فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک جامدات

www.jsme.ir

فصلنامه علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک جامدات

بهینه‌سازی چندهدفی حرکت سرپنتین ربات‌مارمانند با استفاده از NSGA

هادی کلانی[1]، علیرضا اکبرزاده[2،*]

* نویسنده مسئول: ali_akbarzadeh@um.ac.ir

چکیده

این مقاله با مدل‌سازی و شبیه‌سازی ربات مار مانند شروع شده و با کار آزمایشی به پایان رسیده است. در ابتدا دو منحنی سرپنوید متقارن و نامتقارن برای ایجاد حرکت سرپنتین معرفی شده است. سپس معادلات سینماتیک و دینامیک یک ربات مارمانند با n عضو در حرکت سرپنتین بر روی سطوح صاف و شیبدار به‌صورت ساده، جامع و کارامد ارائه و برای تأیید معادلات، از نرم افزار سیم‌مکانیک و آزمایش‌های عملی استفاده شده است. همچنین تأثیر پارامترهای منحنی سرپنوید بر روی گشتاورهای مورد نیاز مفاصل و پیشروی ربات مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه سطح شیبدار، کاهش زاویه پیچش اولیه، کاهش تعداد نوسانات (یا تعداد موج‌های منحنی بدن)، افزایش طول عضوها و افزایش تعداد آن، گشتاور مورد نیاز افزایش می‌یابد. برای بهینه‌سازی پارامترهای منحنی سرپنوید نامتقارن، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفی NSGA، برای ارضای هم‌زمان دو هدف (یعنی حداقل گشتاور مورد نیاز و بیشترین پیش‌روی) استفاده شده است. طبق نتایج دامنه تغییرات پارامترهای منحنی بدن ربات مارمانند، برای رسیدن به بیشترین پیش‌روی و کمترین گشتاور، محدود است. به کمک منحنی سرپنوید نامتقارن می‌توان به منحنی‌هایی که به بدن مار شبیه‌تر باشند، دست یافت و عملکرد ربات مارمانند را افزایش داد. در پایان از ربات مارمانند FUM-Snake I برای آزمایش و تصدیق معادلات بر روی سطح صاف استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی

ربات مارمانند، حرکت سرپنتین، سینماتیک، دینامیک، منحنی سرپنوید، بهینه‌سازی NSGA.

۱- دانشجوی دکتری، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- دانشیار، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد.

۱- مقدمه

ربات‌های مارمانند اولین بار توسط هیروس در اوایل سال ۱۹۷۰معرفی شده‌اند. ربات‌های مارمانند برای انجام دادن مأموریت‌هایی مانند اکتشاف، عملیات نجات و عملیات بازرسی پیشنهاد شده‌اند. اکثر ایده‌پردازی‌ها در مورد حرکت این ربات‌ها با الهام‌پذیری از طبیعت بوده‌است. حرکت سرپنتین [1] عامترین حرکت مار در طبیعت است. سایتو و همکارانش [۲] رباتی مارمانند را که توانایی حرکت در محیط‌های مختلف را داراست ساختند و معادلات حرکت سرپنتین را به‌دست آوردند. ترنست [۳] به بررسی سینماتیک و دینامیک ربات مارمانند در دوبعد و سه بعد پرداخته است. به‌علاوه ترنست و همکارانش [۴] گزارشی اجمالی در مورد روش‌های سینماتیکی و دینامیکی ربات‌های مارمانند تا زمان خود را ارائه دادند. وثوقی و همکارانش [۵] ساختاری جدید برای ربات مارمانند ارائه نمودند و در مقاله‌ی خود برای محاسبه دینامیک از روش گیبس-اپل استفاده کردند. در ادامه تحقیق در مورد ربات مارمانند، اسپرانکلین و همکارانش [۶] حرکت دوبعدی مستقیم الخط و لیجلبک و همکارانش [۷] حرکت پهلویی را که یک حرکت سه بعدی است مورد تحلیل قرار دادند. همچنین آن‌ها از فنر و دمپر برای ایجاد اصطکاک در خلال حرکت استفاده کرده‌اند. یه و همکارانش [۸] به جزئیات ربات مارمانندشان که دارای سرعت بالایی می‌باشد، پرداختند. همچنین آنها حرکت سرپنتین را به کمک این ربات مورد بررسی قرار دادند. کرسپی و همکارانش [۹] نشان دادند که برای اینکه ربات مارمانند در محیط‌های مختلف قادر به حرکت باشد، نیاز به الگویی دارد که بتواند با محیط اطراف خود وفق یابد. به‌عنوان مثال آنها نشان دادند که برای ایجاد حرکت شناکردن، به یک موجهای سینوسی با اختلاف فاز پایین نیاز داریم. حسن زاده و اکبرزاده [۱۰و ۱۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک حرکت جدیدی به نام FHS[2] را ایجاد کردند. این حرکت به کمک روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، به گونه‌ای انجام شده است که عضو اول (به‌عنوان دم ربات) همواره دارای جهتی ثابت و به سمت جلو باشد. هدف از ایجاد این حرکت قرار دادن دوربین بر روی عضو اول ربات مارمانند است. اکبرزاده و همکارانش [۱۲و ۱۳] حرکت موجی شکل را از نظر سینماتیکی و دینامیکی مورد تحلیل قرار دادند. آنها در تحلیل خود از دو منحنی سرپنوید متقارن و نامتقارن استفاده کردند. آنها نشان دادند که با استفاده از منحنی نامتقارن علی‌رغم افزایش سرعت پیش‌روی ربات، گشتاور مصرفی نسبت به حالت منحنی متقارن، تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین آنها [۱۴] روش سینماتیکی جدیدی برای ایجاد حرکت موجی شکل ارائه دادند.

در این مقاله پس از معرفی دو منحنی سرپنوید[3] متقارن و نامتقارن، معادلات دینامیکی و سینماتیکی ربات مارمانند به‌صورت کلی (یعنی بر روی سطوح صاف و شیبدار) محاسبه می‌شود. سپس برای تأیید این معادلات از نرم‌افزار سیم‌مکانیک[4] و آزمایش بر روی یک ربات واقعی استفاده می‌شود. در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای منحنی سرپنوید بر عملکرد ربات پرداخته شده تا لزوم بهینه‌سازی این پارامترها روشن‌تر شود. در انتها ربات مارمانند FUM-Snake I معرفی می‌شود و نشان داده خواهد شد که مسیر پیموده شده توسط این ربات و مسیر پیش‌بینی شده حاصل از حل معادلات دینامیک از تطابق نسبی برخوردارند.

۲- مدل ریاضی برای منحنی سرپنوید متقارن وغیر متقارن

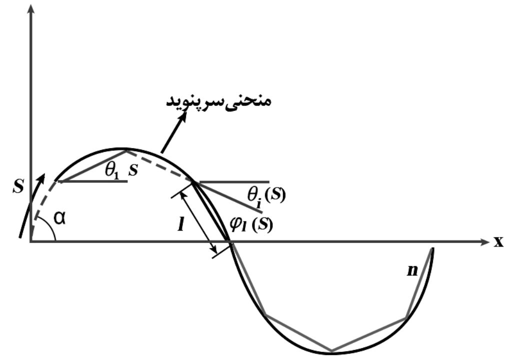
هیروس برای تولید حرکت ربات مارمانند منحنی سرپنوید را پیشنهاد داد. به عبارت دیگر، او منحنی سرپنوید را به انحنای بدن مار نسبت داد و نشان داد که این منحنی شبیه‌ترین منحنی به بدن مار است[۱]. انحنای منحنی سرپنوید متقارن به‌صورت زیر است:

$$\rho(s)=\frac{-2k_n\pi\alpha}{L}\sin\left(\frac{2k_n\pi s}{L}\right) \qquad (1)$$

که در آن L طول کل مار، k_n تعداد نوسانات (یا تعداد موج‌های منحنی) بدن مار، α زاویه‌ی پیچش اولیه منحنی و s طول در جهت منحنی بدن مار است. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است. ربات مارمانند شامل n عضو به طول ۱ است که توسط $n-1$ مفصل به یکدیگر متصل شده‌اند. در شکل (۱)، $k_n=1$ است.

1- Serpentine motion
2- Forward Head Serpentine

3- Serpenoid
4 - SIM MECHANICS



شکل (۱) قرار گرفتن عضوها بر روی منحنی سرپنوید.

با توجه به این که $d\varphi = \rho ds$ ، نتیجه می‌شود:

$$d\varphi = \rho ds$$

$$\rightarrow \varphi = \int_{s+(i-1)i}^{s+ii} \rho(u)\,du \tag{۲}$$

$$= \int_{s+(i-1)i}^{s+ii} \frac{-2k_n\pi a}{L} \sin\left(\frac{2k_n\pi u}{L}\right) du$$

که در آن φ زاویه نسبی و i شماره عضو می‌باشد. بعد از ساده‌سازی، زوایای نسبی به‌صورت رابطه‌ی زیر قابل محاسبه هستند:

$$\varphi_i(s) = -2\alpha \sin\left(\frac{k_n\pi}{L}\right) \sin\left(\frac{2k_n\pi s}{L} + \frac{2k_n\pi i}{n} - \frac{k_n\pi}{n}\right) \tag{۳}$$

با مشتق‌گیری از معادله (۳) سرعت زاویه‌ای نسبی و شتاب زاویه‌ای نسبی به‌دست می‌آید. با استفاده از معادله (۳) و زاویه‌ی مطلق عضو اول، زوایای مطلق دیگر عضوها به‌صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شوند.

