بهبود طراحي روباتهاي متحرک مارشکل با استفاده از آناتومي مار

فرشاد برازنده[i] *; محمدصادق حيدرزاده[ii]; سيدمهدي رضاعي[iii]; محمد علي سادات[iv]; سيف دليل صفايي[v]

چکيده

بيشتر تمرکز تحقيقات انجام شده روي روباتهاي مارشکل بر روي چگونگي ايجاد حرکت، کنترل و يا حل ديناميک روبات بوده است و تلاش کمتري در مطالعه ساختار بدن مار و اقتباس از ظرايف آن در طراحي شده است. در نتيجه روباتهاي متحرک مارشکل ساخته شده تاکنون چيزي فراتر از يک نمونه آزمايشگاهي نيستند و هنوز پا به عرصه صنعت نگذاشته اند. هدف اين مقاله، مطالعه آناتومي مار و ارائه راه کارهاي تازه در طراحي روباتهاي مارشکل است تا قابليت تبديل آنها به يک روبات صنعتي متحرک افزايش يابد. نتيجه اين کار يافتن اثر آناتومي مار در کاهش گشتاور محرکها و طرز توليد نقاط تکيه گاهي در حرکت موجي کناري است که به طراحي روباتهاي مارشکل بدون چرخ کمک مي‌کند.

کلمات کليدي : روبات مارسان، حرکت ماري شکل، کاهش گشتاور، آناتومي 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.

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸٦/۵/۲۲
تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۷/۹/۱۸

i * نويسنده مسئول و استاديار- دانشکده مهندسي مکانيک- دانشگاه صنعتي اميرکبير Email: fbarazandeh@aut.ac.ir
ii کارشناس ارشد- دانشکده مهندسي مکانيک-دانشگاه صنعتي اميرکبير Email: s_heydarzadeh@yahoo.com
iii دانشيار- دانشکده مهندسي مکانيک- دانشگاه صنعتي اميرکبير smrezaei@aut.ac.ir
iv دانشجوي کارشناسي- دانشکده مهندسي مکانيک- دانشگاه صنعتي اميرکبير seid.sadat@gmail.com
v کارشناس ارشد- دانشکده مهندسي مکانيک-دانشگاه آزاد اسلامي قزوين Email: seif.dalilsafaei@gmail.com

۱- مقدمه

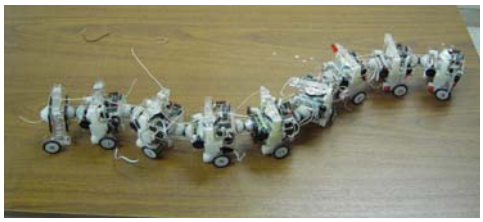
در طبیعت الگوهاي فراواني وجود دارد که الهام بخش محققان در دستاوردهايشان بوده است. بدن مار نيز داراي مشخصه هايي است که از ديدگاه مهندسي بسيار قابل توجه است. بدن باريک مارها آنها را قادر مي سازد تا در زمين هاي بسيار ناهموار، مسير هاي مارپيچ و داخل مجاري تنگ حرکت کنند. مارها بدليل گسترش وزن، مي‌توانند در زمين هايي که محکم نيستند نظير زمين هاي باتلاقي و شن زارها حرکت کنند. پايداري سينماتيکي بدن، مارها را قادر مي سازد تا از شکافهاي موجود در زمين و شاخه هاي درختان براحتي عبور کنند.

حرکت مارها اولين بار توسط گري[۱] و ليسمن[۲] مورد تحقيق و بررسي قرار گرفت ([۹] و [۱۱]). هيروس[۳] بيشترين تحقيق بر روي روباتهاي مارسان راانجام داده است و اولين کسي بود که سعي در اقتباس از ساختار بدن مار در طراحي روبات نموده است [۱۴]. در زمينه فرمول بندي سينماتيکي و کاهش گشتاور روباتهاي مارسان مي‌توان به کارهاي چيريکجيان[۴] و بورديک[۵] اشاره نمود[۸]. يک نوع روبات مدولار که به نام روبات تطبيق پذير از آن ياد شده است، توسط محققين دو دانشگاه ژاپن ساخته شد [۱۳]. روبات بايراکتاراغلو[۶] و کيلي شارلسان[۷] شايد نزديکترين اقتباس از ساز و کار حرکتي مار در روباتهاي مارسان بدون چرخ است [۷]. روبات با فشار به نقاط تکيه گاهي[۸] مصنوعي که پيشتر درصفحه حرکت توسط طراح تعبيه شده است به جلو حرکت مي‌کند.

از نمونه کارهاي محققان ايراني مي‌توان به کارهاي نويسندگان در زمينه طراحي و کنترل روبات مار شکل سه بعدي [۵]، بررسي مفاصل جديد [۱] و کاهش گشتاور محرکهاي روبات [۶] اشاره نمود. نمونه ديگري از کار محققان ايراني، توسط حاجي آقا معمار و همکاران در زمينه طراحي و ساخت روباتي با قابليت تبديل به پيکربندي هاي متفاوت و تطبيق پذيري با شرايط محيط صورت گرفته است [۲]. عليزاده نيز روي توليد مسير براي حرکت روباتهاي کرم شکل براي حرکت در زير آب کار کرده است [۳].

در بيشتر روباتهايي که تاکنون ساخته شده اند اشکالات اساسي ديده شده که عبارتند از:

- روباتها يا قادر به انجام حرکت موجي کناري[۹] نيستند و يا در صورت توانايي در انجام اين نوع حرکت، نياز به چرخ دارند. چرخها در زمينهاي غير هموار مشکل ساز هستند و قدرت مانور روبات را کاهش مي‌دهند. حرکت موجي کناري، حرکتي است که مارها در اکثر جابجايي‌هاي و زمينها استفاده مي‌کنند. اين حرکت سريعترين و قابل انعطاف ترين حرکت در مار است و توانايي ايجاد آن در روبات، قابليت آن را به گونه چشمگيري افزايش مي‌دهد.
- به دليل استفاده از ساختار ماهيچه اي ماهي در ساخت روباتهاي مار شکل، گشتاور محرکها و در نتيجه وزن آنها از سمت سر به دم افزايش مي‌يابد. به همين دليل در اکثر طرحها از محرکهاي قوي يکسان در سراسر قسمتهاي روبات استفاده مي‌گردد. اين امر باعث افزايش وزن روباتها، کاهش انعطاف پذيري و افزايش انرژي مصرفي مي‌شود. ساختار ماهيچه اي ماهي، براي اولين بار توسط هيروس در ساخت روباتهاي مارشکل استفاده شد [۱۴] و توسط سايرين در طراحي تقليد شد.
- به دليل استفاده از سيستم ماهيچه ايماهي که توانايي اعمال نيروي کمي در برابر مانع دارد، و همچنين به دليل استفاده از مفصل هاي صلب در محل اتصال مدولها، اکثر روباتهاي ساخته شده تنها قابليت انجام يک يا دو حرکت از حرکتهاي مار را دارند و تا کنون روباتي که بتواند چهار حرکت اصلي مار را انجام دهد ساخته نشده است. به همين دليل اين روباتها قابليت اصلي مار که استفاده از حرکت مناسب در محيط مناسب است را نمي‌توانند داشته باشند.
- مشکل اصلي روباتهاي ساخته شده ايجاد نقاط تکيه گاهي در هنگام حرکت است (بخش ۵ مقاله). به همين دليل اين روباتها يا داراي چرخ هستند (شکل ۱-الف)، يا نقاط تکيه گاهي بصورت مصنوعي تعبيه مي شوند (شکل ۱-ب)، و يا از حرکتي غير از حرکت موجي کناري براي پيشروي استفاده مي‌کنند (شکل ۱-ج). در هر سه حالت روبات توانايي حرکت در زمينهاي ناهموار و محيطهاي پر مانع را ندارد.
- اين مشکلات باعث شده است تا تحقيق روي روباتهاي مارشکل به يک بن بست عملي برسد و با همه محاسن بالقوه خود به تدريج از صحنه فعاليتهاي پژوهشي خارج شوند. روباتهاي متحرک ساخته شده تاکنون، چيزي فراتر از يک اسباب بازي علمي نيستند. هدف از اين تحقيق بررسي آناتومي مار به منظور يافتن راه حلي مناسب براي حذف چرخها، افزايش کاري و نزديکتر کردن قابليتهاي روباتهاي متحرک مار شکل به توانايي هاي مار واقعي است. اميد است نتيجه اين بررسيها، طراحي روباتهاي مار شکل را از بن بست موجود خارج کند.



