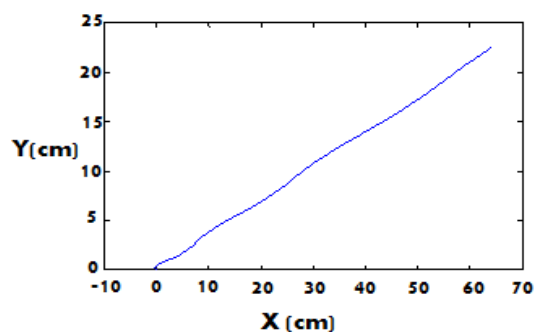
شکل ۲۱- روبات در حین انجام آزمایش بلند کردن سر



شکل ۲۲- نتیجه آزمایش بلند کردن سر روبات، تغییرات جریان برحسب محل قرارگیری محرک ( $m$ )، در ولتاژ ثابت ۸ ولت

## ۹- فهرست علائم

$a$	فاصله عمودی سوراخ عبور نخ تا محل اتصال (شکل ۳)، دو مدول
$C_{ij...n}$	$\cos(\theta_i + \theta_j + \dots + \theta_n)$
$K$	ضریب فنریت قطعه لاستیکی رابط دو مدول متوالی، $N/\text{deg}$
$l$	نصف طول هر مدول روبات بین دو محل اتصال (شکل ۳)، $m$
$m$	تعداد مدولی که بین مدول قرار گیری محرک و مدول فعال شونده بوسیله آن قرار دارد
$M$	گشتاور وارد شده به درام (شکل ۴)، $N/m$
$M_i$	گشتاور موتور $i$ ، $N/m$
$M_{i,m}$	ماکزیمم گشتاور محرک مدول $i$ ام در هنگام بلند نمودن مدول مربوط، $N/m$
$M_{\text{join}}$	برایند گشتاور حول $i$ joint (محل اتصال مدول $i$ به $i+1$ )
$N$	تعداد مدولی که از زمین برخاسته است
$T_i$	کشش نخ متصل بین مدول $i$ و $i+1$ (در ورود به سطح اصطکاکی/قرقره $i$ )، $N$
$T'_i$	کشش نخ متصل بین مدول $i$ و $i+1$ (در خروج از سطح اصطکاکی/قرقره $i$ )، $N$
$W$	وزن یک مدول، $\text{kg}$  فهرست علائم یونانی
$\beta$	زاویه تماس بین نخ و درام (شکل ۴)، $\text{Deg}$
$\beta_i$	زاویه تماس بین نخ و لبه هموار سوراخ هدایت نخ، $\text{Deg}$
$\beta_{j...n}$	$\beta_j + \beta_{j+1} + \dots + \beta_n$
$\theta_i$	زاویه بین مدول $i$ و $i+1$ ، $\text{Deg}$
$\theta_{ij...n}$	$\theta_i + \theta_j + \dots + \theta_n$
$\mu$	ضریب اصطکاک بین نخ و درام (شکل ۴)



شکل ۲۵- نمودار پیشروی مار در صفحه XY

## ۷- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف از این تحقیق ارائه چند ایده جدید برای بهبود طراحی روباتهای مارسان و افزایش انعطاف پذیری آنها می باشد. نتیجه این بررسی ها در چهار بخش خلاصه می گردد که عبارتند از:

- آرایش طراحی محرکها باید از قالب سنتی آرایش ماهیچه ای ماهی که در آن نیروی محرکها کمکی به یکدیگر نمی کنند خارج شود و به آرایش ماهیچه ای مار که در آن نیروی محرکها در انجام یک وظیفه با یکدیگر جمع می شوند تبدیل شود. این آرایش به روبات قابلیت انجام چند حرکت را نیز می دهد.
- چرخها باید از زیر روبات حذف شوند. محل نصب آنها باید روی دنده و به سمت پایین باشد. چرخها نباید به گونه ای نصب شوند که وزن روبات را تحمل کنند.
- مفصل اتصال مدولهای روبات باید از حالت خشک و صلب خود خارج شود و به جای آن از قطعات انعطاف پذیر مانند لاستیک استفاده شود که امکان ایجاد پیچش در بدن روبات را نیز ایجاد کند.
- در ایجاد حرکت در محرکها، تنها به ایجاد موج حرکت موجی کناری نباید اکتفا کرد. اعمال اثر خیز سینوس که به زاویه اتصال نخ به مدول و محل نصب محرکها مربوط است نیز در پیشروی روبات تاثیر گذار است.

