

طراحی، ساخت و کنترل ربات عبور کننده از پله‌ها و موانع (MSRox)

مجید محمدی مقدم^{1*}، محسن مرادی دالوند²

1- استادیار بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

2- دانشجوی کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی 14115-143

mogaddam@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: شهریور 1382، پذیرش مقاله: فروردین 1384)

چکیده - MSRox یک ربات متحرک چرخ دار است که دو درجه آزادی در سیستم ربات‌های متحرک دارد. این ربات علاوه بر توانایی حرکت سریع و یکنواخت بر روی سطوح صاف، مقعر، محدب و شیبدار - که بر اثر حرکت بر روی چرخها وجود می‌آید - توانایی عبور از پله‌ها و موانع با سرعت و یکنواختی خوب و همچنین انعطاف‌پذیری نسبت به سطوح مقعر، محدب و شیبدار را دارد که در اثر حرکت بر روی ستاره-چرخهایش به وجود می‌آید.

این ربات که 450 قطعه مختلف دارد، با طول 82/9، و پهنای 54/1 و ارتفاع 29/2 سانتیمتر برای عبور از پله‌هایی با ارتفاع 10 و عمق 15 سانتیمتر طراحی شده است. این ربات با همین ابعاد توانایی عبور از پله‌هایی با حداقل ارتفاع 17 سانتیمتر و با عمق نامحدود را نیز دارد. در این مقاله نتایج حاصل از طراحی و مدل‌سازی کامپیوتری ربات همراه با سیستمهای حرکتی و قابلیتهای مختلف MSRox توضیح داده می‌شود نتایج آزمایشگاهی حاصل از عبور MSRox از پله‌های مختلف و مقایسه آنها با ربات‌هایی که تاکنون در دنیا به منظور عبور از پله‌ها و موانع ساخته شده، بررسی می‌شود.

کلید واژگان: ربات متحرک، عبور کننده از پله و مانع چرخ دار.

به کارگیری در محیط‌های مختلف با شرایط گوناگون محیطی، طبیعی به نظر می‌رسد. اصلی‌ترین مشکل و محدودیتی که برای اینگونه ربات‌ها وجود دارد، عبور از موانع طبیعی و غیرطبیعی در شرایط گوناگون است. پله عمومی‌ترین مانع موجود در محیط زندگی انسان است که حرکت ربات‌ها را دچار مشکل می‌کند. تاکنون ربات‌های متحرکی که قابلیت عبور از پله‌ها و موانع را داشته باشند ساخته شده است که حرکت بر روی پها دارند. که این نوع حرکت، حرکت یکنواخت و خوبی برای سطوح

1- مقدمه

ربات‌های متحرک کاربردهای بسیار و متنوعی در زندگی انسان دارند که از آن میان می‌توان به استفاده در صندلیهای چرخ دار برای جابه‌جایی افراد معلول و ناتوان، استفاده در تحقیقات فضایی به عنوان فضانورد، شناسایی مناطق جنگی و استفاده در محیط‌هایی که دارای اشعه رادیو اکتیو و بسیاری کاربردهای دیگر اشاره کرد. با توجه به مطالب ذکر شده، اهمیت این‌گونه ربات‌ها روشن است و سعی بر کاملتر کردن فناوری آنها و بالا بردن تواناییهای آنها برای

طراحی شده و همچنین چهار ستاره-چرخ (شکل 2) دارد که برای عبور از پله‌ها و موانع و داشتن انعطاف پذیری نسبت به سطوح مقعر، محدب و شیبدار طراحی شده است.



شکل 1 MSRox 1



شکل 2 ستاره-چرخ

هر ستاره-چرخ دو محور دارد که یکی از آنها مربوط به چرخش چرخهای معمولی ربات برای حرکت بر روی سطوح صاف، مقعر، محدب و شیبدار و دیگری مربوط به چرخش ستاره-چرخهای ربات برای عبور از پله‌ها و موانع و داشتن انعطاف پذیری نسبت به سطوح مقعر، محدب و شیبدار است.

صاف نیست. همچنین ربات‌های چرخ داری نیز برای عبور از پله‌ها ساخته شده که قابلیت عبور از تنها یک پله را داشته‌اند؛ بنابراین ضرورت طراحی و ساخت رباتی که علاوه بر داشتن توانایی عبور از پله‌ها و موانع با سرعت و یکنواختی بالا، قابلیت حرکت یکنواخت و البته سریع در سطوح صاف را باشد، کاملاً احساس می‌شود.

بوهلرا¹ ربات متحرک شش پایی به نام RHex ساخته است که توانایی عبور از پله‌ها را دارد او همچنین ربات متحرک چهار پایی به نام SCOUT ساخته است که توانایی عبور از یک پله را دارد [1-5]. کویانانگی² ربات چرخ داری ساخته است که توانایی عبور از یک پله را دارد [6]. کومار³ یک صندلی چرخداری برای افراد معلول و ناتوان ساخت که توانایی عبور از یک پله را دارد [8,7]. هالمه⁴ ربات پا و چرخدار Leg-Wheeled Robot را ساخت که با حرکت همزمان پا و چرخ حرکت می‌کند [9]. کوین⁵ ربات پا و چرخداری به نام Mini-Whegs ساخته که قابلیت عبور از پله‌ها و پریدن از روی پله‌ها را دارد [11,10]. مرادی ربات متحرک چرخداری که دارای قابلیت عبور از پله‌ها و موانع و انعطاف پذیری نسبت به سطوح مقعر، محدب و شیبدار و همچنین قابلیت حرکت سریع و یکنواخت بر روی سطوح صاف را دارد، طراحی کرده است [14-12].

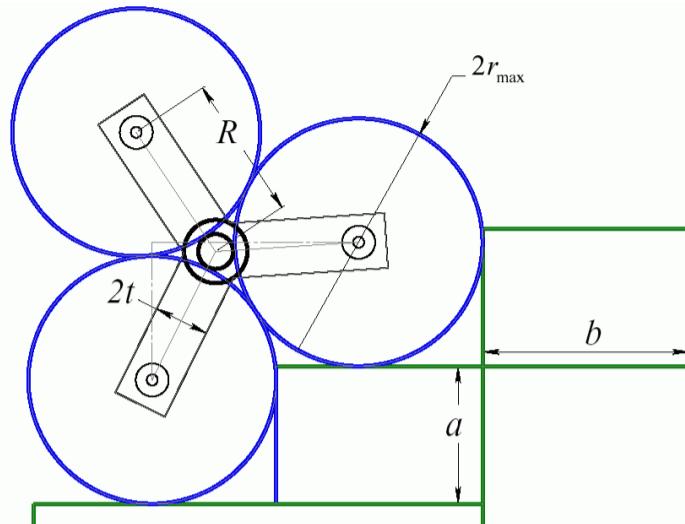
هدف از این تحقیق طراحی و ساخت ربات چرخداری است که بر روی سطوح صاف، حرکتی یکنواخت به وسیله چرخها داشته و همچنین سازوکار خاصی برای عبور از پله‌ها و موانع داشته باشد.