(الف)

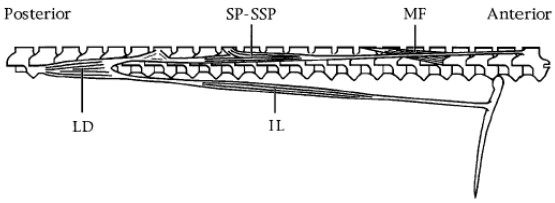
(ب)

(ج)

شكل ۱- الف) روبات چرخدار ساخته شده توسط نگارندگان مقاله
ب) روبات بدون چرخ با ميله نصب شده در زمين بعنوان نقطه تكيه گاهي [۷] ج) روبات آنا ۲[۱۰] با حركت كرم شكل [۱۵]

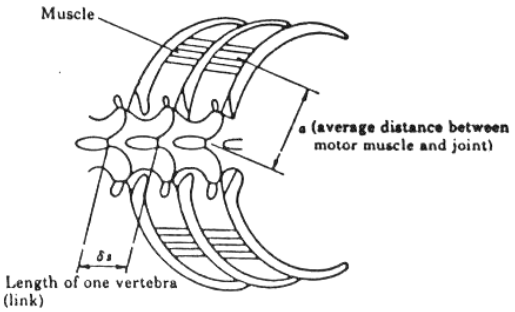
۲- مقايسه سيستم ماهيچه اي مار و ماهي

ستون مهره هاي مار يک کمان انعطاف پذير است که بخشهاي مختلف بدن به آن متصل مي‌شوند و براي نخاع يک تونل محافظت کننده فراهم مي‌کند. در شکل (۲) قسمتي از ستون مهره مار (بين مهره هاي ۱۰۰ تا ۱۳۰)، ديده مي‌شود. همانطور که ديده مي‌شود، ماهيچه اي که به يک مهره نيرو وارد مي‌کند (مانند زنجيره هاي ماهيچه اي MF، SP-SSP، LD و IL در شکل (۲))، انتهايش روي چند مهره عقب تر قرار گرفته است. در بيشتر مواقع اين ماهيچه ها در چند نقطه در طول خود نيز به ستون فقرات متصل هستند. در اين آرايش ماهيچه اي، نيروي ماهيچه ها در انجام کار با يکديگر جمع مي شوند. به همين دليل قابليت اعمال نيروي بيشتري دارند و باعث مي‌شود تا مار استخوانهاي شکار خود را بشکند و آن را ببلعد. اين مطلب در قسمت بعد در مورد بلند کردن سر ثابت شده است. همچنين اين ساختار جانور را قادر مي‌سازد تا حرکتها متفاوتي در شرايط مختلف ايجاد کند که ساز و کار حرکتي هريک با ديگري تفاوت دارد.



شكل ۲- سيستم ماهيچه هاي محوري بدن مار [۱۲]

حرکت بدن ماهيان در آب به حرکت مار بسيار شبيه است. ولي ساختار ماهيچه اي اين جانور بسيار با مار متفاوت است. در اکثر ماهيان حرکت بدن ماهي از طريق فعاليت ماهيچه هاي قطعه اي[۱۱] انجام مي‌شود. دو انتهاي هر ماهيچه قطعه اي، روي دو دنده متوالي از ستون فقرات نصب است (شکل ۳). در اين ساختار نيروي ماهيچه ها در انجام کار با يکديگر جمع نمي شوند. به دليل اينکه محيط اطراف جانور هميشه با آب پر شده است و ماهي هيچگاه عملي مانند شکستن استخوانهاي شکار يا حرکتهاي متفاوت در محيطهاي مختلف انجام نمي‌دهد، اين ساختار ماهيچه اي براي جانور کاملا مناسب است.



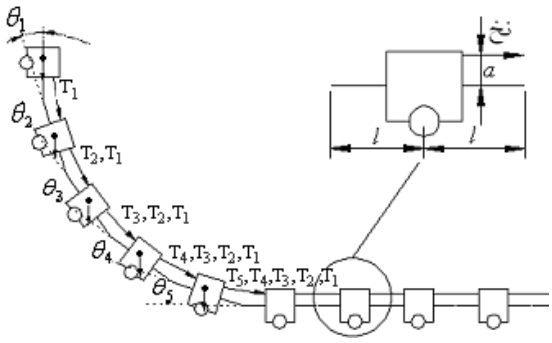
شكل ۳- سيستم ماهيچه اي ماهي [۱۴]

يک ماهي در خشکي بسيار سخت حرکت مي‌کند، زيرا محيطي که حرکت در آن انجام مي‌شود به جاي احاطه جانور، تنها در زير بدن قرار دارد. بدن جانوران خشکي بايد علاوه بر حرکت جانبي، حرکت هاي کمري- شکمي نيز ايجاد کند. سيستم ماهيچه اي بدن ماهي، که در آن ماهيچه هايي حرکتي بين دو دنده متوالي قرار دارند، براي خزندگان مناسب نيست [۴]. اکثر روباتهاي مارسان ساخته شده در حقيقت از چنين سيستمي استفاده نموده اند و به همين دليل انعطاف حرکتي مار واقعي را ندارند.

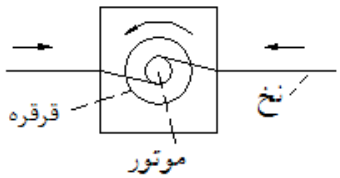
وجه تمايز روباتي با سيستم تحرک مار نسبت به روباتي با سيستم تحرک ماهي در آن خواهد بود که محرک فعال کننده يک مدول، به جاي قرار گرفتن در مدول بعدي در چندين مدول دورتر قرار مي گيرد. در هر دو سيستم در هنگام ايجاد حرکت، محرکها همزمان فعال مي‌شوند.

۳- محاسبه گشتاور محركها در تحرک روبات با سيستم ماهيچه اي مار و ماهي

براي تشخيص تفاوت عملكرد سيستم ماهيچه اي مار و ماهي، بلند كردن سر روبات بعنوان نمونه در نظر گرفته مي‌شود و به ارائه مدل رياضي مكانيزم ماهيچه اي ماهي و مار در انجام آن پرداخته مي‌شود. در شكل (۴) ساز و كار بلند شدن سر يک روبات با آرايش ماهيچه هاي مار نشان داده شده است. براي پياده سازي ساز و كار ماهيچه مار از سيستم نخ و قرقره استفاده شده است. در شكل هر مدول روبات بصورت يک مستطيل در نظر گرفته شده است كه با نخي كه از مجراي هدايت نخ ساير مدولها مي‌گذرد، به موتوري كه روي چند مدول دورتر قرار دارد، متصل است. با چرخش موتور، نخ به دور قرقره متصل به موتور جمع مي شود (شكل (۵)) و مدول بلند مي‌شود.