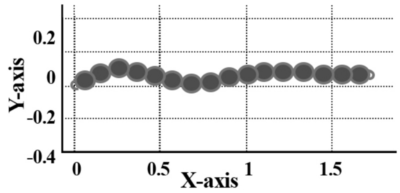
$$\theta_i = \theta_1 + \sum_{k=1}^{i-1} \varphi_k \tag{۴}$$

که درآن θ_1 زاویه‌ی مطلق عضو اول و θ_i زاویه مطلق عضو i ام است. سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای مطلق عضو i ام با مشتق‌گیری از رابطه (۴) نسبت به زمان محاسبه می‌شوند. با تغییر زاویه پیچش اولیه برای هرکدام از مفصل‌ها، می‌توان شکل منحنی سرپنوید را تغییر داد. منحنی حاصل، سرپنوید نامتقارن نامیده می‌شود. انحنای منحنی سرپنوید نامتقارن به صورت معادله (۵) تعریف می‌شود.

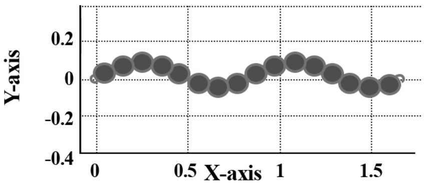
$$\rho(s) = \frac{-2k_n\pi\,\alpha(i)}{L} \sin\left(\frac{2k_n\pi s}{L}\right), \tag{۵}$$

$$\alpha(i) = \frac{\pi}{180} k_{unsym} i + \alpha$$

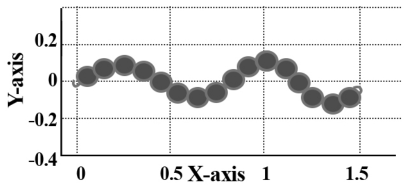
که در آن k_{unsym}، فاکتور نامتقارن است. تأثیر این پارامتر بر روی هندسه منحنی ربات مارمانند، در شکل (۲) نشان داده شده است.



(الف) $k_{unsym} = -2$



(ب) $k_{unsym} = 0$



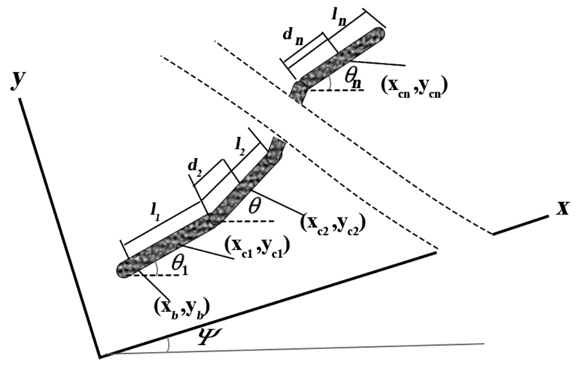
(ج) $k_{unsym} = 2$

شکل (۲) تأثیر فاکتور نامتقارن بر روی هندسه منحنی ربات مارمانند.

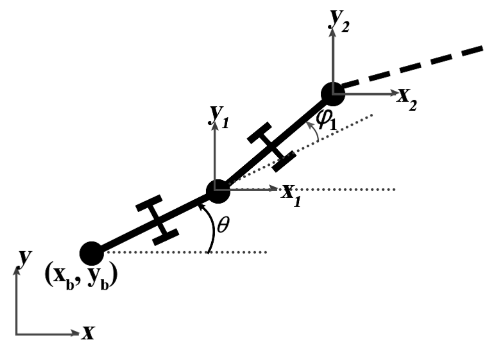
همانطور که از شکل (۲-الف) پیداست اگر $k_{unsym} = 0$ باشد ارتفاع موج‌های ایجاد شده یکسان و در غیر این صورت ارتفاع موج‌ها متفاوت هستند. ولی از آنجایی که منحنی بدن مارها در بیشتر مواقع دارای ارتفاع موج‌های یکسانی نیست (شکل ۲-ب و۲- ج)، لذا با تعریف منحنی سرپنوید نامتقارن ($k_{unsym} \neq 0$) می‌توان به حالت طبیعی‌تری از حرکت مارها دست یافت که مطمئناً در عملکرد ربات مارمانند بی‌تأثیر نخواهد بود.

۳- سینماتیک ربات مارمانند

شکل (۳- الف)، یک ربات مارمانند صفحه‌ای، متشکل از n عضو و $n-1$ مفصل را نشان می‌دهد. هر عضو دارای جرم m_i، طول l_i و ممان اینرسی I_i است. به‌علاوه (x_{ci}, y_{ci}) موقعیت مرکز جرم عضو i ام و (x_b, y_b) نشان‌دهنده موقعیت دم ربات مارمانند است. به‌علاوه ψ نشان‌دهنده زاویه سطح شیبدار و $d_i = \ell_i / 2$ است.



(الف)



(ب)

شکل (۳) سینماتیک ربات مارمانند. الف) نمایش زوایای نسبی و مطلق، ب) قراردادن سیستم مختصات بر روی مفاصل.

با توجه به شکل (۳-ب) برای تعریف سینماتیک ربات مارمانند، روی هر یک از عضوها یک سیستم مختصات تعریف می‌شود. جابه‌جایی، عضو iام از معادله (۶) به‌دست می‌آید.

$$(x_i\,, y_i) = \left(x_b + \sum_{j=۱}^{i-۱} \ell_j \cos\theta_j \;,\; y_b + \sum_{j=۱}^{i-۱} \ell_j \sin\theta_j \right) \quad (۶)$$

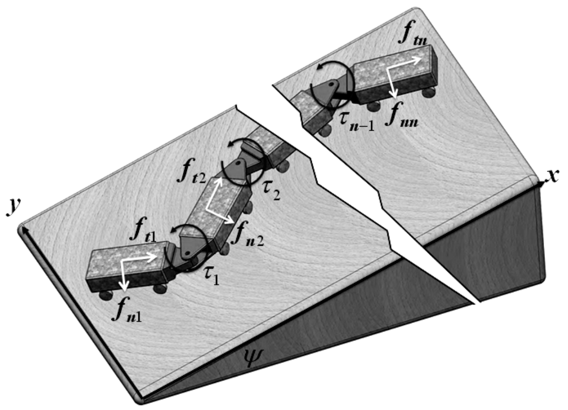
سرعت و شتاب عضو i ام با مشتق‌گیری از معادله (۶) نسبت به زمان محاسبه می‌شوند.

۴- دینامیک ربات مارمانند

بررسی دینامیک یک ربات عموماً به دو دلیل اصلی انجام می‌شود: اول اینکه به کمک معادلات حرکت علاوه بر شبیه‌سازی، می‌توان تأثیر ساختارهایِ کنترلیِ متفاوت را بر روی ربات مشاهده کرد. دوم اینکه، از این معادلات می‌توان برای بهینه‌سازی ربات- به‌عنوان مثال گشتاور مصرفی و یا فاصله پیموده شده- استفاده کرد. یکی از مشکلات موجود در بررسی ربات‌ها، انتخاب نوع روش حل دینامیکی مناسب برای ربات است. در این بخش، معادلات حرکت ربات مارمانند در حرکت سرپنتین و در حالت کلی(یعنی بر روی سطح شیبدار و صاف) به کمک روش لاگرانژ استخراج شده‌است.

۴-۱-بررسی اصطکاک

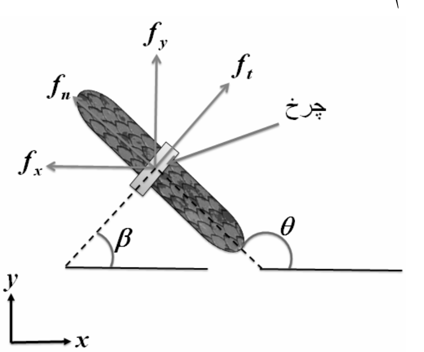
با توجه به کارهای گذشته[۱-۲]، عامل اصلی پیش‌رانش در حرکت سرپنتین، تفاوت اصطکاک در راستای عضو و عمود بر عضو است. برای ایجاد این تفاوت، در زیر عضوهای ربات مطابق شکل (۴) چرخ قرار داده شده است. مقدار نیروی اصطکاک وارد بر هر عضو توسط رابطه (۷) محاسبه می‌شود، شایان ذکر است در این مقاله، اصطکاک به‌صورت ویسکوز بررسی شده است.



شکل (۴) دیاگرام آزاد ربات مار مانند بر روی سطح شیبدار.

$$f_{ei} = -m_i C_e v_i^e \quad (۷)$$

که درآن $e = t, n$ (t و n به‌ترتیب جهت‌های مماسی و عمود بر عضو هستند). C_t و C_n ضرایب اصطکاک ویسکوز در جهت‌های مماسی و عمودی می‌باشند. m_i جرم عضو i ام است.



شکل (۵) نیروی اصطکاک وارد بر هر عضو ربات مارمانند.

نیروهای اصطکاک در جهت‌های x و y با استفاده از معادله (۸) محاسبه می‌شوند. توجه به این موضوع ضروری است که اگر چرخ به‌صورت موازی با عضو قرار گیرد آن‌گاه زوایای β و θ طبق شکل (۵) با یکدیگر برابرند. در این شکل، θ زاویه مطلق عضو و β زاویه چرخ است. در نتیجه داریم:

$$f_{xi} = f_{ti}\cos\beta_i - f_{ni}\sin\theta_i$$
$$f_{yi} = f_{ti}\sin\beta_i - f_{ni}\cos\theta_i \qquad (۸)$$

در ادامه، معادلات دینامیک با استفاده از روش لاگرانژ به‌دست آمده و نتایج به‌دست آمده با نرم افزار سیم مکانیک مقایسه می‌شود. یکی از ویژگیهای نرم‌افزار سیم‌مکانیک، آن است که این نرم‌افزار با گرفتن مدل فیزیکی سیستم از کاربر، به طور اتوماتیک فاز مدلسازی ریاضی را انجام می‌دهد. از مشکلات اساسی در تحلیل ربات‌های خزنده، مدل کردن اصطکاک می‌باشد. بر خلاف نرم افزارهای شبیه‌سازی دیگر مانند ادمز و وباتس، در نرم‌افزار سیم‌مکانیک باید مدل اصطکاک توسط کاربر معرفی شود. در این مقاله برای تصدیق نتایج از رابطه (۷) هم در معادلات دینامیکی و هم در نرم افزار سیم‌مکانیک استفاده می‌شود.