2- طراحی MSRox

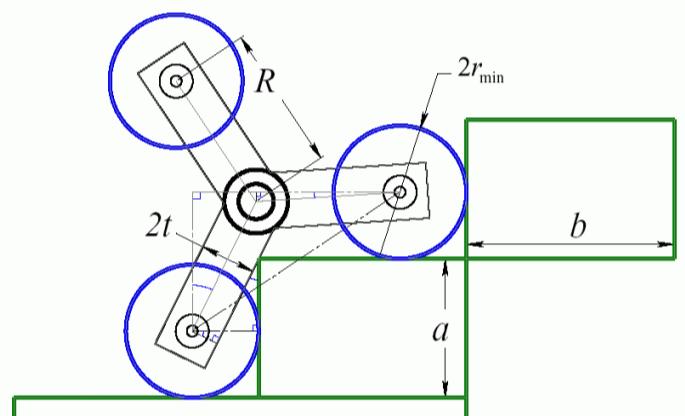
MSRox (شکل 1) دوازده چرخ معمولی دارد که برای حرکت بر روی سطوح صاف، مقعر، محدب و شیبدار

- 1. Buehler
- 2. Koyanagi
- 3. Kalme
- 4. Halm
- 5. Quinn

داشتن مقادیر a , b و t می‌توان کمترین مقدار مجاز برای شعاع چرخهای ستاره-چرخها را از رابطه (3) محاسبه کرد (ضمیمه الف-3):



شکل 4 حالت ستاره-چرخ در بیشترین مقدار r (r_{\max})



شکل 5 حالت ستاره-چرخ در کمترین مقدار r (r_{\min})

$$r_{\min} = \frac{6Rt + a(3b - \sqrt{3}a)}{(3 - \sqrt{3})a + (3 + \sqrt{3})b} \quad (3)$$

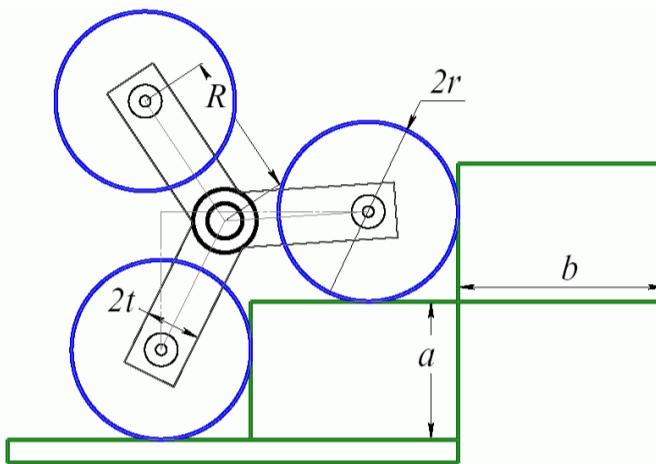
محدودیت دیگر در انتخاب پارامترهای ستاره-چرخهای ربات، ضخامت نگهدارنده چرخهای کوچک ربات در محل خود است که از حد مشخصی نمی‌تواند تجاوز کند و در بیشترین مقدار خود، بین نگهدارنده و پله‌ها برخورد بوجود می‌آید که این وضعیت در شکل 6 نشان داده شده است.

با مشخص بودن a , b و r می‌توان محدوده ضخامت نگهدارنده را برای جلوگیری از برخورد آن با پله (شکل 6) از رابطه زیر به دست آورد (ضمیمه الف-4):

$$t_{1\max} = \frac{ar(3 - \sqrt{3}) + br(3 + \sqrt{3}) + a(\sqrt{3}a - 3b)}{6R} \quad (4)$$

3- طراحی ستاره-چرخ

در طراحی ستاره-چرخهای ربات، پنج پارامتر مهم است که عبارتند از ارتفاع پله‌ها (a)، عمق پله‌ها (b)، شعاع چرخهای کوچک ربات (r)، شعاع ستاره-چرخهای ربات (R) (فاصله بین محور چرخهای کوچک ستاره-چرخ تا محور ستاره-چرخ) و ضخامت نگهدارنده چرخهای کوچک ربات در محل مربوط به هر یک (2t) که در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3 پارامترهای ستاره-چرخ

برای محاسبه شعاع ستاره-چرخها (R) با داشتن مقادیر مربوط به ارتفاع (a) و عمق (b) پله‌ها از رابطه زیر می‌توان استفاده کرد (ضمیمه الف-1):

$$R = \sqrt{\frac{(a^2 + b^2)}{3}} \quad (1)$$

در طراحی ستاره-چرخها برای انتخاب شعاع چرخهای ستاره-چرخهای ربات محدودیت‌هایی وجود دارند که یکی از آنها بیشترین مقدار مجاز برای شعاع چرخهای ستاره-چرخها است که در این وضعیت چرخها با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند (شکل 4). با داشتن مقادیر a و b می‌توان بیشترین مقدار مجاز برای شعاع چرخهای ستاره-چرخها را مطابق (2) محاسبه کرد (ضمیمه الف-2):

$$r_{\max} = \frac{\sqrt{(a^2 + b^2)}}{2} \quad (2)$$

یکی دیگر از محدودیت‌های مربوط به شعاع چرخهای ستاره-چرخ، کمترین مقداری است که می‌توانند داشته باشند که در این وضعیت مطابق شکل 5 بین نگهدارنده چرخهای ستاره-چرخ و پله‌ها برخورد بوجود می‌آید. با

محدودیت محاسبه شده در (4) دارد. وضعیتی که ربات در حال عبور از پلهایی که دارای بیشترین ارتفاع ممکن را دارند و نصف ضخامت نگهدارنده چرخهای ربات نیز در بیشترین حالت ممکن ($t_{2\max}$) است در شکل 7 نشان داده شده. با مشخص بودن a و b میتوان $t_{2\max}$ را از رابطه زیر به دست آورد (ضمیمه الف-6):

$$t_{2\max} = \frac{r(r + \sqrt{3(a^2 + b^2 - r^2)})}{2\sqrt{(a^2 + b^2)}} \quad (6)$$

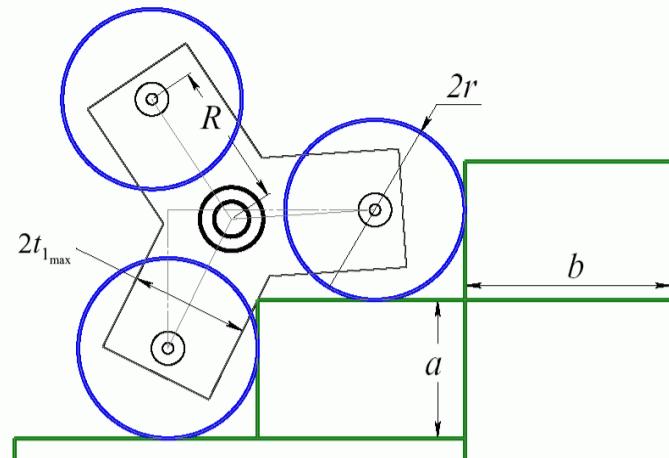
با توجه به محدودهای به دست آمده برای t و با توجه به اینکه مقدار $t_{1\max}$ کمتر از مقدار $t_{2\max}$ است، برای ارضای هر دو شرط برخورد نکردن نگهدارنده چرخهای ستاره-چرخها با پلهای و عبور از حداقل ارتفاع پله به دست آمده در (5)، فقط کافی است که به طور کلی t در محدوده زیر قرار داشته باشد:

$$t < \frac{ar(3 - \sqrt{3}) + br(3 + \sqrt{3}) + a(\sqrt{3}a - 3b)}{6R} \quad (7)$$

برای ربات مورد بحث در این تحقیق با در نظر گرفتن ابعاد پله به صورت $10 \times 15 \text{ cm}^2$ (نصف ابعاد استاندارد پله) $20 \times 30 \text{ cm}^2$ و استفاده از پروفیل $4 \times 4 \text{ cm}^2$ به عنوان نگهدارنده چرخهای ستاره-چرخها ($t=2 \text{ cm}$) و استفاده از چرخهای ستاره-چرخ به قطر 13 cm ($r=6/5 \text{ cm}$) که در محدوده مجاز قرار دارد، به کمک روابط بالا، پارامترهای ستاره-چرخ به صورت جدول 1 محاسبه خواهد شد.