شكل ۴- شماتيكي از سيستم بلند كننده سر روبات



شكل ۵- شماتيكي از سيستم بلند كننده

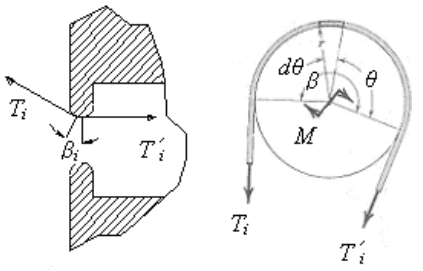
دو مدول متوالي بوسيله يك قطعه لاستيكي به يكديگر متصل مي‌شوند. براي بررسي، فرضهايي زير در نظر گرفته مي‌شوند كه عبارتند از:

- شماره گذاري مدولها از سر آغاز مي شود.
- حركتها مدولها آهسته است (شتاب حركت صفر است).
- اگر n مدول از زمين بلند شوند، موتور مدول اول روي مدول n+۱، موتور مدول دوم روي مدول n+۲، و موتور مدول n روي مدول ۲n قرار دارد (موتورها در مدولهايي كه روي زمين هستند نصب شده اند). طبيعي است كه مدولهاي انتهايي موتور محرک نخواهند داشت.
- نخ ها از روي هم مي گذرند و از زاويه بين نخها با راستاي افق در مدولهاي زميني، چشم پوشي مي‌شود.

در چرخش يک نخ بدور يک قرقره با اصطكاک (شكل (۶)-راست)، كشش نخ در دو سمت قرقره متغير خواهد بود و از رابطه (۱) پيروي خواهد كرد [۱۰]:

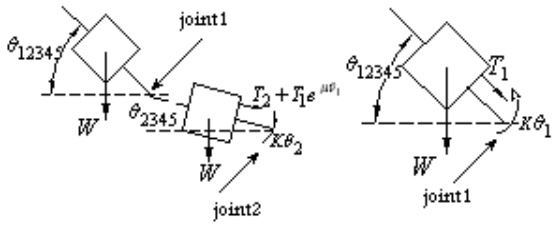
$$T_i' = T_i e^{\mu\beta} \qquad (۱)$$

بدليل مشابه، در عبور نخ از بين مدولها، كشش آن در حين عبور از مجراي عبور نخ در هر مدول تغيير مي‌كند (شكل (۶)-چپ). چنانچه فرض شود كه لبه هاي سوراخ ها بصورت قوسي از دايره باشند، مي‌توان رابطه (۱) را براي بدست آوردن كشش نخ قبل و بعد از سوراخ استفاده كرد. با توجه به توضيحات داده شده، مي‌توان معادلات تعادل گشتاور در هر يك از مفصلها را از روابطي كه در ادامه مي‌آيند، محاسبه نمود.



شكل ۶-راست: تغيير كشش نخي پيچيده شده به دور يک قرقره كه گشتاور M به آن وارد مي شود[۱۰].-چپ شماتيكي از مجراي عبور نخ در هرمدول.

در شكل (۷) نمودار آزاد مدولهاي اول و دوم روبات نشان داده شده است. با نوشتن معادلات تعادل گشتاورها در محل اتصال مدول ۱ و ۲ (joint1 در شكل (۷)) براي مدول اول، رابطه (۲) بدست مي‌آيد.



شكل ۷- : راست دياگرام آزاد مدول اول- چپ: دياگرام آزاد مدول اول و دوم روبات مار سان با سيستم تحرک مار

$$\sum M_{joint,1} = 0$$
$$\therefore T_1.a - w.l.c_{12345} - k\theta_1 = 0 \qquad (۲)$$

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

$$\sum M_{jo\,\mathrm{int},2} = 0$$
$$\therefore \left(T_1 e^{\mu\beta_1} + T_2\right)a - w.l.\left(c_{12345} + 2c_{2345}\right) \qquad (۳)$$
$$- w.l.c_{2345} - K\theta_2 = 0$$

در حالت كلي اگر n مدول از زمين بلند شود، براي مدول i از اين n مدول، تعادل گشتاورها بصورت رابطه (۴) در مي‌آيد:

$$\sum M_{jo\,\mathrm{int},i} = 0 \therefore$$
$$\left(T_1 e^{\mu\beta_{12\ldots i-1}} + T_2 e^{\mu\beta_{23\ldots i-1}} + \ldots T_{i-1} e^{\mu\beta_{i-1}} + T_i\right)a \qquad (۴)$$
$$- w.l.\left((2i-1)c_{i\ldots n} + (2i-3)c_{i-1,\ldots n} + \right.$$
$$\left. \ldots + 3c_{23\ldots n} + c_{12\ldots n}\right) - K\theta_i = 0$$

رابطه (٤) را مي‌توان به شكل رابطه (۵) ساده نمود:

$$a\sum_{h=1}^{i-1} T_h e^{\mu\beta_{h2\ldots i-1}} + aT_i \qquad (۵)$$
$$- w.l.\sum_{h=1}^{i} (2h-1)c_{h\ldots n} - K\theta_i = 0$$

نمايش ماتريسي رابطه (۵) براي n مدول كه از زمين بلند شده اند بصورت رابطه (٦) خواهد بود.

$$wl\begin{bmatrix} c_{12\ldots n} \\ c_{12\ldots n} + 3c_{2\ldots n} \\ c_{12\ldots n} + 3c_{2\ldots n} + 5c_{3\ldots n} \\ \ldots \\ c_{12\ldots n} + 3c_{2\ldots n} + \ldots + (2n-1)c_n \end{bmatrix} + K\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \ldots \\ \theta_n \end{bmatrix}$$
$$- a\begin{bmatrix} 1 & 0 & \ldots & 0 & 0 \\ e^{\mu\beta_1} & 1 & \ldots & 0 & 0 \\ e^{\mu\beta_{12}} & e^{\mu\beta_2} & \ldots & 0 & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ e^{\mu\beta_{12\ldots n-1}} & e^{\mu\beta_{23\ldots n-1}} & \ldots & e^{\mu\beta_{n-1}} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \ldots \\ T_n \end{bmatrix} = 0 \qquad (۶)$$

ماتريس ضريب بردار كشش نخ (ماتريس با ضريب a) در رابطه (٦)، يك ماتريس پايين مثلثي است. براحتي اثبات مي‌شود كه دترمينان يك ماتريس مثلثي برابر با حاصلضرب عناصر روي قطر آن است. چون تمام عناصر قطري مخالف صفر هستند بنابراين وارون ماتريس وجود دارد و مي‌توان از حل رابطه (٦) ميزان كشش نخ و گشتاورهاي مورد نياز را بدست آورد. در صورتيكه از K و μ صرفنظر شود، رابطه (٦) به رابطه (۷) ساده مي‌شود.

$$wl\begin{bmatrix} c_{12\ldots n} \\ c_{12\ldots n} + 3c_{2\ldots n} \\ c_{12\ldots n} + 3c_{2\ldots n} + 5c_{3\ldots n} \\ \ldots \\ c_{12\ldots n} + 3c_{2\ldots n} + \ldots + (2n-1)c_n \end{bmatrix}$$
$$- a\begin{bmatrix} 1 & 0 & \ldots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \ldots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \ldots & 0 & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & 1 & \ldots & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \ldots \\ T_n \end{bmatrix} = 0 \qquad (۷)$$

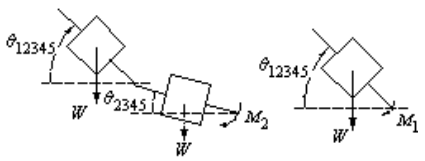
از حل رابطه (۷) مقادير كشش نخ هر مدول (T_i) و گشتاور موتورهاي هر مدول (M_i) بدست مي‌آيند (روابط (۸) و (۹)).