۴-۲- محاسبه دینامیک به کمک روش لاگرانژ

در مطالعات قبلی [۱۰-۱۴] سینماتیک ودینامیک ربات مارمانند حرکت‌های موج شکل و سرپنتین بر روی سطوح صاف مورد بررسی قرار گرفته است. اما در این مقاله معادلات دینامیک این ربات در حالت کلی (یعنی بر روی سطوح شیبدار) محاسبه شود. با معین بودن موقعیت دم ربات در صفحه حرکت و همچنین زوایای مطلق هر کدام از عضوها پیکره‌بندی ربات مارمانند به‌صورت یکتا در صفحه مشخص می‌شود. مختصات تعمیم یافته[1] به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$q_j = [\theta_۱, \theta_۲, \theta_۳, ..., \theta_n, x_b, y_b] \qquad (۹)$$

فرم کلی معادله‌ی لاگرانژ به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i^{n.c} \qquad (i = ۱,۲,۳,...,n+۲) \qquad (۱۰)$$

که در آن، q_i مختصه تعمیم یافته، T انرژی جنبشی، V انرژی پتانسیل و $Q_i^{n.c}$ نشان‌دهنده‌ی نیروهای تعمیم‌یافته ناپایستار است. نیروهای ناپایستار موجود در سیستم عبارت‌اند از گشتاور موتورها، نیروهای اصطکاک و نیروهای تکیه‌گاهی. نیروهای تعمیم یافته ناپایستار به‌صورت زیر محاسبه می شوند:

$$Q_{\theta j} = d_j(f_{yi}\cos\theta_j - f_{xi}\sin\theta_j + m_j g\sin\Psi\sin\theta_j)$$
$$+\ell_j\left[\cos\theta_j\sum_{i=j+۱}^{n}(f_{yi}) - \sin\theta_j\sum_{i=j+۱}^{n}(f_{xi})\right.$$
$$\left.+\sin\theta_j\sum_{i=j+۱}^{n}(m_j g\sin\Psi)\right] + \tau_{j-۱} - \tau_j \qquad (۱۱)$$

$$Q_{xb} = \sum_{i=۱}^{n}(f_{xi}) - \sum_{i=۱}^{n} m_i g\sin\psi \qquad (۱۲)$$

$$Q_{yb} = \sum_{i=۱}^{n}(f_{yi}) \qquad (۱۳)$$

که f_{xi} نیروی اصطکاک و τ_i گشتاور مورد نیاز برای عضو i است. همچنین Q_{xb} و Q_{yb} به‌ترتیب نیروهای تعمیم یافته در جهت x_b و y_b هستند. انرژی جنبشی برای یک ربات مارمانند با n عضو، به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$k = \sum_{i=۱}^{n}\left[\frac{۱}{۲}I_i\dot{\theta}_i^۲ + \frac{۱}{۲}m_i(\dot{x}_i^۲ + \dot{y}_i^۲)\right] \qquad (۱۴)$$

از آنجایی که ربات مارمانند در این حرکت همواره بر روی سطح زمین قرار دارد، انرژی پتانسیل برابر صفر خواهد بود. لذا با قرار دادن معادله‌ی انرژی جنبشی و نیروهای غیرپایستار در معادله لاگرانژ، مدل دینامیک یک ربات مارمانند با n عضو به صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$M(\theta)\ddot{q} + H(\theta,\dot{\theta}) + F(\theta) = B\tau \qquad (۱۵)$$

$M(\theta)$ ماتریس اینرسی، یک ماتریس مثبت $(n+۲)\times(n+۲)$ و مثبت متقارن است. $H(\theta,\dot{\theta})$ یک ماتریس $(n+۲)\times۱$، شامل عبارت‌های گریز از مرکز و کوریولیس است. $F(\theta)$ یک ماتریس $(n+۲)\times۱$ و مربوط به نیروهای اصطکاک است. B یک ماتریس ثابت $(n+۲)\times(n-۱)$ است. همچنین τ یک ماتریس $(n-۲)\times۱$، شامل گشتاورهای مورد نیاز است. جزئیات ماتریس‌های M، H، B و F در معادله (۱۵) در پیوست الف آورده شده‌اند.

1- Generalized coordinates

۴-۲-۱- دینامیک مستقیم

با داشتن نیروها و یا گشتاورهای اعمالی به مفصل‌های محرک در دینامیک مستقیم هدف به‌دست آوردن مسیر حرکت، سرعت‌ها و شتاب ابزار ربات می‌باشد. رابطه (۱۵) دارای $n+2$ معادله و $n+2$ مجهول است $(\ddot{q}\in R^{n+2})$. با حل این معادله، شتاب زاویه‌ای مطلق همه عضوها $(\ddot{\theta}\in R^{n})$ و همچنین شتاب دم ربات مارمانند $(\ddot{x}_b, \ddot{y}_b)$ را می‌توان به‌دست آورد. با انتگرالگیری از سرعت زاویه‌ای عضوها $(\dot{\theta})$، زاویه مفصل‌ها (θ)، موقعیت (x_b, y_b) و سرعت دم ربات $(\dot{x}_b, \dot{y}_b)$ را می‌توان محاسبه کرد. بنابراین با داشتن گشتاورهای مصرفی، حرکت ربات مار مانند ناشی می‌شود.

۴-۲-۲- دینامیک معکوس

در مدل سازی دینامیک معکوس با دانستن مسیرها، سرعت‌ها و شتاب‌های مربوط به ابزار ربات، نیروها یا گشتاورهای مربوط به مفصل‌های محرک محاسبه می‌شود. در این بخش با داشتن زاویه‌های نسبی، حرکت ربات مار ایجاد می‌شود. به‌عبارت دیگر روشی ارائه می‌شود که به کمک آن بتوان با داشتن زوایای نسبی و مشتقاتش $(\ddot{\varphi},\dot{\varphi},\varphi)$، گشتاورهای مورد نیاز و همچنین مختصات دم ربات مارمانند به‌دست آید[۱۲]. رابطه بین زوایای نسبی و مطلق به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi_i=\theta_{i+1}-\theta_i \tag{16}$$

که در آن $i=1,2,...,n-1$. اگر معادله (۱۶) را به‌صورت ماتریسی نوشته شود؛ در نتیجه:

$$\theta=E\varphi+e\theta_1 \tag{17}$$

که درآن φ یک بردار n بعدی $[\varphi_1,\varphi_2,...,\varphi_{n-1}]$، θ_1 زاویه مطلق عضو دم ربات، E_{ij} و e به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$E_{ij}=\begin{cases}1 & i>j\\ 0 & others\end{cases}\quad, e=[1,1,...,1]^T \tag{18}$$

از طرفی می‌توان معادله (۱۵) را به‌صورت دو معادله (۱۹) و (۲۰) جداسازی کرد.

$$^{p}M(\theta)\ddot{\theta}+^{p}N(\theta)\ddot{r}_b+^{p}H(\theta,\dot{\theta})+^{p}f(\theta)=D\tau \tag{19}$$

$$^{p}M(\theta)\ddot{\theta}+^{q}N(\theta)\ddot{r}_b+^{p}H(\theta,\dot{\theta})+^{q}f(\theta)=0 \tag{20}$$

که در آنها r_b موقعیت دم ربات مارمانند است. با قرار دادن مشتق دوم معادله (۱۷) در معادله (۲۰)، نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned}\ddot{r}_b&=-^{q}N^{-1}(^{q}M\ddot{\theta}+^{q}H+^{q}f)\\&=-^{q}N^{-1q}M(E\ddot{\varphi}+e\ddot{\theta}_1)-^{q}N^{-1}(^{q}H+^{q}f)\end{aligned} \tag{21}$$

حال معادله (۲۱) در معادله (۱۹) قرار می‌گیرد. در نتیجه:

$$(N^{-1}\,{}^{q}M-^{p}M)e\ddot{\theta}_1=(^{p}M-^{p}N^{q}N^{-1q}M)E\ddot{\varphi}$$
$$-^{p}N^{q}N^{-1}(^{q}H+^{q}f)+^{p}H+^{p}f \tag{22}$$

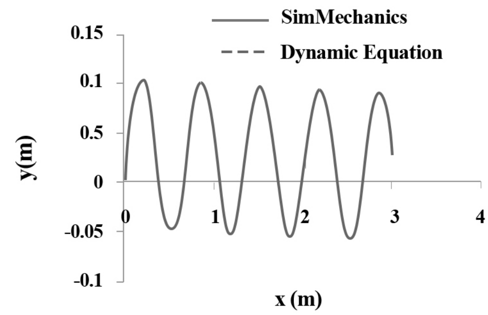
معادله (۲۲) دارای n معادله و n مجهول $(\tau\in R^{n-1},\ddot{\theta}_1\in R)$ است. با حل معادله (۲۲) گشتاور مفصلها (τ_i)، شتاب زاویه‌ای عضو اول $\ddot{\theta}_1$ را می‌توان محاسبه کرد. که با قرار دادن آنها در معادله (۲۱) می‌توان شتاب عضو دم ربات مارمانند یعنی $\ddot{r}_b$ به‌دست آورد. سپس با داشتن این مقادیر می‌توان سرعت زاویه‌ای عضوها $(\dot{\theta})$، زاویه مفصل‌ها (θ)، موقعیت (x_b,y_b) و سرعت دم ربات مارمانند $(\dot{x}_b,\dot{y}_b)$ محاسبه نمود.