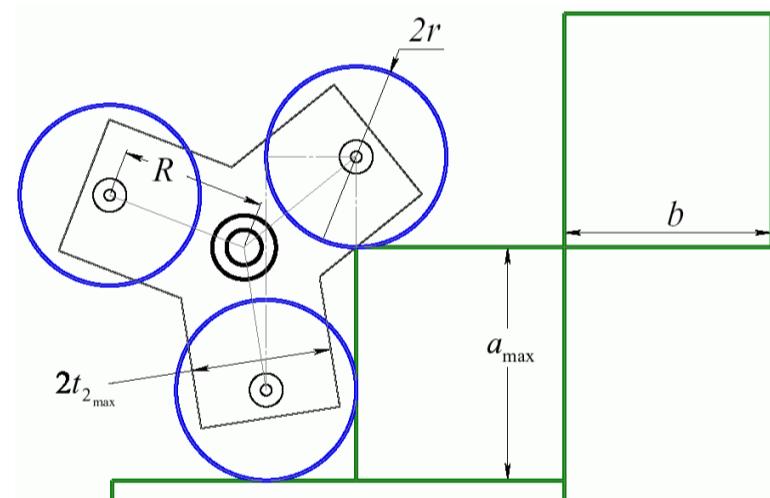
جدول 1 پارامترهای ابعادی ستاره-چرخهای ربات

پارامتر	مقادیر (cm)
R	10/8
t_{\max}	4/10
a_{\max}	17/54
r_{\min}	4/92
r_{\max}	9/35



شکل 6 حالت ستاره-چرخ در بیشترین مقدار t

یکی دیگر از محدودیتهای موجود در انتخاب پارامترهای ستاره-چرخهای ربات، بیشترین ارتفاع پلهای است که ربات طراحی شده برای ابعاد a و b ، میتواند از آن عبور کند (a_{\max}) که اگر از حد مشخصی تجاوز کند، ربات توانایی عبور از آن پله را نخواهد داشت. وضعیت ربات در حال عبور از این پله (با بیشترین ارتفاع ممکن) در شکل 7 نشان داده شده است.



شکل 7 حالت ستاره-چرخ در بیشترین مقدار a

و بیشترین مقدار t

با دانستن مقادیر مربوط به r و R می توان a_{\max} را از صورت زیر به دست آورد (ضمیمه الف-5):

$$a_{\max} = \sqrt{(a^2 + b^2 - r^2)} = \sqrt{3R^2 - r^2} \quad (5)$$

علاوه بر محدودیت های بالا، همانطور که در شکل 7 مشخص است در وضعیتی که ربات در حال عبور از پلهایی با بیشترین ارتفاع ممکن است، ضخامت نگهدارنده چرخهای ربات، محدودیت دیگری علاوه بر

پارامترهای F_{2x} ، F_{1x} نشان داده شده در شکل 9 به ترتیب نیروهای افقی وارد شده از طرف بدن ربات به محور ستاره-چرخهای ردیف جلو و عقب ربات، پارامترهای F_{1y} ، F_{2y} به ترتیب نیروهای عمودی وارد از طرف بدن ربات بر محور ستاره-چرخهای ردیف جلو و عقب ربات، پارامترهای N_1 ، N_2 به ترتیب نیروهای وارد شده از طرف زمین بر چرخهای ستاره-چرخهای جلو و عقب ربات، پارامترهای T_1 ، T_2 به ترتیب معرف گشتاورهای وارد شده بر محور ستاره-چرخهای جلو و عقب ربات و پارامترهای r ، R ، m_s ، μ_s و θ به ترتیب معرف شعاع چرخها، شعاع ستاره-چرخها، جرم هر ستاره-چرخ، ضریب اصطکاک استاتیکی بین چرخها و زمین و زاویه بین نگهدارنده چرخهای در حال تماس با زمین نسبت به افق است (مقادیر R ، m_s ، μ_s و θ برای ستاره-چرخهای ردیف های جلو و عقب یکسان است).

با استفاده از شکل 9 و با گشتاورگیری حول نقاط o_1 و o_2 می توان نوشت:

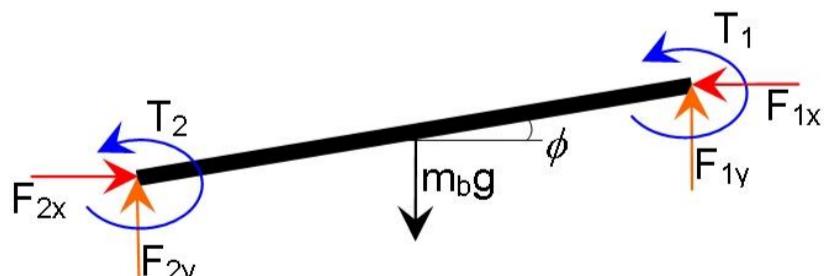
$$T_1 = (F_{1y} + m_s g)R \cos(\theta) + F_{1x}(r + R \sin(\theta)) \quad (8)$$

$$T_2 = (F_{2y} + m_s g)R \cos(\theta) - F_{2x}(r + R \sin(\theta)) \quad (9)$$

با جمع کردن روابط بدست آمده برای T_1 و T_2 (8) و (9) داریم:

$$T_1 + T_2 = (F_{1y} + F_{2y} + 2m_s g) \times R \times \cos(\theta) \quad (10)$$

($T_1 + T_2$) برابر با نصف گشتاور استاتیکی لازم برای کل ستاره-چرخهای ربات است. دیاگرام آزاد بدن ربات در شکل 10 نشان داده شده است.



شکل 10 دیاگرام آزاد بدن ربات

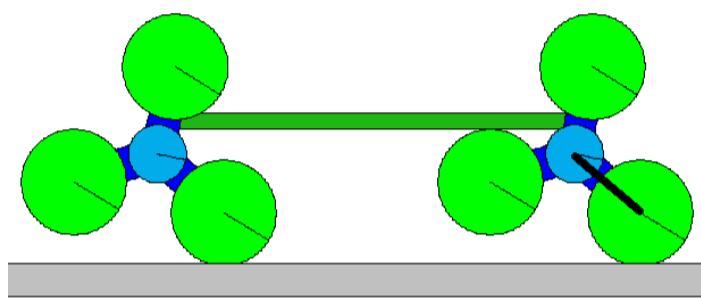
پارامتر m_b در شکل 10، نصف وزن بدن ربات است.