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \ldots \\ T_n \end{bmatrix} = \frac{wl}{a}\begin{bmatrix} c_{12\ldots n} \\ 3c_{2\ldots n} \\ \ldots \\ (2n-1)c_n \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \ldots \\ M_n \end{bmatrix}_S = a\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \ldots \\ T_n \end{bmatrix} = wl\begin{bmatrix} c_{12\ldots n} \\ 3c_{2\ldots n} \\ \ldots \\ (2n-1)c_n \end{bmatrix} \qquad (۹)$$

در روباتهاي مارساني كه تحرک بر مبناي سيستم ماهيچه‌اي ماهي صورت مي‌گيرد، بين هر دو مدول متوالي يك موتور قرار دارد كه گشتاور آن بوسيله يك سيستم انتقال نيرو به مدول جلويي اعمال مي‌شود. در شكل (۸) نمودار آزاد نيروها براي چنين روباتهايي نشان داده شده است. چنانچه از اصطكاك موجود در مفصل مدول ها صرف نظر شود، با نوشتن معادلات تعادل گشتاورها حول مفصل هر مدول، گشتاور موتورها از رابطه (۱۰) بدست مي‌آيد:

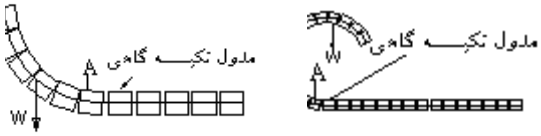
$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \ldots \\ M_n \end{bmatrix}_F = wl\begin{bmatrix} c_{12\ldots n} \\ c_{12\ldots n} + 3c_{2\ldots n} \\ c_{12\ldots n} + 3c_{2\ldots n} + 5c_{3\ldots n} \\ \ldots \\ c_{12\ldots n} + 3c_{2\ldots n} + \ldots + (2n-1)c_n \end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$



شكل ۸- راست: دياگرام آزاد مدول اول - چپ: دياگرام آزاد مدول اول و دوم در طرح روبات مارسان با سيستم تحرک ماهي

۴- تاثير استفاده از ساختار ماهيچه اي مار در طراحي روباتهاي مارشكل

با استفاده از روابط قسمت قبل، به مقايسه گشتاور بيشينه محركها در روبات با سيستم تحرک مار و ماهي در هنگام بلند نمودن سر پرداخته مي‌شود. با بالا رفتن سر روبات، به علت نزديک شدن مرکز ثقل سر به مدول هاي تکيه گاهي، گشتاور مورد نياز کاهش مي‌يابد. اين مطلب در شکل (۹) بصورت شماتيک نشان داده شده است. براي بالا آمدن مدول A (مدول جلوي مدول تکيه گاهي) در شکل (۹-چپ) لازم است تا محرک مربوط به آن، بر ممان ناشي از وزن W (وزن مدولهاي جلويي) غلبه کند ولي در شکل (۹-راست) گشتاور لازم براي بالا آمدن مدول A بوسيله ممان کمک کننده ناشي از W، کاهش مي‌يابد. به همين دليل در اين مقايسه فرض شده است که وضعيت نهايي سر حداکثر در زاويه ۹۰° قرار مي‌گيرد.



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

براي بلند شدن سر روبات دوحالت وجود دارد: در حالت اول ابتدا مدول اول، سپس مدول دوم و به ترتيب تا مدول n يکي بعد از ديگري برخاسته، در وضعيت پاياني قرار مي‌گيرند. در حالت دوم تمام مدولها همزمان بلند مي‌شوند. برتري سيستم اول کاهش گشتاور موتورها در بلند نمودن سر و برتري سيستم دوم در سرعت حرکت است. در سيستم ماهيچه اي مار گشتاور بيشينه موتورها در هر دو حالت يکسان است و از صفر قرار دادن θ_i در رابطه (۹) بدست مي‌آيد (۱۱).

$$[M]_{S,\max}=\begin{bmatrix}M_{1,\max}\\M_{2,\max}\\\cdots\\M_{n,\max}\end{bmatrix}_S=wl\begin{bmatrix}1\\3\\\cdots\\2n-1\end{bmatrix} \qquad (۱۱)$$

در بين درايه هاي ماتريس $[M]_{S,max}$ در رابطه (۱۱)، درايه $M_{n,max}$ گشتاور بيشينه در سيستم ماهيچه اي مار است که در ادامه با $M_{,max,S}$ نشان داده مي‌شود. در روبات با سيستم تحرک ماهي، ميزان گشتاور در دو حالت بلند شدن سر متفاوت است. در حالت اول با فرض آنکه ميزان چرخش پاياني مدولها يکسان باشد ($\theta_{max}=90/n$)، گشتاور بيشنيه هر موتور در زمان شروع حرکت ($\theta_i=0$) اتفاق مي‌افتد. بنابراين در محاسبه گشتاور بيشينه موتور روي مدول i، مدول i-1 در زاويه $\theta_{i-1}=90/n$ ، مدول i-2 در $\theta_{i-2}=2\times90/n$، و به همين ترتيب مدول nام در زاويه $\theta_1=(i-1)\times90/n$ نسبت به زمين قرار خواهد گرفت. با جايگزاري در رابطه (۱۰)، گشتاور بيشينه هر موتور از زمان شروع حرکت سر تا رسيدن به وضعيت قائم از رابطه (۱۲) بدست مي‌آيد.

$$\begin{bmatrix}M_{1,\max}\\M_{2,\max}\\\cdots\\M_{n,\max}\end{bmatrix}_{F1,\max}=wl\begin{bmatrix}1\\c_1+3\\\cdots\\\sum_1^n(2n-(2i-1))\cos((i-1)\times90/n)\end{bmatrix} \qquad (۱۲)$$

که در آن درايه $M_{n,max}$ گشتاور بيشينه است که در ادامه با $M_{max,F1}$ نشان داده مي‌شود. علت اين امر مثبت بودن عبارت $(2n-2i+1)\cos((i-1)\times90/n)$ به ازاي $1\le i\le n$ است. $M_{max,F1}$ را مي‌توان بصورت رابطه (۱۳) نوشت:

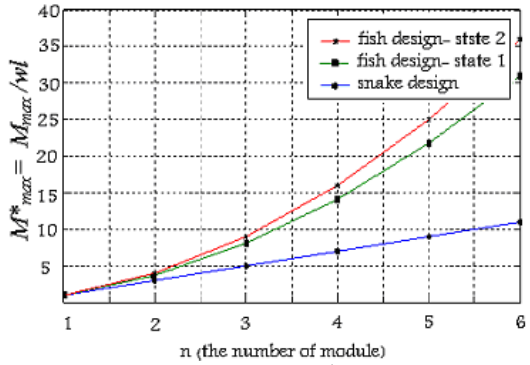
$$M_{\max,F1}=(2n-1)+\sum_{i=2}^{n}(2n-(2i-1))\cos((i-1)\times90/n)>(2n-1) \qquad (۱۳)$$

رابطه (۱۳) نشان مي‌دهد که $M_{max,F1}$ از $M_{max,S}$ بيشتر است. در روش دوم بلند نمودن سر، گشتاور موتورها از صفر قرار دادن θ_i در رابطه (۱۰) بدست مي آيد:

$$\begin{bmatrix}M_{1,\max}\\M_{2,\max}\\\cdots\\M_{n,\max}\end{bmatrix}_{F2,\max}=wl\begin{bmatrix}1\\1+3\\1+3+5\\\cdots\\\sum_{i=1}^{n}(2i-1)\end{bmatrix} \qquad (۱۴)$$

گشتاور بيشينه در اين حالت $M_{max,F2}=M_{n,max}$ است، که آشکارا از $M_{max,S}$ بيشتر است.