۴-۳- تأیید معادلات دینامیک

به منظور بررسی صحت حل معادلات دینامیکی، از نرم‌افزار سیم‌مکانیک نیز استفاده شده‌است. جدول (۱) پارامترهای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مسیر پیموده شده توسط دم ربات، حاصل از حل معادله دینامیکی و همچنین نرم‌افزار سیم‌مکانیک در شکل (۶) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول (۱) پارامترهای شبیه‌سازی.

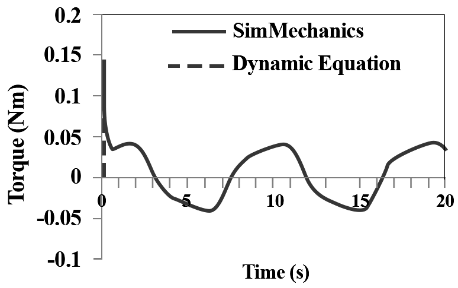
تعداد عضو	$n=16$
جرم عضو	$m=0/01kg$
ضریب اصطکاک عمودی	$C_n=5/5$
ضریب اصطکاک مماسی	$C_t=0/1$
زمان شبیه سازی	$t=20\sec$



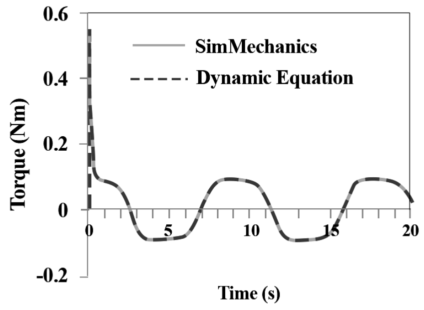
شکل (۶) مسیر پیموده شده دم ربات.

همچنین نتایج حاصل از حل معادلات دینامیکی و نرم‌افزار برای گشتاورهای مورد نیاز در مفصل‌های ۳، ۷، ۹ و ۱۳ در شکل (۷) نشان داده شده‌است. شکل‌ها بیانگر این مطلب هستند که نتایج حاصل از نرم‌افزار سیم‌مکانیک، نتایج حاصل از حل معادلات دینامیکی را تأیید می‌کنند. باید توجه داشت که در شکل‌های زیر $\psi = 0$ است.

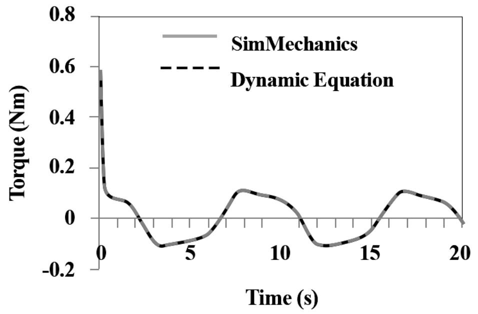
همانطور که در شکل (۷) پیداست، خطای بین منحنی‌های تئوری و سیم‌مکانیک بسیار ناچیز می‌باشد. علت این امر آن است که در نرم افزار سیم‌مکانیک و مدل تئوری از یک مدل اصطکاک، معادله (۷)، استفاده شده است. با توجه به شکل (۷) می‌توان دید که گشتاور مفصل‌ها به‌صورت تناوبی در حال تغییر هستند. مقدار گشتاور در مفصل‌های ۳ و ۱۳ نسبت به گشتاور مفصل‌های ۹ و ۷ دارای مقادیر کمتری هستند. دلیل اختلاف اندازه‌ی گشتاور در میان این مفاصل، فاصله‌ی هرکدام از آن‌ها تا مرکزِ جرمِ کلیِ ربات است. به بیان دیگر مفصل‌هایی که به مرکز جرم کلی ربات مارمانند نزدیک‌ترند، گشتاور بیش‌تری تحمل می‌کنند. همچنین با مقایسه میان گشتاور مفصل‌های قرینه، که به یک نسبت از مرکز جرم فاصله دارند، دیده می‌شود که این گشتاورها از حیث دامنه تقریبا یکسانند (به‌عنوان مثال مفصل‌های ۳ و ۱۳ نسبت به مرکز جرم کلی ربات قرینه‌اند). گشتاورهای نشان داده‌شده در شکل (۷)، در ابتدا با یک نزول آنی مواجه‌اند و سپس به صورت تناوبی تغییر می‌کنند. پیش از شروع حرکت سرپنتین، عضوهای ربات به صورت مستقیم و در راستای یکدیگر قرار دارند. با شروع حرکت، عضوها بلافاصله نسبت به یکدیگر آرایش می‌گیرند تا منحنی سرپنوید را ایجاد نمایند. این تغییر آرایش سریع، نیازمند گشتاور زیادی است. به همین دلیل در شکل (۷)گشتاور مفصل‌ها از مقدار زیادتری شروع می‌شوند.



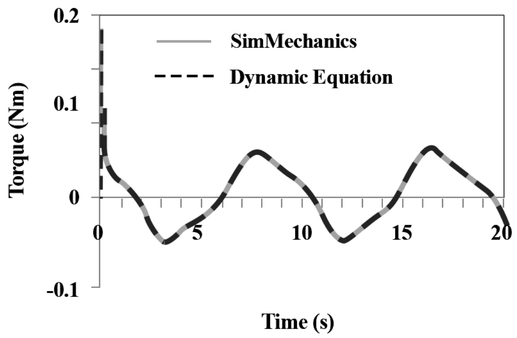
(الف) گشتاور خروجی مفصل ۳.



(ب) گشتاور خروجی مفصل ۷.



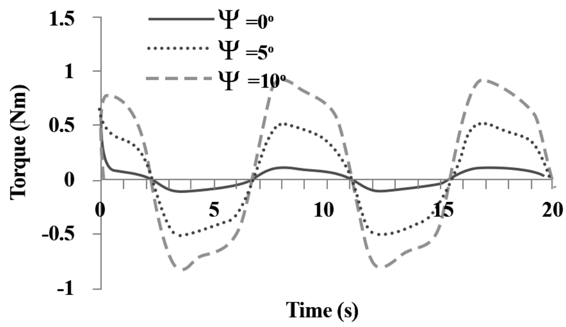
(ج) گشتاور خروجی مفصل ۹.



(د) گشتاور خروجی مفصل ۱۳.

شکل (۷) گشتاور خروجی در مفصل‌های ۳، ۷، ۹ و ۱۳.

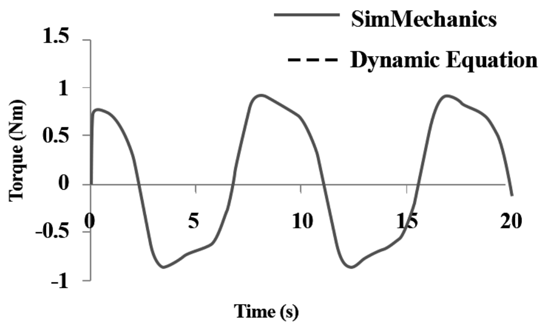
در بسیاری از موارد، ربات مارمانند برای ادامه‌ی حرکت خود ملزم به عبور از سطوح شیبدار خواهد بود. تأثیر زاویه سطح شیبدار، بر نمودار گشتاور مفصل ۹ در شکل (۸) نشان داده شده است. در شکل (۸) دیده می‌شود که با افزایش زاویه سطح شیبدار (Ψ) گشتاور مورد نیاز افزایش می‌یابد.



شکل (۸) تأثیر زاویه سطح شیبدار بر روی گشتاور مفصل ۹

همانطورکه گفته شد برای تصدیق معادلات سینماتیک و دینامیک ربات مارمانند بر روی سطح شیبدار از نرم‌افزار سیم‌مکانیک استفاده شده است. گشتاور مفصل ۹، حاصل از حل معادله‌ی دینامیکی و همچنین نرم‌افزار سیم‌مکانیک در شکل (۹) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. باید توجه داشت که $\psi = ۱۰^\circ$ است. بر روی سطح شیبدار نیز همان نتایج بر روی سطح صاف قابل دسترسی است. به عبارت دیگر مفصل‌هایی که به مرکز جرم کلی ربات مارمانند نزدیک‌ترند، گشتاور بیش‌تری تحمل می‌کنند.

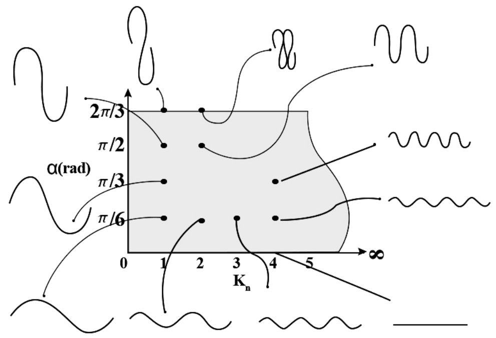
در بخش بعد نشان خواهیم داد که پارامترهای منحنی سرپنوید تأثیر بسزایی در عملکرد ربات مارمانند دارند. بنابراین بایستی در انتخاب این پارامترها دقت فراوان داشت.



شکل۹- گشتاور خروجی مفصل ۹ زمانی که $\psi = ۱۰^\circ$.