با استفاده از شکل 10 می توان نوشت:

4- طراحی قدرت برای MSRox

4-1- طراحی استاتیکی

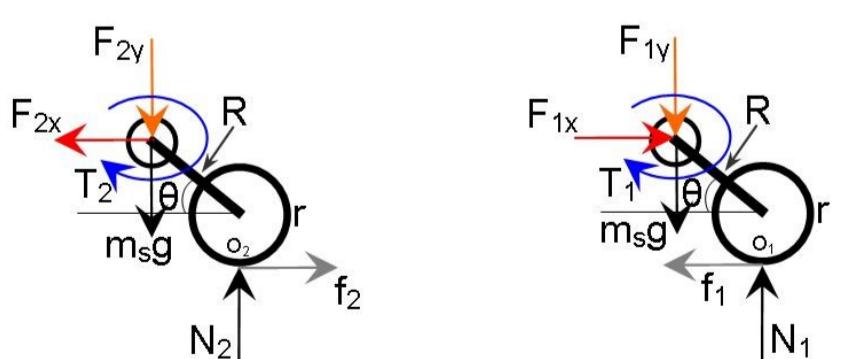
برای محاسبه گشتاور مورد نیاز موتور در حالت استاتیکی برای به چرخش در آوردن ستاره-چرخها و بلند کردن کل ربات از روی زمین، بدون در نظر گرفتن پلهها، فرض می شود که ربات را بر روی زمین و نه بر روی پلهها به حرکت درآورده ایم تا مطابق شکل 8 ربات از روی زمین بلند شده و در همین حالت متوقف شود. اکنون می توان گشتاور لازم موتور برای نگهداری ربات در همین وضعیت را محاسبه کرد.



شکل 8 حالت ربات ناشی از حرکت ستاره-چرخها

بر روی سطح صاف

خط مشکی نشان داده شده در شکل 8 نشان دهنده راستای نگهدارنده چرخی است که در تماس با زمین قرار دارد. با توجه به تقارن ربات نسبت به محور طولی آن می توان برای ترسیم دیاگرام آزاد ربات، آن را به دو قسمت تقسیم کرد و پس از به دست آوردن گشتاور، آن را در 2 ضرب کرد تا گشتاور استاتیکی لازم برای کل ربات به دست آید. دیاگرام آزاد ستاره-چرخهای ربات در حالت استاتیکی به صورت شکل 9 است.



شکل 9 دیاگرام آزاد یکی از چرخهای ستاره-چرخهای جلو (راست) و عقب (چپ) ربات در حالت استاتیکی

متر است. با در نظر گرفتن نسبت تبدیل گشتاور از محور موتور مربوط به حرکت ستاره-چرخها تا محور ستاره-چرخها که توسط چرخ زنجیرهای انتقال دهنده قدرت اعمال شده و برابر با $1/9917$ است - می‌توان گشتاور لازم برای موتور محرک ستاره-چرخها را برای نگهداشتن ربات به صورت استاتیکی و در بدترین حالت - که در شکل 11 نشان داده شده - محاسبه کرد:

$$12 / 18402 = 6 / 117397 \quad (N.m)$$

2-4- طراحی دینامیکی

برای طراحی دینامیکی سیستم با توجه به پیچیدگی بالای آن از کامپیوتر و نرم افزار Working Model استفاده شده و سیستم کل ربات در این نرمافزار مدلسازی می‌شود، به نحوی که دارای موتور بوده و بتواند شیوه به ربات واقعی عمل کرده و از پله‌ها بالا و پایین برود. با در نظر گرفتن سرعت زاویه‌ای 26 دور در دقیقه برای ستاره-چرخهای ربات پس از بالا رفتن ربات از پله‌ها (شکل 16) و محاسبه توان موتورهای محورهای جلو و عقب ربات، نمودارهای شکل 12 به دست می‌آیند که نمودار بالایی مربوط به یکی از ستاره-چرخهای جلویی و نمودار پایینی مربوط به یکی از ستاره-چرخهای عقبی ربات است.

با مقایسه نمودارهای شکل 12 می‌توان گفت که نمودار پایینی (مربوط به ستاره-چرخهای عقبی ربات)، بیشتر در قسمت بالای محور افقی قرار داشته و محدوده تغییرات آن در محدوده‌ای که ربات کاملاً بر روی پله‌ها قرار دارد، از نمودار بالایی (مربوط به ستاره-چرخهای جلویی ربات) بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در حین بالا رفتن ربات از پله‌ها، ستاره-چرخهای عقبی ربات، گشتاور و فشار بیشتری را متحمل می‌شوند.

همچنین پس از پایین آمدن ربات از پله‌ها و محاسبه توان موتورهای محورهای جلو و عقب ربات، نمودارهای شکل 13 به دست می‌آیند که نمودار بالایی مربوط به یکی

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{1y} + F_{2y} = m_b g \quad (11)$$

با قرار دادن (10) در (11) داریم:

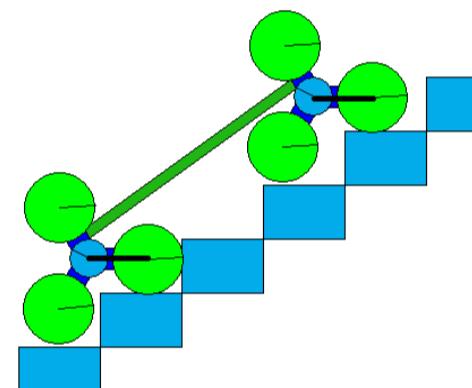
$$T_1 + T_2 = (m_b + 2m_s)gR \cos(\theta) = mgR \cos(\theta) \quad (12)$$

پارامتر m در (12) نصف جرم کل ربات است. اکنون می‌توان کل گشتاور استاتیکی مورد نیاز برای تمام ستاره-چرخهای ربات را به صورت زیر محاسبه کرد :

$$T_{all} = 2(T_1 + T_2) = 2mgR \cos(\theta) = MgR \cos(\theta) \quad (13)$$

پارامتر M در (13) کل جرم ربات است.

مطابق (13) کل گشتاور استاتیکی مورد نیاز برای ستاره-چرخهای ربات زمانی به بیشترین مقدار خود می‌رسد که زاویه نگهدارنده چرخهای ستاره-چرخ نسبت به افق برابر با صفر شود ($\theta=0 \Rightarrow \cos(\theta)=1$) که این حالت مطابق شکل 11 در حین بالا رفتن ربات از پله‌ها رخ می‌دهد.



شکل 11 وضعیت ربات در بیشترین گشتاور

اعمال شده به موتور

خطوط مشکی در این شکل راستای نگهدارنده‌ها است که هر دو افقی بوده و در این حالت $\theta=0$ است.

با قرار دادن ($\theta=0$) در (13) می‌توان گشتاور استاتیکی بیشینه مورد نیاز را برای تمام ستاره-چرخهای ربات به صورت زیر محاسبه کرد:

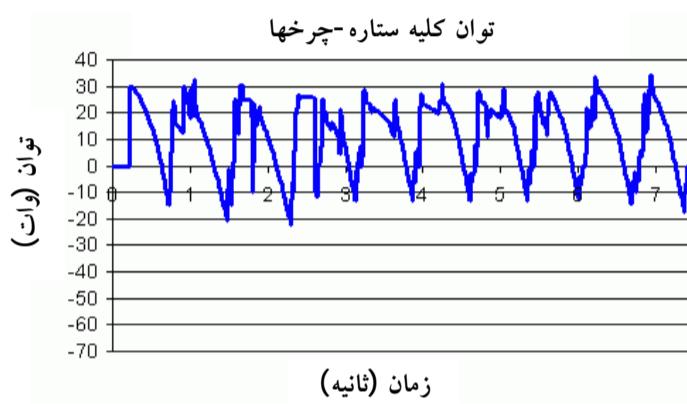
$$[T_{all}]_{max} = MgR \quad (14)$$

که با در نظر گرفتن جرم ربات (11/5 کیلوگرم) و گذاشتن مقدار R برابر است با:

$$T=12/18402 \quad (N.m)$$

بنابراین گشتاور استاتیکی لازم برای مجموع چهار ستاره-چرخ بر روی محور آنها برابر با 12/18402 نیوتن

بیشتر در قسمت بالای محور افقی قرار داشته و باند تغییرات آن از نمودار پایینی (مربوط به ستاره-چرخهای عقبی ربات) بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در حین پایین آمدن ربات از پله‌ها، ستاره-چرخهای جلویی ربات گشتاور و فشار بیشتری را متحمل می‌شوند. با ترکیب اطلاعات موجود در شکل 12 می‌توان قدرت لازم برای بالا رفتن ربات از پله‌ها را برای موتور مربوط به این کار مطابق با شکل 14 به دست آورد.