در شکل (۱۰) تغييرات گشتاور بيشينه در برابر تعداد مدول برخاسته از زمين، براي دو نوع سيستم ماهيچه اي مار و ماهي نشان داده شده است. تمامي نمودارهاي اين مقاله براي وزن (W) برابر با ۳۰۰ گرم و طول (l) برابر با ۱۰۰ ميليمتر و a برابر با ٦ ميليمتر محاسبه شده اند. ديده مي‌شود که با افزايش تعداد مدولها، تفاوت گشتاورها در دو سيستم چگونه زياد مي‌شود. در سيستم ماهيچه اي مار، نرخ افزايش نيز بسيار کمتر از سيستم ماهي است. از آنجا که هدف يافتن طرح با کمترين گشتاور در بين دو سيستم ماهي و مار است، در نمودارهاي بعدي به مقايسه طرح مار و طرح ماهي حالت اول که گشتاور کمتري نسبت به حالت دوم دارد پرداخته مي‌شود.

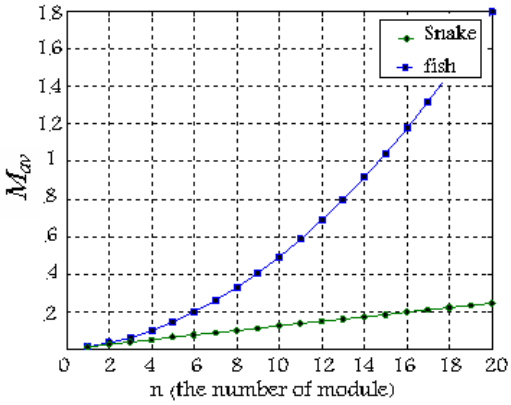


شکل ۱۰- نمودار تغییرات گشتاور بیشینه بي بعد در دو سیستم مار و ماهي و با دو ترتیب متفاوت عملکرد موتورها

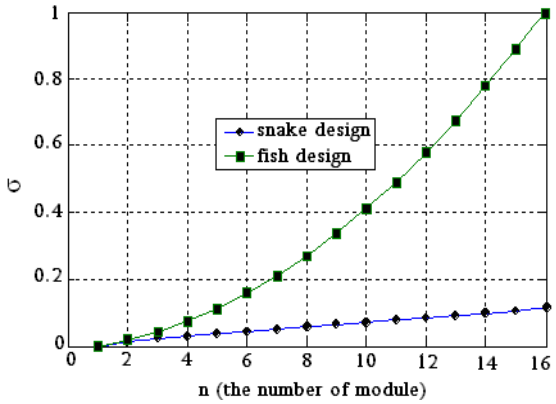
در بلند شدن سر روبات چندین موتور همزمان کار مي‌کنند. بنابراین کاهش گشتاور بیشینه به تنهایي نمي‌تواند نشانگر برتري روبات با آناتومي مار نسبت به روبات با ساختار ماهي باشد. زیرا ممکن است گشتاور موتورهاي دیگر که در بالا آمدن سر روبات موثر هستند در طرح مار بسیار نزدیک به گشتاور بیشینه باشد حال آنکه در طرح ماهي گشتاور سایر موتورها بسیار کوچکتر از گشتاور بیشینه باشد. براي رفع این ابهام میانگین گشتاور تمامي موتورهاي موثر در بالا آمدن سر روبات و انحراف معیار آنها در دو طرح مار و ماهي در شکلهاي (۱۱) و (۱۲) با یکدیگر مقایسه شده اند. میانگین (M_{av}) و انحراف معیار (σ)، از روابط (۱۵) و (۱۶) بدست مي‌آیند:

$$M_{av} = \frac{\sum_1^n M_{i,\max}}{n} \qquad (۱۵)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (M_{av} - M_i)^2}{n}} \qquad (۱۶)$$



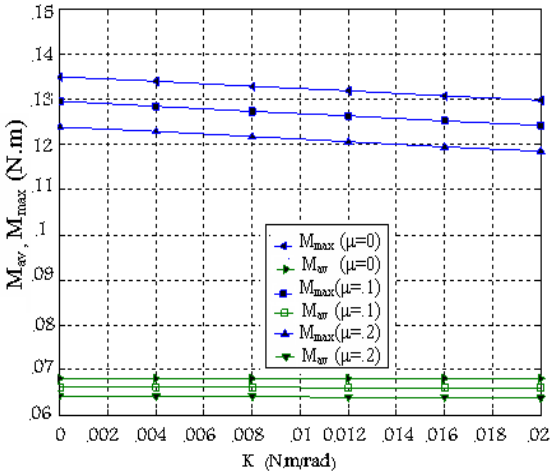
شکل ۱۱- میانگین گشتاور موتورهاي موثر در بالا آمدن سر روبات در دو طرح ماهي و مار نسبت به n.



شکل ۱۲- انحراف معیار گشتاور موتورهاي موثر در برابر n

همانگونه که شکل (۱۱) نشان مي‌دهد گشتاور متوسط در طرح مار بسیار کمتر از گشتاور متوسط در طرح ماهي است. بنابراین فرض یاد شده مردود است. همچنین به دلیل کمتر بودن انحراف معیار در طرح با آناتومي مار (شکل (۱۲))، محرکها در سیستم مار وضعیت یکنواخت تري نسبت به یکدیگر دارند و از ظرفیت محرکها استفاده بهتري شده است. به این ترتیب مصرف انرژي سیستم کاهش مي‌یابد و از یک نوع محرک براي تمام قسمتهاي روبات مي‌توان استفاده نمود.

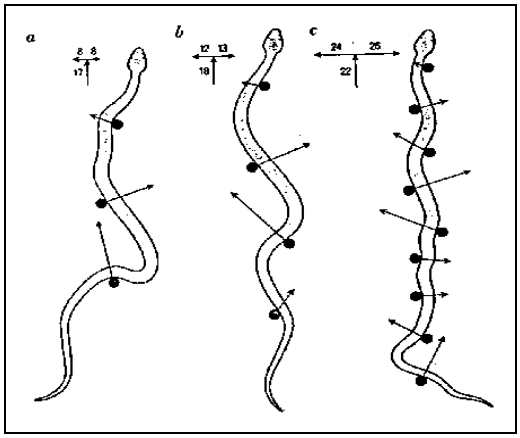
اثر K و μ که در بخش قبل براي ساده سازي از معادلات حذف شده بودند بر روي گشتاور چندان زیاد نیست. نمودار شکل (۱۳) تغییرات گشتاور در طرح مار را با در نظر گرفتن K و μ نشان مي‌دهد.