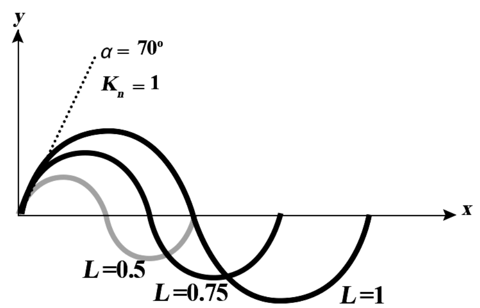
۵-تأثیر زاویه پیچش اولیه (α)، تعداد نوسانات (K_n) و طول ربات (L) بر گشتاور مصرفی و فاصله پیموده شده

مارها انحنای منحنی سرپنوید را با توجه به محیطی که در آن قرار گرفته‌اند تغییر می‌دهند. با توجه به معادله (۱) تنها پارامترهایی که بر انحنای منحنی سرپنوید تأثیر مستقیم دارند، زاویه پیچش اولیه (α)، تعداد نوسانات (K_n) و طول ربات (L) است. لذا ضروریست تا تأثیر هر کدام از این پارامترها بر گشتاور مفصل‌ها و فاصله پیموده شده بررسی شود. نکته دیگر اینست که α و K_n شکل ربات را تغییر می‌دهند اما پارامتر L تنها طول ربات را تغییر می‌دهد و بر روی شکل ربات تأثیری ندارد. بر اساس شکل (۱۰) می‌توان مشاهده کرد که تغییر در زاویه پیچشی (α) هم بر ارتفاع منحنی سرپنوید (اندازه در راستای محور y) و هم بر عرض (باز شدگی در راستای محور x) آن تأثیرگذار است. ولی بر اساس شکل (۱۱)، تغییر در تعداد موج (K_n) تنها بر ارتفاع منحنی تأثیرگذار است و تأثیری بر عرض منحنی ندارد.



شکل (۱۰) تأثیر زاویه پیچشی اولیه و تعداد موج بر منحنی سرپنوید

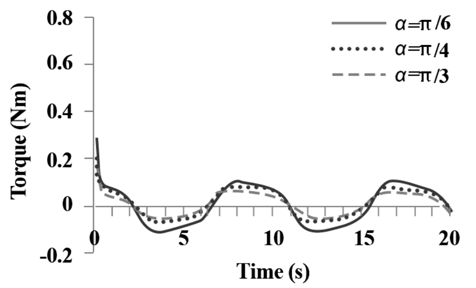
با توجه به شکل (۱۱) تغییر L اندازه منحنی را زیاد یا کم می‌کند و بر شکل منحنی تأثیر نمی‌گذارد.



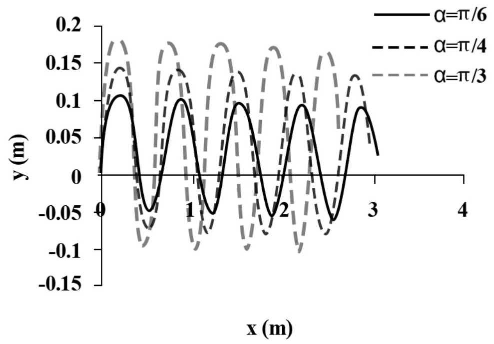
شکل (۱۱) منحنی سرپنوید در مختصات کارتزین و تأثیر L براین منحنی

تغییرات نمودار گشتاور مفصل ۹ به ازای تغییرات زاویه‌ی پیچش اولیه در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است. با توجه به این شکل، با افزایش زاویه پیچش اولیه، گشتاور لازم در مفصل کاهش می‌یابد. در شکل (۱۳) مسیر حرکت دم ربات مارمانند به‌ازای تغییرات زاویه‌ی پیچش اولیه رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با افزایش زاویه

پیچش اولیه میزان پیش‌روی کاهش می‌یابد. منظور از پیش‌روی، فاصله پیموده شده توسط ربات مارمانند در جهت محور x می‌باشد.

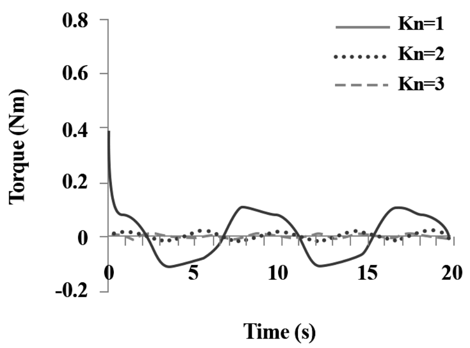


شکل (۱۲) تأثیر زاویه پیچش اولیه بر روی گشتاور مفصل ۹.



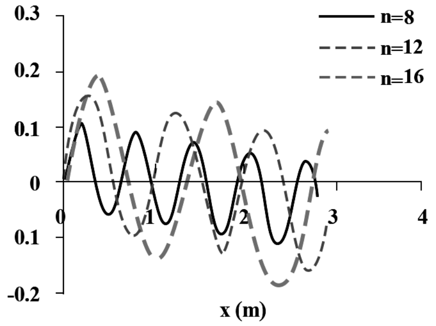
شکل (۱۳) تأثیر زاویه پیچش اولیه بر روی مسیر پیموده شده دم ربات.

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب تأثیر افزایش نوسانات بر روی گشتاور لازم در مفصل ۹ و میزان پیش‌روی ربات، نشان داده شده‌است. با افزایش تعداد نوسانات، گشتاور و میزان پیش‌روی نیز کاهش می‌یابند.



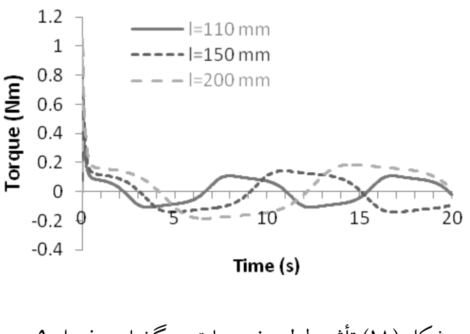
شکل (۱۴) تأثیر تعداد نوسانات بر روی گشتاور مفصل ۹.

در رابطه (۳)، مقدار پارامتر n به منزله‌ی تعداد عضوهای استفاده شده در ربات است. بدیهی است که با ثابت نگه داشتن طول عضوها و افزایش تعداد آن‌ها، طول ربات افزایش می‌یابد و در نتیجه، فاصله پیموده شده نیز افزایش خواهد یافت. در شکل (۱۶) مسیر دم ربات به ازای تعداد عضوهای مختلف نشان داده شده‌است. با توجه به شکل، با افزایش تعداد عضوها پیش‌روی ربات به سمت جلو افزایش می‌یابد و همچنین افزایش گشتاور مورد نیاز در مفاصل را به همراه خواهد داشت؛ زیرا هرچه تعداد عضوها افزایش یابد، وزن و همچنین نیروی اصطکاک وارده بر ربات افزایش می‌یابد، که خود افزایش گشتاور را به دنبال دارد(شکل ۱۷). توجه داشته باشید که به ازای تعداد عضوهای مختلف، همواره مشخصات یک عضو اعم از وزن و اندازه یکسان است. همچنین منظور از پیش روی، فاصله پیموده شده توسط ربات مارمانند در جهت محور x می‌باشد.



شکل (۱۶) تأثیر تعداد عضو بر روی مسیر پیموده شده توسط دم ربات.

حالتی را در نظر بگیرد که در آن با ثابت بودن وزن عضو، در طول آن تغییر داده شود. نتیجه‌ی شبیه‌سازی در شکل (۱۸) نشان می‌دهد که با افزایش طول عضوهای ربات، گشتاور مورد نیاز در مفصل‌ها افزایش خواهد یافت. نتایج این شکل مربوط به مفصل ۹ است.



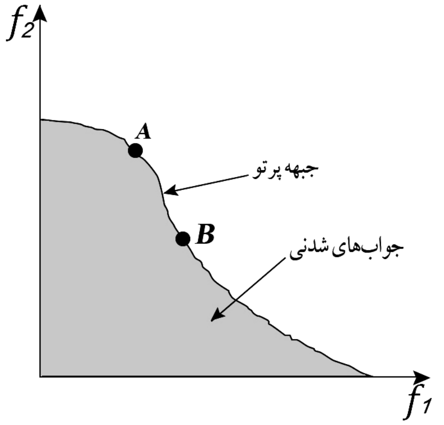
شکل (۱۸) تأثیر طول عضو ربات بر گشتاور مفصل ۹.

لذا انتخاب مناسب پارامترهای منحنی سرپنوید از اهمیت خاصی برخوردار است و می‌تواند عملکرد ربات مارمانند را به‌طور محسوسی افزایش دهد.