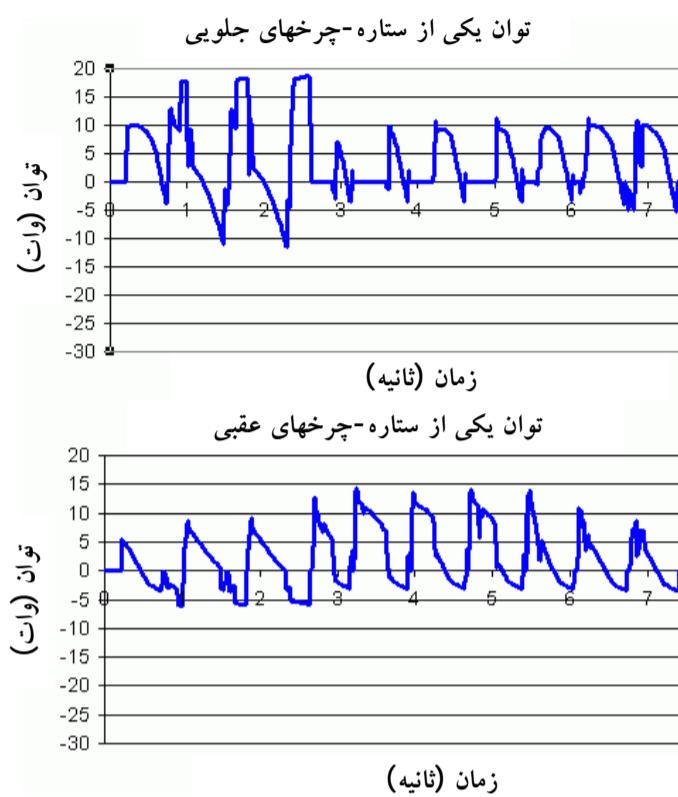
شکل 14 قدرت لازم برای موتور محرك ستاره-چرخهای ربات برای بالا رفتن از پله‌ها

در برخی قسمت‌های شکل 14 توان منفی شده که علت آن رها شدن ربات بر اثر وزن ربات در حالتی است که ستاره-چرخهای در حال چرخش بر روی یک چرخ قرار داشته و مرکز ثقل آنها در نقطه اوج خود در هر سیکل است. در این وضعیت وزن ربات باعث چرخیدن ستاره-چرخهای سریعتر از آنچه توسط موتور اعمال می‌شود - شده است.

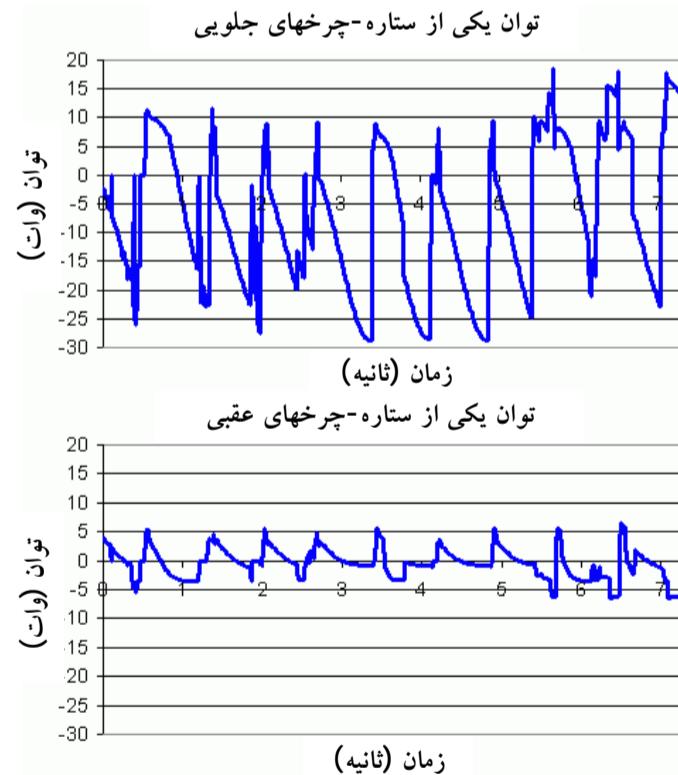
لازم است ذکر شود این وضعیت در هر دو حالت بالا و پایین رفتن از پله‌ها رخ می‌دهد اما مدت زمان اعمال توان منفی به موتور در هر سیکل در هنگام پایین آمدن از پله‌ها بیشتر است.

مقدار بیشینه توان در شکل 14 برابر $34/104$ وات است که برای محاسبه گشتاور مورد نیاز برای موتور محرك ستاره-چرخهای در روی محور ستاره-چرخهای می‌توان نوشت:

از ستاره-چرخهای جلویی و نمودار پایینی مربوط به یکی از ستاره-چرخهای عقبی است.



شکل 12 توان مورد نیاز برای یکی از ستاره-چرخهای جلو (نمودار بالایی) و یکی از ستاره-چرخهای عقب (نمودار پایینی) ربات در حین بالا رفتن از پله‌ها



شکل 13 توان مورد نیاز برای یکی از ستاره-چرخهای جلو (نمودار بالایی) و یکی از ستاره-چرخهای عقب (نمودار پایینی) ربات در حین پایین رفتن از پله‌ها

با مقایسه نمودارهای شکل 13 می‌توان گفت که نمودار بالایی (مربوط به ستاره-چرخهای جلویی ربات)،

طبيعي است، زيرا ربات در حال انتقال از سطح صاف بر روی پله‌ها و بعکس است، اما در قسمت ميانی نمودارهای مذکور - که مربوط به حرکت ربات بر روی پله‌ها، زمانی که کل بدنه ربات در روی پله‌ها قرار دارد، است - این غيرتناوبی بودن طبيعی نبوده و در اثر خطاهای نرم افزاری رخ داده است.

نکته بسيار مهم در شکل 15 آن است که از آنجا که بيشتر قسمت‌های اين نمودار در زير محور حقيقي قرار دارند، موتور محرك ستاره-چرخها برای داشتن قابلیت پايين رفتن از پله‌ها باید توانايی تحمل گشتاور منفي را داشته باشد. به اين معنا که باید در بيشتر قسمت‌ها به عنوان ترمز عمل نماید و از رفتن ربات به سمت پايين با سرعتی بيشتر از سرعت چرخش خود جلوگيري کند. به همين منظور گيربکس موتور مربوط به چرخش ستاره-چرخها باید حلزونی (شفت بغل) باشد يا اصطلاحاً Back-Drivable گشتاور زياد به خروجي گيربکس منجر به چرخش آن و در نتيجه چرخیدن سريعتر ستاره-چرخها (از سرعتی که در اثر چرخش موتور بوجود می آيد) می شود.