شکل ۱۳- تغییرات گشتاور بیشینه و متوسط با K و μ

۵- چگونگي ايجاد نقاط تكيه گاهي در حركت موجي كناري مارها

طبق تحقيقات انجام شده، در حركت موجي كناري، مارها قسمتي از برجستگي هاي زمين را بعنوان نقاط تكيه گاهي در نظر مي گيرند (شكل (۱۴)). بدن مار با وارد كردن فشار به اين نقاط، نيروي لازم براي پيش راني را ايجاد مي‌كنند [۱۶].



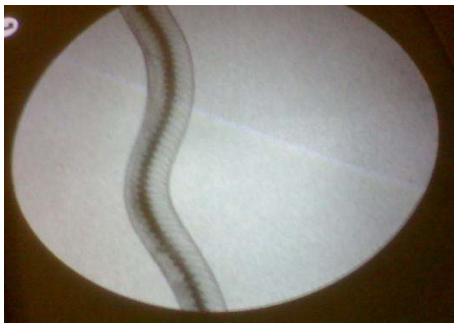
شكل ۱۴- طرز استفاده از ناهمواريهاي زمين براي پيش روي [۱۶].

در صورت درستي اين مطلب، مار نبايد توانايي حركت موجي كناري روي سطوح صاف مانند موزائيک و سراميک را داشته باشد. زيرا اين سطوح برجستگي قابل توجهي ندارند.

به اين منظور يک مار پلنگي تهيه شد و آزمايشهايي بر روي آن در دانشكده دامپزشكي دانشگاه شهيد بهشتي صورت گرفت. همانطور كه در شكل (۱۵) نيز ديده مي‌شود، مار روي سطح صاف موزائيک نيز به خوبي حركت موجي كناري را انجام مي‌دهد.

شكل ۱۵- حركت موجي كناري روي سطح صاف موزائيک

پس از اين آزمايش، اين نكته به ذهن مي‌رسيد كه شايد مار با انجام تغييراتي در بدن خود، نقاط تكيه گاهي را در هر مكان كه بخواهد ايجاد مي‌كند و اين حركت برخلاف ادعاي انجام شده، ربط چنداني به نوع سطح ندارد. به همين دليل مطالعاتي روي ساختار بدن مار زير دستگاه فلوروسكوپي (نوع دستگاه عكس برداري با اشعه X) انجام گرفت و در ادامه بدن مار كالبد شكافي شد.



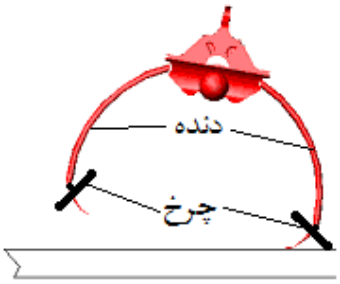
شكل ۱۶- چگونگي حركت مار با استفاده از دستگاه فلوروسكوپي(مكان آزمايش دانشگاه شهيد بهشتي)

نتيجه كالبد شكافي و فلوروسكوپي نشان داد كه دنده هاي متصل به ستون فقرات مار به نرمي استخوانهاي ماهي هستند (شكل (۱۶)). به اين ترتيب مار در هر نقطه كه بخواهد، با اندک فشاري مي‌تواند دنده ها را خم كند و تكيه گاه مناسب براي حركت خود ايجاد كند. اين موضوع پديده خيز سينوس[۱۲] در مارها را نيز توجيه مي‌كند (شكل (۱۷)). مار با بلند كردن بدن خود در نقاط غير تكيه گاهي، به تغيير شكل استخوانها در محل تكيه گاهها كمک مي‌كند. اين بلند كردن بدن، باعث ايجاد پيچش كمي در ستون فقرات مي‌گردد كه در مراجع مختلف مقدار پيچش اندازه گيري شده است. اين مطلب بوسيله شبيه سازي تاييد شد و در عمل تغيير شكل استخوانها روي سطح صاف و ايجاد موج ماري شكل باعث پيشروي مدل شد. در مورد شبيه سازي توضيح مختصري در بخش ۶ ارائه گرديده است. در صورتيكه تمايل به ايجاد اين حركت در يک روبات باشد، بايد مفصل اتصال مدولها قابليت پيچش داشته باشند.

شكل ۱۷- پديده خيز سينوس (بلند شدن قسمتهاي غيرتكيه گاهي بدن در طول حركت) در حين حركت موجي كناري [۱۷].

آزمايشهاي بعدي نشان مي‌دهد كه در صورت وجود برجستگي روي زمين مار از آن بعنوان تكيه گاه استفاده خواهد كرد و در غير اينصورت بوسيله بدن خود محل تكيه گاه را ايجاد مي‌كند. كشف اين مسئله به حذف چرخ در زير بدن روباتهاي مار شكل كمك زيادي خواهد كرد.

گفتني است كه وجود چرخ هنوز نيز مي تواند در بهتر انجام شدن حركت موجي كنار كمك كند. ولي محل نصب صحيح آن در زير بدن نيست بلكه روي دنده ها و به سمت پايين خواهد بود به گونه اي كه جهت چرخش چرخ در راستاي طولي بدن روبات باشد (شكل (۱۸)). عرض چرخها در اين حالت بايد اندكي پهن تر باشد. در اين حالت چرخها ديگر مانعي بر سر حركت روبات در محيطهاي ناهموار نخواهد بود. چرخها در اين وضعيت ديگر وزن روبات را تحمل نخواهند كرد و كار آنها تنها سهولت سرخوردن روبات در نقاط تكيه گاهي خواهد بود.



شكل ۱۸- محل نصب درست چرخها در روباتهاي مار شكل

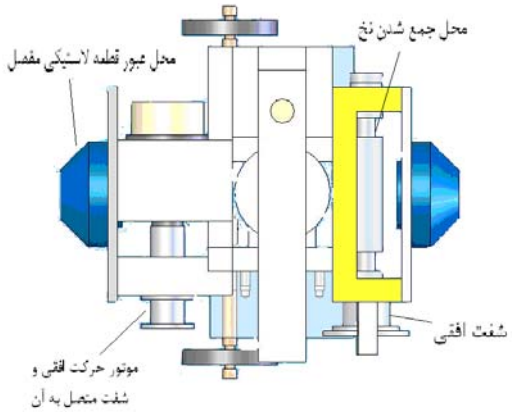
٦- بحث و بررسي

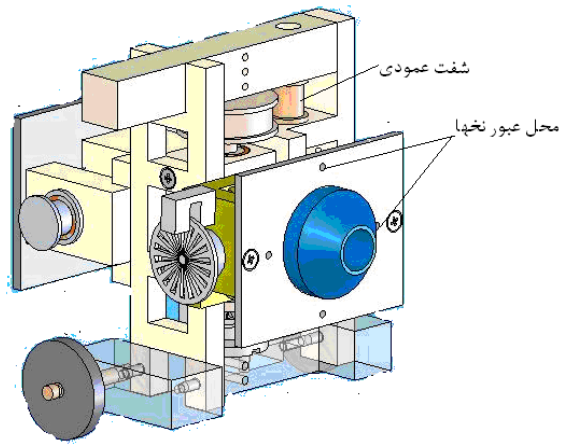
به منظور بررسي درستي مطالب عنوان شده در بخشهاي ۴ و ۵، از آزمايش عملي و شبيه سازي كامپوتري استفاده شد، كه در ادامه به شرح آن پرداخته مي‌شود.