۶- بهینه‌سازی چندهدفه‌ی حرکت سرپنتین با منحنی سرپنوید نامتقارن

همان‌طورکه در بخش‌های پیشین مقاله ذکر شد، پارامترهای متعددی در نحوه‌ی عملکرد ربات‌مارمانند مؤثرند. هدف اصلی در طراحی یک ربات، استفاده‌ی بهینه از امکانات موجود است. در مورد ربات مارمانند، طرحی ایده‌ال خواهدبود که به ازای گشتاور کم در مفصل‌ها، بیش‌ترین پیش‌روی حاصل گردد. به بیان دیگر ایده‌ال طراح با برآورده شدن دو هدف (۱) حداقل گشتاور در مفصل‌ها و (۲) بیش‌ترین پیش‌روی، میسر خواهد شد و این خود مستلزم بهینه‌سازی چندهدفه است. در این مقاله، بهینه‌سازی چندهدفه توسط الگوریتم تکاملی ژنتیک انجام شده‌است. الگورتیم ژنتیک، روشی تکاملی، الهام گرفته از طبیعت است که برای اولین بار توسط هلند ابداع شد. در بیشتر مواقع الگوریتم ژنتیک چندهدفی، با عنوان الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه، شناخته می‌شوند[۱۵-۲۰]. عموما دو روش برای مواجه با مسائل بهینه‌سازی چندهدفی وجود دارد: (۱) ترکیب هدف‌ها به منظور تبدیل مسئله به تنها یک هدف، مانند انتخاب مجموع تابع هدف‌های وزن داده شده به عنوان تابع هدف نهایی. (۲) به‌دست آوردن راه‌حل‌های غیرمغلوب بهینه‌ی پرتو[۱]. در این مقاله جواب‌های بهینه در غالب راه‌حل‌های بهینه‌ی جبهه پَرِتو ارائه شده‌اند. یکی از ساده‌ترین مثال‌ها برای بیان مقدماتی از جبهه پرتو به صورت زیر قابل بیان است[۲۱]:

فرض کنید مسئله‌ای دارای دو خروجی f_1 ، f_2 است. جواب‌های شدنی و جبهه پرتو برای این مسئله در شکل (۱۹) نشان داده شده‌است (منظور از جواب‌های شدنی در پیوست ب آورده شده است). جبهه‌ی پرتو زیر مجموعه‌ای از جواب‌های شدنی است که در آن به صورت همزمان تابع f_1 ، f_2 بهینه هستند. هر نقطه از این جبهه دارای یک مقدار برای تابع f_1 و یک مقدار برای تابع f_2 است. انتخاب از میان نقاط روی جبهه پرتو برعهده‌ی تصمیم‌گیرنده است. اگر تصمیم‌گیرنده نقطه‌ی A را انتخاب نماید، اهمیت بیشتری برای سهم f_2 نسبت به f_1 در جبهه پرتو در نظر گرفته است. همچنین به صورت مشابه اگر تصمیم‌گیرنده نقطه‌ی B را انتخاب نماید، اهمیت بیشتری برای سهم f_1 نسبت به f_2 در جبهه‌ی پرتو در نظر گرفته است. از مزایای ایجاد جبهه‌ی پرتو این است که تصمیم‌گیرنده به صورت همزمان می‌تواند تمام نقاط بهینه را رؤیت نماید و از میان آنها مجموعه‌ای از جواب‌ها را انتخاب نماید.



شکل (۱۹) نمایش جواب‌های شدنی و جبهه‌ی پرتو.

۶-۱- مسئله بهینه‌سازی حرکت ربات مارمانند

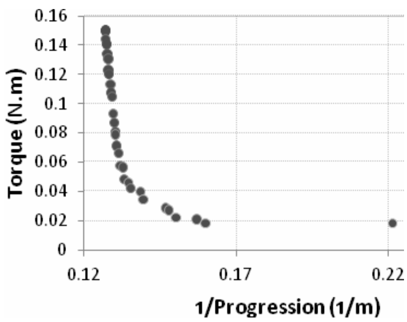
همانطور که قبلاً اشاره شد، در این مقاله قصد داریم تا پیش از ساخت ربات مارمانند برای حرکت سرپنتین، پارامترهای مؤثر در این حرکت به گونه‌ی انتخاب شوند که بیشترین پیش‌روی در ازای کمترین گشتاور لازم در مفصل‌ها، اتفاق بیفتد. لذا همین مسئله نشان‌دهنده نیاز به استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه است. پارامترهای تأثیرگذار در این حرکت به علاوه‌ی بازه‌ی تغییرات آن‌ها برای بهینه‌سازی چندهدفی به صورت جدول (۲) انتخاب شده‌اند:

جدول (۲) لیست متغیّرهای بهینه‌سازی چندهدفه در حرکت سرپنتین.

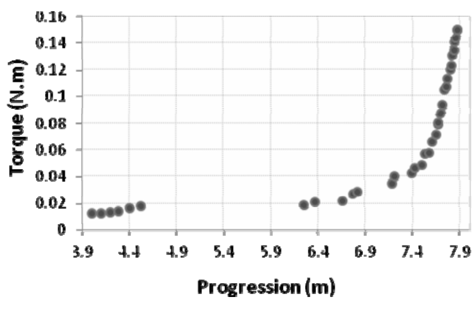
پارامترهای تأثیرگذار در حرکت سرپنتین نامتقارن	بازه‌ی تغییرات
تعداد عضوهای ربات (n)	۵ الی ۱۶
تعداد نوسانات منحنی سرپنوید (k_n)	[۱,۳]
زاویه‌ی پیچش اولیه (α) بر حسب رادیان	$[\frac{\pi}{6},\frac{\pi}{2}]$
طول عضوها (l) بر حسب متر	$[0/08,0/15]m$
ضریب نامتقارن (k_{unsym})	$[-6,6]$

1- Non-dominated Pareto optimal solution

در بهینه‌سازی چندهدفه‌ی این مقاله، NSGA[1] با تعداد جمعیت ۱۰۰ استفاده شده‌است [۲۰]. در جبهه‌ی پَرِتو، ۳۵ جواب بهینه قرار دارد. این مجموعه در شکل (۲۰) نشان داده شده‌است. از آن‌جا که الگوریتم ژنتیک به کار رفته تابع برازندگی را مینیمم می‌کند، در این شکل معکوس پیش‌روی مینیمم شده‌است. هنگامی که جبهه‌ی پَرِتو دارای پراکندگی مناسبی در دو تابع هدف باشد، فرایند انتخاب توسط تصمیم‌گیرنده، تسهیل می‌شود. همچنین پیوستگی جبهه پَرِتو بیانگر مرغوبت مجموعه جواب‌های بهینه‌ی پَرِتو است. در شکل (۲۰)، جبهه‌ی پَرِتو دارای پراکندگی مناسبی در دو تابع هدف است، اما پیوستگی این جبهه مناسب نیست که این از خصوصیات رفتاری مسئله‌ی تحت بهینه‌سازی می باشد. در شکل (۲۱) همان نتایج بهینه‌سازی شکل (۲۰) نشان داده شده است با این تفاوت که جبهه‌ی پَرِتو برای کمترین گشتاور و بیش‌ترین پیش‌روی نمودار شده‌است.



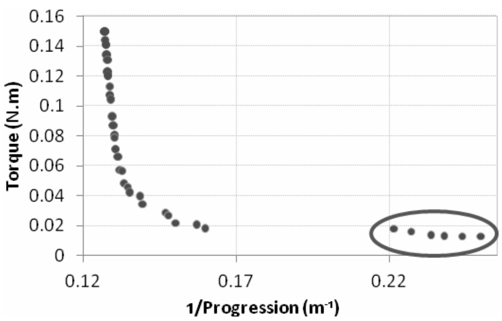
شکل (۲۰) نمایش راه‌حل‌های جبهه‌ی پَرِتو در بهینه‌سازی چندهدفه.



شکل (۲۱) نمایش راه‌حل‌های جبهه‌ی پَرِتو در بهینه‌سازی چندهدفه (بیش‌ترین پیش‌روی و کمترین گشتاور).

1- Non-dominated Sorting Algorithm

پس از مشاهده جواب‌های جبهه‌ی پَرِتو، در نهایت تصمیم‌گیرنده از میان جواب‌های بهینه‌ی جبهه‌ی پَرِتو، جواب نهایی را انتخاب می‌کند. وجود جبهه پَرِتو باعث ایجاد یک دید جامع در تصمیم‌گیرنده برای انتخاب بهترین جواب می‌شود. با توجه به مقالات پیشین [۱۰- ۱۴ و ۲۲]، از میان ۳۵ جواب بهینه‌ی حاصل شده از روش جبهه‌ی پرتو، ۶ جواب انتخاب شده است که در شکل (۲۲) نشان داده شده‌اند. در تمامی این انتخاب‌ها تعداد عضوهای بهینه‌ی انتخاب‌شده برای ربات با ۵ عضو است. در جدول ۳، پارامترهای مربوط به ۶ انتخاب متمایز شده‌ی شکل (۲۲) آورده شده است.



شکل (۲۲) انتخاب اعضایی از جبهه‌ی پَرِتو با کمترین گشتاور.

با توجه به جواب‌های حاصل شده از بهینه‌سازی چندهدفی، بازه‌ی تغییرات پارامترهای موثر در حرکت سرپنتین به صورت جدول (۴) ارائه شده اند. بازه تغییرات در جدول (۴)، بر مبنای بازه تغییرات در نظر گرفته شده در جدول (۲)، بهینه شده است.

جدول (۴) نشان می‌دهد که دستیابی به پیش‌روی ماکزیمم و گشتاور مینیمم در دامنه محدودی برای k_n، α و k_{unsym} اتفاق می‌افتد. برای مثال برای تعداد عضو مختلف (یعنی ۵ الی ۱۶ عضو) بهتر است که برای افزایش عملکرد ربات مقدار k_n بین ۱/۳۵ و ۱/۸۴ انتخاب شود. علت این امر آنست که، افزایش این پارامتر مسافت پیموده شده و گشتاور مصرفی را کاهش می‌دهد. همانطور که از جدول (۳) پیداست k_{unsym} مخالف صفر می‌باشد. به عبارت دیگر عملکرد ربات‌های مارمانند در حالتی که از منحنی سرپنوید نامتقارن استفاده شود، بهبود می‌یابد، زیرا این منحنی شباهت بیشتری به حالت طبیعی حرکت مار دارد که مطمئناً در عملکرد ربات مارمانند موثر است.

جدول (۳) شش عضو از جبهه‌ی پَرِتو با کمترین گشتاور.