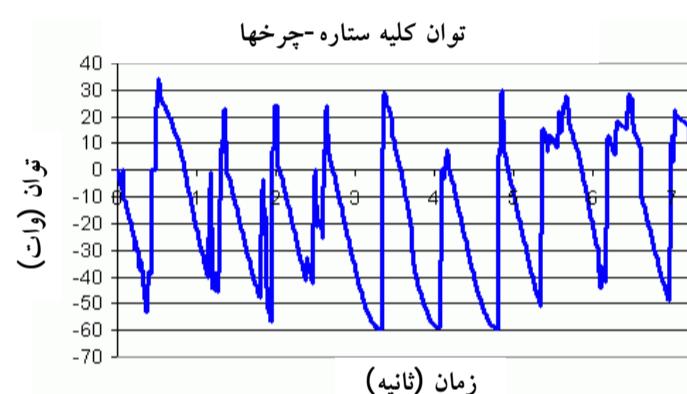
با توجه به گشتاورهای محاسبه شده در حالت‌های استاتيکي و ديناميکي می‌توان گفت که حداکثر گشتاور لازم برای موتور محرك ستاره-چرخها برابر $6/2889$ نيوتن متر است که اين مقدار گشتاور لازم برای حرکت ربات و عبور آن از پله‌ها و موانع، در مقاييسه با گشتاور مورد نياز برای حرکت ربات RHEx و عبور آن از پله‌ها و موانع بسيار كمتر است (RHEx به وزن $7/247$ کيلوگرم 6 موتور DC گيربکس‌دار با توانهای 20 وات و نسبت تبديل $1/33$ است که گشتاور بيشينه هر پا $3/614$ نيوتن متر است) که علت آن، حرکت با تکيه بر پا در ربات مذكور است [15].

$$T = \frac{34/104}{26 \times \frac{2\pi}{60}} = \frac{34/104}{2/7227} = 12/5257 \text{ (N.m)}$$

و با در نظر گرفتن نسبت تبديل گشتاور از محور موتور محرك ستاره-چرخها تا محور ستاره-چرخها - که توسط چرخ زنجيرهای انتقال دهنده قدرت اعمال شده و برابر با $1/9917$ است - می‌توان گشتاور لازم برای موتور محرك ستاره-چرخها را برای بالا رفتن از پله‌ها محاسبه کرد:

$$12/5257 \div 1/9917 = 6/2889 \text{ (N.m)}$$

همچنين با ترکيب اطلاعات شکل 13 می‌توان قدرت لازم را برای پايين رفتن ربات از پله‌ها برای موتور مربوط به اين کار مطابق شکل 15 به دست آورد.



شکل 15 قدرت لازم برای موتور محرك ستاره-چرخهای ربات برای پايين آمدن از پله‌ها

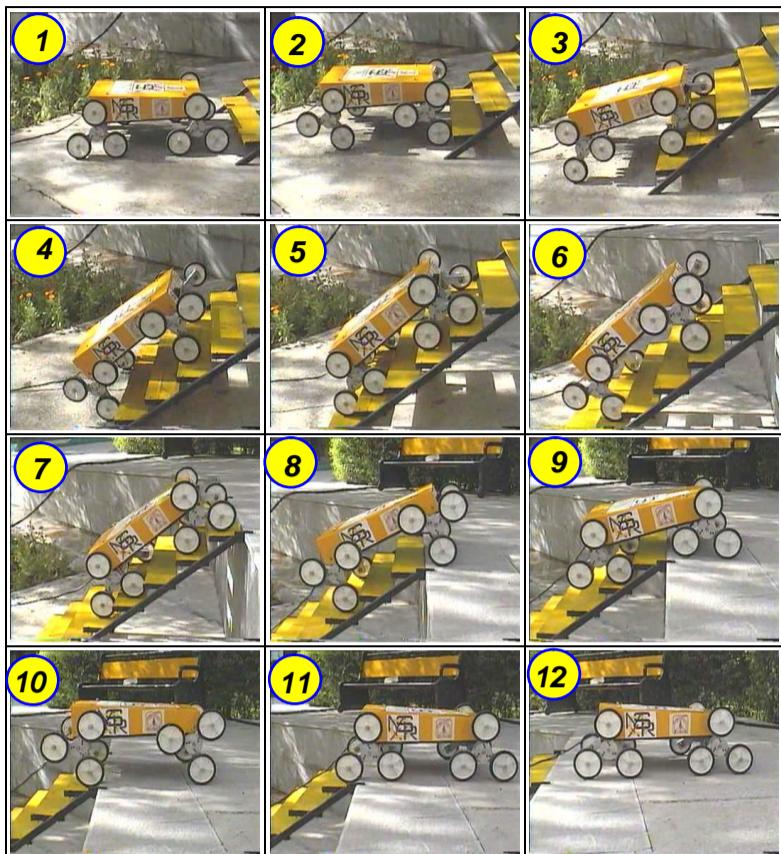
مقدار بيشينه توان در نمودار بالا برابر با $33/251$ وات است که برای محاسبه گشتاور مورد نياز برای موتور محرك ستاره-چرخها بر روی محور ستاره-چرخها می‌توان نوشت:

$$T = \frac{33/251}{26 \times \frac{2\pi}{60}} = \frac{33/251}{2/7227} = 12/2125 \text{ (N.m)}$$

و با در نظر گرفتن نسبت تبديل گشتاور از محور موتور محرك ستاره-چرخها تا محور ستاره-چرخها، می‌توان گشتاور لازم برای موتور محرك ستاره-چرخها برای پايين رفتن از پله‌ها محاسبه کرد:

$$12/2125 \div 1/9917 = 6/1317 \text{ (N.m)}$$

غير تناوبی بودن نمودارهای نشان داده شده در شكلهای 14 و 15 در قسمتهای ابتدا و انتهای آنها، کاملاً

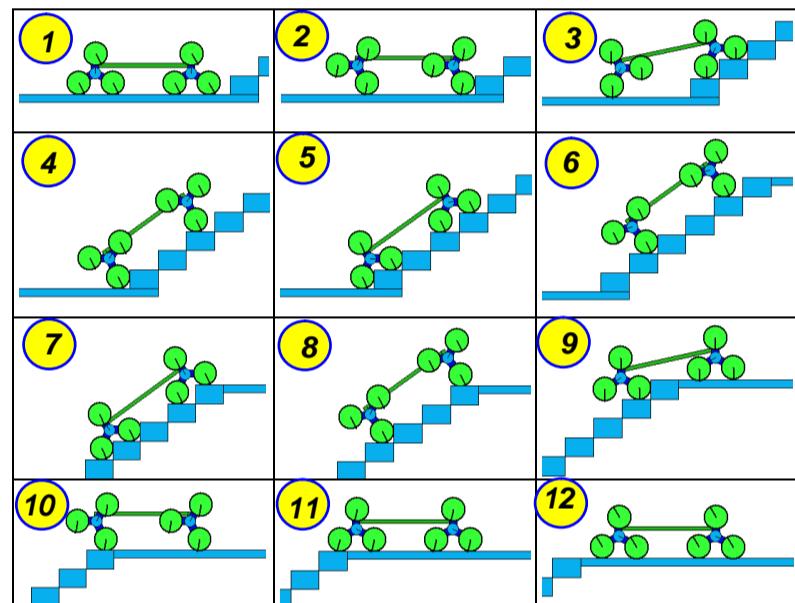


شکل 17 مراحل مختلف عبور ربات از پله‌های استاندارد برای ربات

5- نحوه عبور ربات از پله‌های استاندارد برای ربات

پله‌های استاندارد برای MSRox ارتفاع 10 سانتیمتر و عمق 15 سانتیمتر دارند که این ربات برای عبور از هر یک از آنها تنها به $0/75$ ثانیه زمان نیاز دارد.