## ۸- تقدیر و تشکر

نگارندگان مقاله بر خود لازم می دانند که از "صندوق حمایت از پژوهشگران" که حمایت های مالی این طرح را انجام دادند تشکر و قدردانی نمایند. همچنین از زحمات آقایان مهدی رجبی زاده از مرکز محیط زیست کرمان و حسین رهنما فرد دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین که بدون کمک آنها، انجام آزمایش روی نمونه مار واقعی امکان پذیر نبود سپاسگذاری می گردد.

## ۱- مراجع

- J.Gray, "The Mechanism of Locomotion In Snakes", Journal of Experimental Biology, vol. 23, No. 2, p.p.101-123,1994.
- J.L.Meriam, L.G.Kraige, "Engineering Mechanics Statics", 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley, 368. 1990.
- H. W. Lissmann, " Rectilinear Locomotion In a Snake", Journal of Experimental Biology, vol. 10,p.p. 368-379, 1950.
- Moon BR, Gans C. "Kinematics, muscular activity, and propulsion in gopher snakes", Journal of Experimental Biology, 2669– 2684, 1998.
- Shimizu M., Mori T., Ishiguro A.; "A Development of a Modular Robot That Enables Adaptive Reconfiguration", Proc. of IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems, China, 2006.
- S. Hirose, "Biologically Inspired Robots", Oxford university press. 1993.
- A. M. Cardona<sup>1</sup>, J. I. Barrero<sup>2</sup>, C. Otálora<sup>1</sup> and C. Parra<sup>1</sup>, "Serpentine locomotion articulated chain: ANA II", Woodhead Publishing Ltd 179 ABBI 2005 Vol. 2 No. 3–4 pp. 179–185
- Y. Shan, Y. Koren, "Design and Motion Planning of a Mechanical Snake", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, No. 4, July/August 1993, pp. 1091-1100.
- C. Cans, "How Snakes Move", Journal of Experimental Biology, 1950, pp. 82-96.
- [۹] برازنده، فرشاد؛ دلیل صفایی، سیف؛ "طراحی مفاصل جدید برای روباتهای مارسان"، پانزدهمین کنفرانس بین المللی سالانه مهندسی مکانیک، ۱۳۸۶، ۳۴۳.
- [۱۰] حاجی آقا معمار، امیر حسین؛ زارع حاجی باقر، پروین؛ کشمیری، مهدی؛ "تحلیل، طراحی و ساخت روبات ماژولار با قابلیت تبدیل به پیکربندی های متفاوت"، پانزدهمین کنفرانس بین المللی سالانه مهندسی مکانیک، ۱۳۸۶، ۳۳۷.
- [۱۱] علیزاده، دانیال؛ مدلسازی هیدرودینامیکی و کنترل ربات کرم مانند برای حرکت در زیر آب (پایان نامه کارشناسی ارشد)، استاد راهنما دکتر وثوقی، غلامرضا؛ دانشگاه صنعتی شریف، آبان ۱۳۸۶.
- [۱۲] صدرزاده طباطبایی محمد حسین؛ کالبد شناسی مقایسه ای مهره داران، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.
- [۱۳] Barazandeh F.; "Design, Control and Simulation of a Snake robot (PhD Thesis )", Advisor Dr. Bahr B, Wichita State University, 2002.
- [۱۴] Barazandeh, F.; Bahr, B.; Moradi A.; "A. How Self-locking Reduces Actuators Torque in Climbing Snake Robots", International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Zurich, Switzerland, 2007.
- [۱۵] Bayraktaroglu Z. Y., Kılıçarslan A., Kuzucu A., Hugel V., Blazevic P.; "Design and Control of Biologically Inspired Wheel-less Snake-like Robot" 2006.
- [۱۶] G. S. Chirikjian, J. W. Burdick, "The kinematics of hyper redundant robot locomotion", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 11, No. 6,p.p.781-793, 1995.

## ۱۱- زیر نویس ها

- <sup>۱</sup> Gray
- <sup>۲</sup> Lissmann
- <sup>۳</sup> Hirose
- <sup>۴</sup> Chirikjian
- <sup>۵</sup> Burdick
- <sup>۶</sup> Bayraktaroglu
- <sup>۷</sup> Kılıçarslan
- <sup>۸</sup> Peg Points
- <sup>۹</sup> Serpentine یا Lateral Undulation
- <sup>۱۰</sup> ANAII
- <sup>۱۱</sup> Segmental
- <sup>۱۲</sup> sine lifting