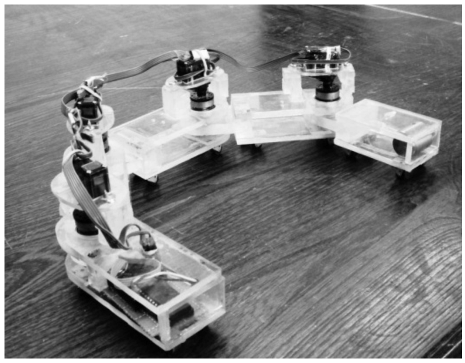
ردیف	مینیمم گشتاور (N.m)	ماکزیمم پیش‌ظروی (m)	k_{unsym}	طول عضوها $l\,(m)$	$\alpha\,(rad)$	k_n	تعداد عضو N
۱	۰/۰۱۲۷	۴/۰۰۵۸	۰/۶۷۵۰	۰/۱۰۴۷	۰/۵۳۶	۱/۷۱	۵
۲	۰/۰۱۲۹	۴/۱۰۳۷	۰/۶۷۴۹	۰/۱۰۴۸	۰/۵۳۳	۱/۷۰	۵
۳	۰/۰۱۳۳	۴/۲۰۴۰	۰/۶۷۷۱	۰/۱۰۴۸	۰/۵۳۲	۱/۶۸	۵
۴	۰/۰۱۳۹	۴/۲۸۱۷	۰/۶۶۸۷	۰/۱۰۵۸	۰/۵۳۵	۱/۶۷	۵
۵	۰/۰۱۶۲	۴/۴۰۵۴	۰/۶۴۹۲	۰/۱۱۵۴	۰/۵۶۵	۱/۶۳	۵
۶	۰/۰۱۸۰	۴/۵۱۹۸	۰/۶۶۲۳	۰/۱۳۱۹	۰/۵۶۲	۱/۶۲	۵

جدول (۴) بازه‌ی تغییرات پارامترهای موثر در حرکت ربات به ازای راه‌حل‌های بهینه‌ی جبهه‌ی پَرِتو.

پارامترهای موثر در حرکت سرپنتین	تعداد عضو n	k_n	$\alpha(rad)$	$l\,(m)$	k_{unsym}
بازه‌ی تغییرات پارامترها در جبهه‌ی پَرِتو	۵–۱۶	[۱/۳۵,۱/۸۴]	[۰/۵۳,۰/۷۰]	[۰/۰۸,۰/۱۳]	[۰/۲۹,۰/۶۸]

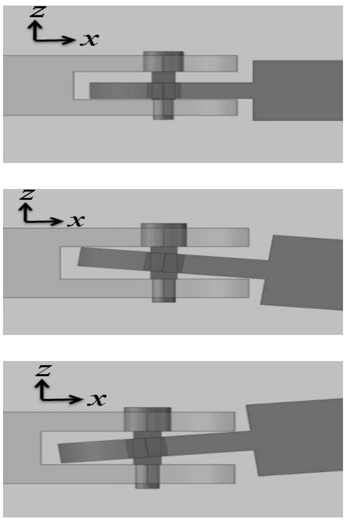
۸–ربات مارمانند FUM- Snake I[1]

ربات نشان داده شده در شکل (۲۳)، با نام FUM-Snake I از اولین نسل ربات‌های مارمانند است که در گروه رباتیک دانشگاه فردوسی مشهد طراحی و ساخته‌شده است. برای مدل‌سازی حرکت سرپنتین در زیر هر عضو، چهار چرخ تعبیه گشته است. طول هر عضو ربات $110\ mm$ و وزن هر عضو $80\ gr$ است. هر عضو دارای عرض و ارتفاعی به ترتیب $40\ mm$ و $30\ mm$ است.



شکل (۲۳) ربات مارمانند FUM- Snake I.

برای سازگارتر ساختن ربات در محیط‌هایی با سطوح نسبتا ناهموار، در طراحی مفاصل مقداری لقی لحاظ شده‌است. این طراحی در شکل (۲۴) آمده‌است. در این شکل، راستای محور z، راستایی عمود بر سطح افق است.



شکل (۲۴) فاصله ایجاد شده در مفصل عضوها.

در شکل (۲۵) نمایش پیش‌روی ربات FUM-Snake I در حال حرکت به‌صورت سرپنتین عکس‌برداری شده‌است.

مسیر ربات مارمانند FUM-SnakeI در دو حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در شکل (۲۶) نمایش داده شده است. یکی از علت‌های تفاوت بین این دو مسیر را می‌توان در مدل اصطکاک مورد استفاده دانست که مطمئناً با حالت آزمایشگاهی تفاوت دارد. علت دیگر را می‌توان در نظر نگرفتن اصطکاک بین مفصل‌ها، گیربکس دانست. بنابراین با توجه به نزدیک بودن مسیر پیموده شده توسط دم ربات در آزمایش و شبیه سازی، معادلات دینامیکی ارائه شده قابل قبول می‌باشند.

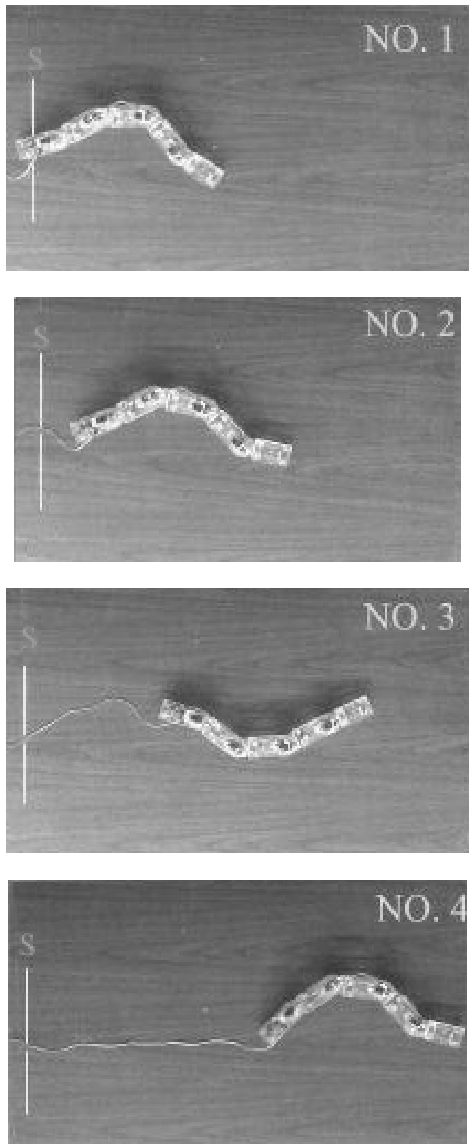
1- Ferdowsi University of Mashhad Snake Robot

۹- جمع بندی و نتیجه گیری

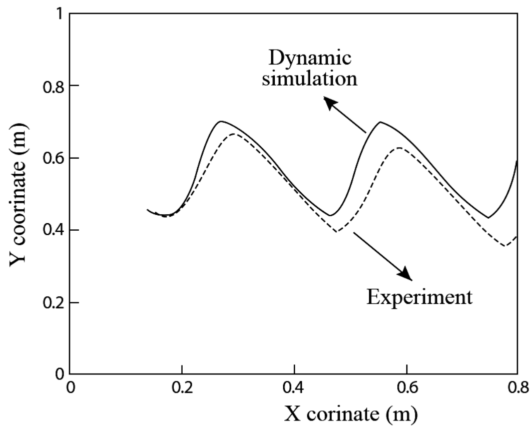
در این مقاله حرکت سرپنتین ربات مار مانند با استفاده از دو منحنی سرپنوید متقارن و نامتقارن برای ایجاد حرکت سرپنتین مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات سینماتیک و دینامیکی حاکم بر ربات، به کمک روش لاگرانژ در حالت کلی (یعنی بر روی سطوح شیبدار و صاف) استخراج شده‌اند. برای تصدیق معادلات دینامیکی از نرم‌افزار سیم‌مکانیک استفاده گشته است. نتایج نشان می‌دهند که میزان پیش‌روی و گشتاور مفاصل ربات بر روی سطوح شیبدار و صاف در معادلات دینامیکی و نرم‌افزار سیم‌مکانیک از تطابق بسیار خوبی برخوردارند. در این مقاله، اصطکاک به صورت ویسکوز در نظر گرفته شده است.

تأثیر پارامترهای منحنی سرپنوید بر عملکرد ربات با استفاده از معادلات دینامیکی از دیگر موارد مورد بررسی در این تحقیق می باشد. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب صحیح این پارامترها، تأثیر بسزایی در میزان گشتاور لازم در مفصل‌های ربات و میزان پیش‌روی آن دارند. انتخاب پارامترهای مناسب در منحنی سرپنوید می‌تواند جبران کننده‌ی افزایش گشتاور لازم در مفصل‌ها، برای حرکت در سطوح شیبدار باشد. بر طبق نتایج شبیه‌سازی:

- گشتاور مورد نیاز در مفاصل با نزدیک شدن به مرکز جرم ربات مارمانند افزایش می‌یابد.
- مقدار گشتاورهای مفصل‌های قرینه نسبت به مرکز جرم دارای دامنه یکسان بوده و فقط دارای فاز حرکتی متفاوت می‌باشند.
- با افزایش زاویه سطح شیبدار گشتاور ورودی مورد نیاز افزایش می‌یابد.
- با افزایش زاویه پیچش اولیه، گشتاور ورودی مورد نیاز و پیشروی ربات کاهش می‌یابند.
- با افزایش تعداد نوسانات، گشتاور مصرفی و پیشروی ربات کاهش می‌یابند.
- با افزایش طول عضوها، گشتاور مورد نیاز افزایش می یابد.
- با افزایش تعداد عضوها، پیشروی ربات و گشتاور مصرفی افزایش می‌یابند.



شکل (۲۵) حرکت سرپنتین ربات مارمانند بر روی سطح صاف.