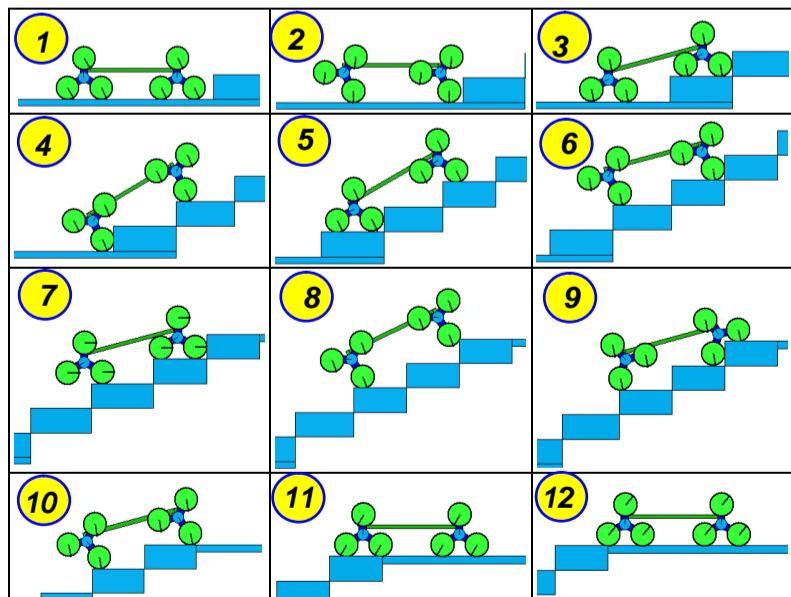
قبل از شروع به ساخت این ربات ، به وسیله مدل‌سازی کامپیوتری، مراحل مختلف عبور ربات از پله‌های استاندارد برای ربات به صورت مراحل نشان داده شده در شکل 16 پیش‌بینی شده است.



شکل 16 مراحل مختلف عبور ربات از پله‌های استاندارد برای ربات در مدل‌سازی کامپیوتری

6- نحوه عبور ربات از پله‌های غیراستاندارد برای ربات

ربات طراحی شده علاوه بر توانایی عبور از پله‌های استاندارد برای ربات، توانایی عبور از هر پله‌ای با ارتفاع حداقل $17/54$ سانتیمتر و عمق نامحدود را دارد. مراحل مختلف عبور ربات از پله‌هایی که برای ربات غیر استاندارد است، توسط مدل‌سازی کامپیوتری مطابق شکل 18 پیش‌بینی شده است.



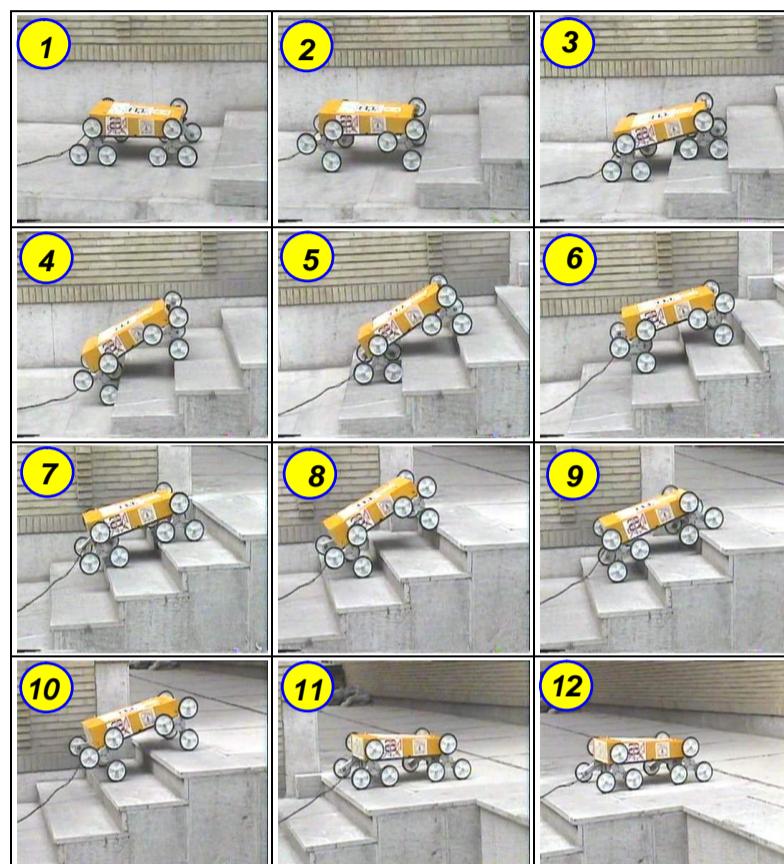
شکل 18 مراحل مختلف عبور ربات از پله‌های غیر استاندارد برای ربات در مدل‌سازی کامپیوتر

پس از مدل‌سازی کامپیوتری و طراحی و ساخت ربات آزمایش شده است، که مراحل مختلف عبور ربات از این پله‌ها در عمل در شکل 17 نشان داده شده است. از شکل‌های 16 و 17 می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل‌سازی ربات در کامپیوتر و رفتار ربات در واقعیت کاملاً مشابه است و در نتیجه پیش‌بینی و طراحی درست بوده و می‌توان برای بررسی رفتار ربات در مقابل با موانع و پله‌های مختلف، از مدل‌سازی کامپیوتری استفاده کرد.

با کمی دقت در رفتار پای انسان در حین عبور از پله‌ها می‌توان متوجه شد که در حین عبور از پله‌ها پنجه پای انسان در روی پله‌ها کاملاً ثابت است و به عنوان تکیه‌گاه ثابتی که هیچ گونه دورانی نسبت به بدن انسان ندارد عمل می‌کند و مجموع حرکات مج، زانو و ران پای انسان منجر به حرکت بدن انسان و عبور از پله‌ها می‌شود؛ که این قابلیت در طراحی ستاره-چرخهای MSRox در نظر گرفته شده است. به این صورت که طراحی سازوکار حرکتی ستاره-چرخها به نحوی انجام شده که در حین چرخش ستاره-چرخها و عبور ربات از پله‌ها و موانع، چرخهای کوچک ربات نسبت به بدن ربات کاملاً ثابت و بدون دوران می‌مانند و شبیه به یک تکیه گاه ثابت عمل می‌کنند.