٦-۱- بررسي درستي كاهش گشتاور موتور با استفاده از ساختار ماهيچه اي مار

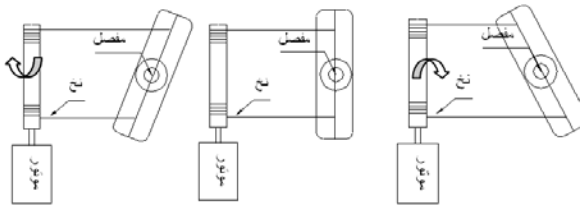
به منظور بررسي درستي استفاده از ساختار ماهيچه اي در كاهش گشتاور محركها (بخش ٤)، يک روبات مارشكل طراحي گرديد كه در آن آرايش محركها قابل تبديل به سيستم ماهيچه‌اي مار، ماهي و يا تركيبي از اين دو باشد.

ماهيچه جانوران به عنوان محرک طبيعي، انعطاف پذير است و مي‌تواند همراه بدن منعطف شود. ماهيچه ها معمولا بوسيله تاندونها به محل اعمال نيرو متصل مي‌گردند. در اين طرح سعي شد تا با استفاده از نخ (بعنوان تاندون)، موتور DC و قرقره در هر مدول روبات، محركي مشابه با ماهيچه طراحي شود كه بتواند همراه بدن منعطف شود. شكل (۱۹) شمايي از مدول روبات را نشان مي‌دهد. در هر مدول يک شفت افقي و يک شفت عمودي نصب شده است. شفت افقي و عمودي به ترتيب وظيفه گردش موتور در صفحه هاي افقي و عمودي را بعهده دارند. در دو طرف شفت دو تكه نخ در دو جهت مخالف پيچيده شده اند. اين نخها از مدولهاي مختلف روبات گذشته و انتهاي آنها به موتوري كه روي چند مدول دورتر قرار دارد، متصل است. اين ساز و كار در شكل (۲۰) نشان داده شده است. با چرخش موتور يكي از نخها باز و ديگري بسته مي‌شود و باعث چرخش مدول مي‌گردد. با جابجا كردن محل بستن نخ به دور شفت عمودي/افقي در مدولهاي مختلف، مي‌توان آرايش ماهيچه اي مار يا ماهي را به دلخواه ايجاد كرد.





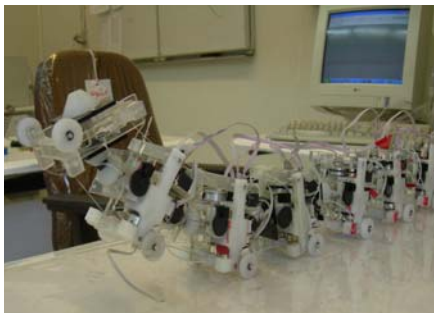
شكل ۱۹- طرح واره مدول روبات طراحي شده



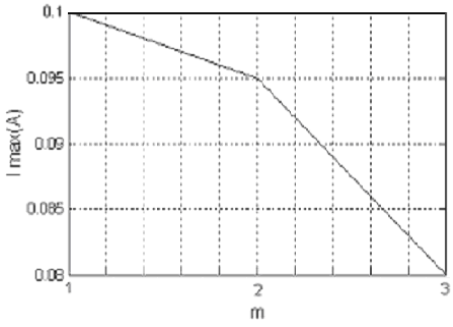
شكل ۲۰- چگونگي كاركرد عملگر طراحي شده براي روبات

شماي كامل روبات ساخته شده در شكل (۱-الف) نشان داده شده است.

از آنجا كه اندازه گيري گشتاور موتور به طور مستقيم امكان پذير نبود، و به دليل انكه گشتاور يک موتور DC با جريان مصرفي آن متناسب است، جريان موتور به جاي گشتاور اندازه گيري شد. براي اندازه گيري جريان، از يک مبدل جريان، كارت ۱۷۱۶PCI، و برنامه نوشته شده با نرم افزار Matlab استفاده شد. آزمايش با سه آرايش مختلف محركها تكرار شد. در آزمايش اول نخهاي هر موتور به دور شفت عمودي مدول جلويي پيچيده شدند (m=۱ يا آرايش ماهيچه اي ماهي). در آزمايش دوم نخها به دور شفت دو مدول جلوتر از خود بسته شدند (m=۲ يا آرايش ماهيچه اي بين مار و ماهي). در پايان (در آزمايش سوم) نخها به دور شفت سه مدول جلوتر از خود بسته شدند (m=۳ يا آرايش ماهيچه اي مار). در هر بار آزمايش، سه مدول متوالي از زمين بلند شدند. شكل (۲۱) اين روبات را در حين آزمايش نشان مي‌دهد. نمودار شكل (۲۲) نتيجه اين آزمايشها را نشان مي‌دهد. محور قائم جريان مصرفي موتور با بيشترين گشتاور را نشان مي‌دهد. محور افقي (m) محل قرار گرفتن محركها را نشان مي‌دهد. همانگونه كه در بخش ۴ نيز پيش بيني شد، سيستم ماهيچه‌اي مار كمترين جريان مصرفي و در نتيجه گشتاور را براي بلند كردن سر نياز دارد.



شكل ۲۱- روبات در حين انجام آزمايش بلند كردن سر



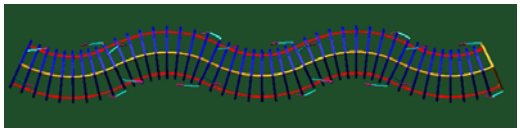
شكل ۲۲- نتيجه آزمايش بلند كردن سر روبات، تغييرات جريان (I_{max}) برحسب محل قرارگيري محرک (m)، در ولتاژ ثابت ۸ ولت

۶-۲- بررسي درستي ايجاد نقاط تكيه گاهي در حركت روبه جلو و حذف چرخ

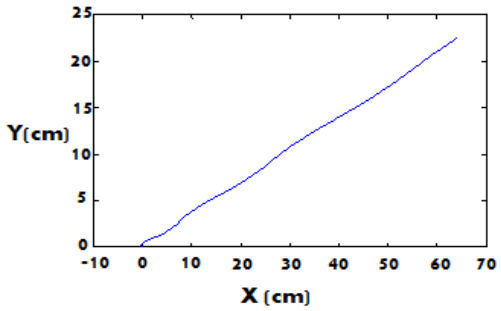
به منظور بررسي درستي مطالب بخش ۵، حركت يک مار روي سطح صاف بوسيله نرم افزار ADAMS شبيه سازي شد. مشكل اصلي در شبيه سازي، پياده سازي مدل به گونه اي بود كه يک كامپيوتر عادي بتواند تعداد زيادي مهره و محرک را مدل كند. مشكل ديگر در اين راه، مدلسازي نخ بود. مدلي پاياني داراي مهره هايي شبيه شكل (۲۳) بود.

شكل ۲۳- شماي مهره در مدلسازي انجام شده

هر مهره بوسيله سه فنر به مهره بعدي متصل است. اين مدل داراي ۴۶ عدد مهره، ۹۰ محرک، و ۹۰ فنر و دمپر مي‌باشد. طراحي مدل به گونه است كه مهره نسبت به مهره ديگر علاوه بر چرخش، امكان پيچش نيز دارد. با ايجاد موج حركت موجي كناري به همراه اثر خيز سينوس در محركها كه براي اولين بار در تحرک يک ساختار ماري شكل مدلسازي شده است (مطابق آنچه در بخش ۵ توضيح داده شد)، پيشروي روي سطح صاف حاصل شد. شكل (۲۴) شمايي از مدل در حال پيشروي را نشان مي‌دهد. در نمودار شكل (۲۵) پيشروي روبات در صفحه XY نشان داده شده است.