شکل (۲۶) مقایسه بین مسیر پیموده شده توسط دم ربات در آزمایش و شبیه‌سازی بر روی سطح صاف.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، برای افزایش عملکرد ربات مارمانند نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای منحنی سرپنوید می‌باشد. لذا در این مقاله بهینه‌سازی پارامترهای منحنی سرپنوید نامتقارن به علت شباهت بیشتر به حالت طبیعی حرکت مار، مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به کمترین گشتاور لازم در مفصل‌ها و بیشترین میزان پیش‌روی ربات، از روش بهینه‌سازی چندهدفه‌ی الگوریتم ژنتیک (NSGA) استفاده شده است. یکی از نتایج بسیار جالب این بهینه‌سازی آن است که پیش‌روی ماکزیمم و گشتاور مینیمم برای تعداد عضو متفاوت در دامنه محدودی برای k_n، α و k_{unsym} اتفاق می‌افتد. برای آزمایش و تصدیق معادلات حاکم بر روی سطح صاف ربات FUM-Snake I استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که پیش‌روی ربات با پیش‌روی پیش‌بینی شده حاصل از حل معادلات دینامیکی، بر روی سطح صاف تطابق مناسبی دارند. علاوه بر مطالب فوق، با توجه به انطباق مسیر پیموده شده توسط دم ربات در آزمایش و شبیه‌سازی، می‌توان گستره‌ی وسیعی از مسائل مربوط به ربات مارمانند را با استفاده از معادلات دینامیکی ارائه شده، حل نمود. همچنین این مطالعه نشان می‌دهد که به‌کمک منحنی سرپنوید نامتقارن می‌توان به منحنی‌هایی که به بدن مار شبیه‌تر باشند نیز دست یافت و در نتیجه عملکرد ربات را افزایش داد.

مراجع

[1] Hirose S., Biologically Inspired Robots (Snake-like Locomotor and Manipulator), Oxford University Press ,1993.

[2] Saito M., Fukaya M., Iwasaki T.,Serpentine locomotion with robotic snakes, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 22, 2002, pp. 64–81.

[3] Andreas Transeth A., Modelling and Control of Snake Robots, Ph.D. Dissertation, Trondheim, 2007.

[4] Andreas Transeth A., Ytterstad Pettersen K., Liljebäck P., A survey on snake robot modeling and locomotion, *Robotica*, Vol. 27, ,2009, pp. 999–1015 .

[5] Vossoughi Gh., Pendar Ho., Heidari Z., Mohammadi S., Assisted passive snake-like robots: conception and dynamic modeling using Gibbs–Appell method, *Robotica*, Vol. 26, 2008, pp. 267–276.

[6] Spranklin B. W., Design, Analysis and fabrication of a snake- inspired robot with a rectilinear gait, Master of Science Thesis, University of Maryland,2006.

[7] Liljebäck P., Stavdahl O., Pettersen K. Y., *Modular pneumatic snake robot: 3D modelling, implementation and control*, Proc. 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic ,2005.

[8] Ye Ch., Ma Sh., Li B., *Development of a 3D Snake-like Robot Perambulator-II: Design and Basic Experiments*, Proc. 2007 IEEE Int. Conf. on Intelligent Mechatronics and Automation (ICMA2007), 2007.8, pp. 117-122, Harbin, Heilongjiang, China.

[9] Crespi A. , Ijspeert A. J., Online Optimization of Swimming and Crawling in an Amphibious Snake Robot, *IEEE Transactions of Robotics*, Vol. 24, No. 1, 2008.

[10] Hasanzadeh Sh., Akbarzadeh A., Ground adaptive and optimized locomotion of snake robot moving with a novel gait, *Auton Robot*. Vol. 28, 2010, pp. 457–470.

[11] Hasanzadeh Sh., Akbarzadeh Tootoonchi A., *Adaptive Optimal Locomotion of Snake Robot Based on CPG-Network Using Fuzzy Logic Tuner*, IEEE - CIS RAM,2008 , 2008-09-22.

[12] Kalani H., Akbarzadeh A., Design and Modeling of a Snake Robot Based on Worm-Like Locomotion, Accepted, *Advance Robotics.*

[13] Kalani H., Akbarzadeh A., Safehian J., *Traveling Wave Locomotion of Snake Robot along Symmetrical and Unsymmetrical body shapes*, ISR-Robotik, Munich, Germany,2010.

[14] Safehian J., kalani H., Akbarzadeh A., *A Novel Kinematics Modeling Method for Snake Robot in Traveling wave Locomotion*, ASME, Turkish ,2010.

[15] Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D., *A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization*, NJ:IEEE World Congress on Computational Intelligence, IEEE, 1994, p. 82–7.

[16] Fonseca C.M., Fleming P.J., *Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization* , Proceedings of the fifth international conference on genetic algorithms, San Mateo California, 1993, pp. 416–23.

[17] Deb K., Agarwal S., Pratap A., Meyarivan T., A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II., KanGAL report number 2001. Kanpur, India: Indian Institute of Technology; 2000.

[18] Deb K., Agarwal S., Pratap A., Meyarivan T., *A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II.*, Proceedings of the parallel problem solving from nature VI conference, Paris, France. 2000, pp. 849–58.

[19] Schaffer J., *Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. Genetic algorithms and their applications,* proceedings of the first international conference on genetic algorithms. Hillsdale, NJ. 1985. pp. 93–100.

[20] Srinivas, Deb A. , Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms,. *Journal Evol. Comput*., Vol. 2(3):, 1994 , pp. 221–48 1994.

[21] Eckart Zitzler, Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications, Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 1999.

[22] Kalani H., Akbarzadeh A., Bahrami H., Application of Statistical Techniques in Modeling and Optimization of a Snake Robot, *Robotica*, published online: November 2012 , pp.1–19 .

پیوست الف:

جزئیات ماتریس‌های M، H، B و F در معادله (۱۵) برای یک ربات مارمانند n عضوی و بر روی سطح شیبدار در حرکت سرپنتین به‌صورت زیر می‌باشد.

$$M = \begin{bmatrix} p_{M_{n\times n}} & p_{N_{n\times 2}} \\ q_{M_{2\times n}} & q_{N_{2\times 2}} \end{bmatrix}$$

$$p_{M_{ij}} = \begin{cases} \left[m_j d_j l_j + \left(\sum_{k=j+1}^{n} m_k \right) l_i l_j \right] \cos(\theta_i - \theta_j) & i < j, 1 \le j \\ l_i + m_i d_i^2 + l_i^2 \left(\sum_{j=i+1}^{n} m_j \right) & i = j, 1 \le j \le n \\ p_{M_{ji}} & i > j\ 1 \le j \le n \end{cases}$$

$$q_N = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} m_i & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^{n} m_i \end{bmatrix}, \quad p_N = q_M{}^T$$

$$q_{M_{2,j}} = \cos\theta_j \left[m_j d_j + \left(\sum_{k=j+1}^{n} m_k \right) l_i \right] \quad for\ (j = 1, 2, \ldots, n)$$

$$q_{M_{1,j}} = -\sin\theta_j \left[m_j d_j + \left(\sum_{k=j+1}^{n} m_k \right) l_i \right] \quad for\ (j = 1, 2, \ldots, n)$$

$$H = \begin{bmatrix} p_{H_{n\times 1}} \\ q_{H_{2\times 1}} \end{bmatrix}$$

$$p_H = l_i \sum_{j=i+1}^{n} \left\{ \left[m_j d_j + l_j \left(\sum_{k=j+1}^{n} m_k \right) \right] \sin(\theta_i - \theta_j) \dot{\theta}_j^2 \right\}$$
$$+ \sum_{j=1}^{i-1} \left\{ \left[m_j d_j + l_j \left(\sum_{k=i+1}^{n} m_k \right) \right] l_j \sin(\theta_i - \theta_j) \dot{\theta}_j^2 \right\} \quad (i = 1, 2, \ldots, n)$$

$$q_H = \begin{bmatrix} -\sum_{i+1}^{n} \cos\theta_i \left[m_i d_i + \left(\sum_{k=i+1}^{n} m_k \right) l_i \right] \dot{\theta}_i^2 \\ -\sum_{i+1}^{n} \sin\theta_i \left[m_i d_i + \left(\sum_{k=i+1}^{n} m_k \right) l_i \right] \dot{\theta}_i^2 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} p_{f_{n\times 1}} \\ q_{f_{n\times 1}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} D_{n\times n-1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_{ij} = \begin{cases} -1 & i = j \\ 1 & i = j+1 \\ 0 & others \end{cases}$$

$$p_{f_i} = d_j (f_{xj} \sin\theta_j - f_{yj} \cos\theta_j)$$
$$+ l_j \left[\sin\theta_j \sum_{i=j+1}^{n} (f_{xi}) - \cos\theta_j \sum_{i=j+1}^{n} (f_{yj}) \right]$$

$$q_f = \begin{vmatrix} -\sum_{i=1}^{n} (f_{xi}) \\ -\sum_{i=1}^{n} (f_{yi}) \end{vmatrix}$$

پیوست ب:

فرض کنید که تابع‌های f_1 و f_2 به‌صورت زیر قابل تعریف باشند:

$$f_1 = f_1(x_1, x_2, x_3)$$

$$f_2 = f_2(x_1, x_2, x_3)$$

در حل به روش NSGA، ابتدا بازه‌ی تغییرات متغییرهای x_1، x_2 و x_3 تعیین می‌شوند. سپس مقادیری از دو تابع f_1 و f_2 که به ازای بازه‌ی مشخص متغییرهای x_1، x_2 و x_3 به‌دست می‌آیند، جواب‌های شدنی دو تابع f_1 و f_2 گفته می‌شوند.