شكل ۲۴- مدل مار در حال پيشروي (بالا) همراه با اثر sine lifting (پايين)



شكل ۲۵- نمودار پيشروي مار درصفحه XY

۷- جمع بندي و نتيجه گيري

هدف از اين تحقيق ارائه چند ايده جديد براي بهبود طراحي روباتهاي مارسان و افزايش انعطاف پذيري آنها مي‌باشد. نتيجه اين بررسي ها در چهار بخش خلاصه مي گردد كه عبارتند از:

- آرايش طراحي محركها بايد از قالب سنتي آرايش ماهيچه اي ماهي كه در آن نيروي محركها كمكي به يكديگر نمي‌كنند خارج شود و به آرايش ماهيچه اي مار كه در آن نيروي محركها در انجام يک وظيفه با يكديگر جمع مي‌شوند تبديل شود. اين آرايش به روبات قابليت انجام چند حركت را نيز مي‌دهد.
- چرخها بايد از زير روبات حذف شوند. محل نصب آنها بايد روي دنده و به سمت پايين باشد. چرخها نبايد به گونه اي نصب شوند كه وزن روبات را تحمل كنند.
- مفصل اتصال مدولهاي روبات بايد از حالت خشک و صلب خود خارج شود و به جاي آن از قطعات انعطاف پذير مانند لاستيک استفاده شود كه امكان ايجاد پيچش در بدن روبات را نيز ايجاد كند.
- در ايجاد حركت در محركها، تنها به ايجاد موج حركت موجي كناري نبايد اكتفا كرد. اعمال اثر خيز سينوس كه به زاويه اتصال نخ به مدول و محل نصب محركها مربوط است نيز در پيشروي روبات تاثير گذار است.

۸- تقدير و تشكر

نگارندگان مقاله بر خود لازم مي‌دانند كه از "صندوق حمايت از پژوهشگران" كه حمايتهاي مالي اين طرح را انجام دادند تشكر و قدرداني نمايند. همچنين از زحمات آقايان مهدي رجبي زاده از مركز محيط زيست كرمان و حسين رهنمافرد دانشجوي كارشناسي ارشد دانشگاه آزاد اسلامي واحد قزوين كه بدون كمک آنها، انجام آزمايش روي نمونه مار واقعي امكان پذير نبود سپاسگذاري مي‌گردد.

۹- فهرست علائم

a	فاصله عمودي سوراخ عبور نخ تا محل اتصال (شكل (۳))، دو مدول
$c_{ij...n}$	$\cos(\theta_i+\theta_j+\ldots+\theta_n)$
K	ضريب فنريت قطعه لاستيكي رابط دو مدول متوالي، N/deg
l	نصف طول هر مدول روبات بين دو محل اتصال (شكل۳)، m
m	تعداد مدولي كه بين مدول قرار گيري محرک و مدول فعال شونده بوسيله آن قرار دارد
M	گشتاور وارد شده به درام (شكل ۴)، N/m
M_i	گشتاور موتور i ، N/m
$M_{i,max}$	ماكزيمم گشتاور محرک مدول iام در هنگام بلند نمودن مدول مربوط، N/m
$M_{joint,i}$	برايند گشتاور حول joint i (محل اتصال مدول i به i+1)
N	تعداد مدولي كه از زمين برخاسته است
T_i	كشش نخ متصل بين مدول i و n+i (در ورود به سطح اصطكاكي/قرقره i)، N
T'_i	كشش نخ متصل بين مدول i و n+i (در خروج از سطح اصطكاكي/قرقره i)، N
W	وزن يک مدول، kg

فهرست علائم يوناني

β	زاويه تماس بين نخ و درام (شكل۴)، Deg
β_i	زاويه تماس بين نخ و لبه هموار سوراخ هدايت نخ، Deg
$\beta_{ij...n}$	$\beta_i+\beta_j+\ldots+\beta_n$
θ_i	زاويه بين مدول i و i+1، Deg
$\theta_{ij....n}$	$\theta_i+\theta_j+\ldots+\theta_n$
μ	ضريب اصطكاك بين نخ و درام (شكل ۴)

۱۰- مراجع

[۱] برازنده، فرشاد؛ دليل صفايي، سيف؛ "طراحي مفاصل جديد براي روباتهاي مارسان"، پانزدهمين كنفرانس بين المللي سالانه مهندسي مكانيک، ۳۴۳، ۱۳۸۶.

[۲] حاجي آقا معمار، امير حسين؛ زارع حاجي باقر، پروين؛ كشميري، مهدي؛ "تحليل، طراحي و ساخت روبات ماژولار با قابليت تبديل به پيكربندي هاي متفاوت"، پانزدهمين كنفرانس بين المللي سالانه مهندسي مكانيک، ۳۳۷، ۱۳۸۶.

[۳] عليزاده، دانيال؛ مدلسازي هيدروديناميكي و كنترل ربات كرم مانند براي حركت در زير آب (پايان نامه كارشناسي ارشد)، استاد راهنما دكتر وثوقي، غلامرضا؛ دانشگاه صنعتي شريف، آبان ۱۳۸٦.

[۴] صدرزاده طباطبايي محمد حسين؛ كالبد شناسي مقايسه اي مهره داران، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.

[۵] Barazandeh F.; "Design, Control and Simulation of a Snake robot (PhD Thesis)", Advisor Dr. Bahr B, Wichita State University, 2002.

[۶] 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.

[۷] Bayraktaroglu Z. Y., Kılıçarslan A., Kuzucu A., Hugel V., Blazevic P.; “Design and Control of Biologically Inspired Wheel-less Snake-like Robot” 2006.

[۸] 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.

[۹] J.Gray, "The Mechanism of Locomotion In Snakes", Journal of Experimental Biology, vol. 23, No. 2, p.p.101-123,1994.

[۱۰] J.L.Meriam, L.G.Kraige, "Engineering Mechanics Statics",2nd edition, John Wiley, 368. 1990.

[۱۱] H. W. Lissmann, " Rectilinear Locomotion In a Snake", Journal of Experimental Biology, vol. 10,p.p. 368-379, 1950.

[۱۲] Moon BR, Gans C. "Kinematics, muscular activity, and propulsion in gopher snakes", Journal of Experimental Biology, 2669– 2684, 1998.

[۱۳] 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.

[۱۴] S. Hirose, "Biologically Inspired Robots", Oxford university press. 1993.

[۱۵] A. M. Cardona1, J. I. Barrero2, C. Ot´ alora1and C. Parra1, "Serpentine locomotion articulated chain: ANA II", Woodhead Publishing Ltd 179 ABBI 2005 Vol. 2 No. 3–4 pp. 179–185

[۱۶] 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.

[۱۷] C. Cans, "How Snakes Move", Journal of Experimental Biology,1950, pp. 82-96.

۱۱- زیرنویس ها

[1] Gray
[2] Lissmann
[3] Hirose
[4] Chirikjian
[5] Burdick
[6] Bayraktaroglu
[7] Kılıçarslan
[8] Peg Points
[9] Serpentine یا Lateral Undulation
[10] ANAII
[11] Segmental
[12] sine lifting