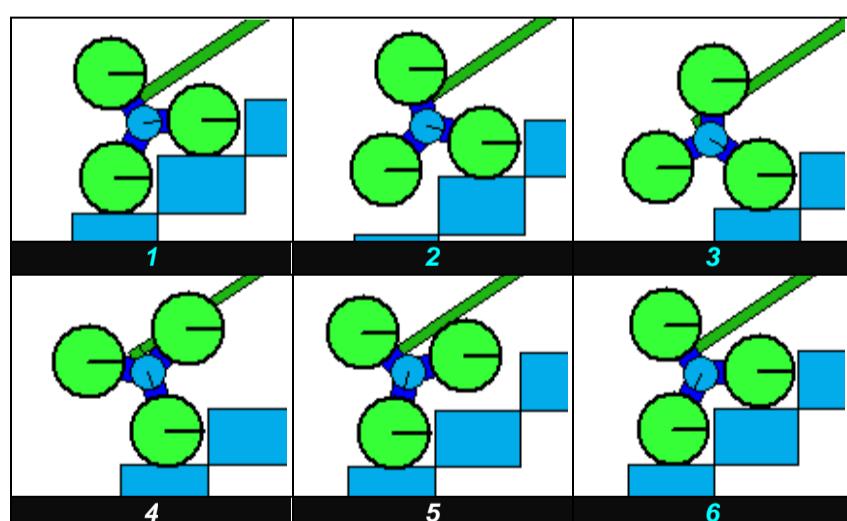
این قابلیت برای عبور ربات از پله‌ها و موانع بسیار لازم و ضروری است، زیرا نبودن این قابلیت در ربات، منجر به لیز خوردن چرخها در محل خود و درگیری آنها با کنج پله‌ها در هنگام بالارفتن از پله‌ها و همچنین منجر به سقوط ربات از پله‌ها در هنگام پایین رفتن ربات از پله‌ها می‌شود. این تشابه بسیار مهم بین ستاره-چرخ و پای انسان که توسط کامپیوتر مدل‌سازی شده، در شکل 20 نشان داده شده است.

همچنین نحوه رفتار ربات در حین عبور از پله‌های غیراستاندارد در واقعیت بررسی شده و مراحل مختلف این حرکت در شکل 19 نشان داده شده است.



شکل 19 مراحل مختلف عبور ربات از پله‌های غیراستاندارد برای ربات

با مقایسه شکل‌های 18 و 19 می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل‌سازی کامپیوتری برای عبور ربات از این پله‌ها نیز کاملاً درست بوده و کاملاً قابل اطمینان است و در مجموع می‌توان گفت که ربات توانایی عبور از محدوده ابعادی وسیعی از پله‌ها را دارد.



شکل 20 تشابه ستاره-چرخ و پای انسان توسط مدل‌سازی در کامپیوتر

مطابق شکل 20 خطوط افقی روی چرخها در تمامی مراحل چرخش ستاره-چرخها کاملاً افقی است و چرخها

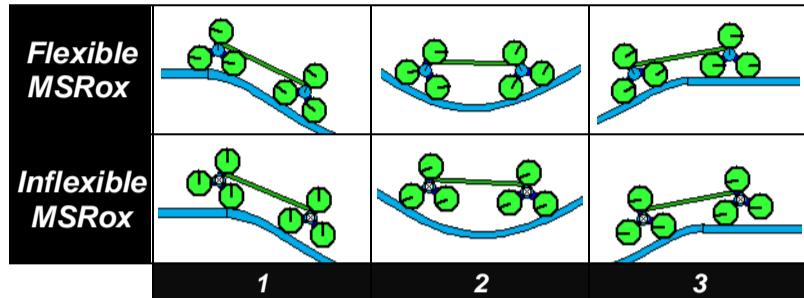
7- تشابه ستاره-چرخ و پای انسان

نکته بسیار مهم در طراحی ستاره-چرخ و سازوکار حرکتی آن، ثابت ماندن زاویه چرخهای ستاره-چرخ نسبت به بدن ربات در حین چرخش ستاره-چرخها و عبور ربات از پله‌ها و موانع است که این قابلیت را می‌توان عامل اصلی توانایی ربات در عبور از پله‌ها و موانع دانست.

این قابلیت بسیار مهم ربات از پای انسان و مکانیزم حرکتی آن در هنگام عبور از پله‌ها الهام گرفته شده است.

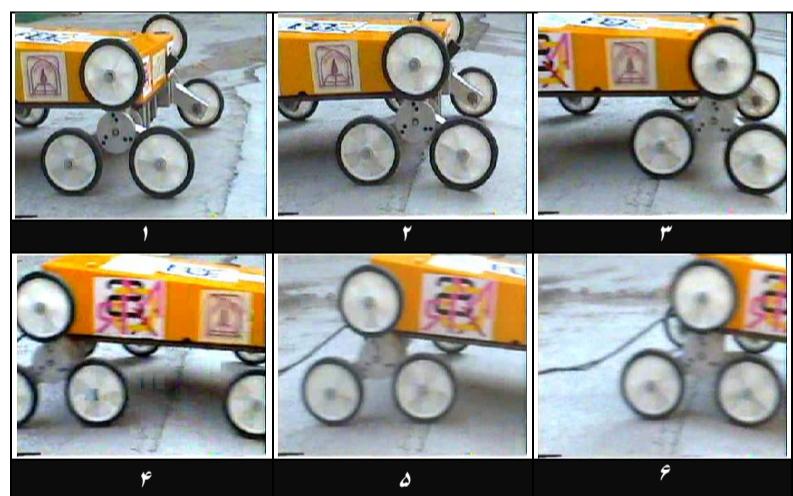
و ایجاد ضربه در حرکت ربات در حین عبور از این سطوح می‌شود.

مقایسه رفتار MSRox که انعطاف پذیر است و رباتی شبیه به MSRox که انعطاف ناپذیر است در هنگام عبور از سطح دارای پستی و بلندی - که توسط کامپیوتر مدل‌سازی شده - در شکل 22 مشاهده می‌شود.



شکل 22 مقایسه بین MSRox و MS Rox انعطاف ناپذیر در مدل‌سازی کامپیوتری

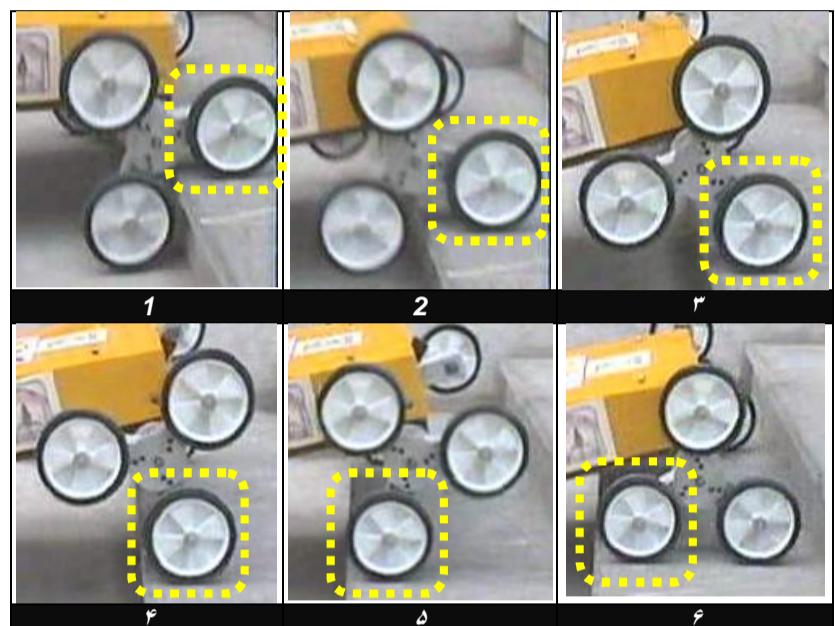
انعطاف‌پذیری MSRox در حین عبور از سطح شبیه در عمل در شکل 23 نشان داده شده است.



شکل 23 انعطاف‌پذیری MSRox در واقعیت

نکته بسیار مهم در باره این انعطاف‌پذیری، اتوماتیک بودن آن است به این معنا که به هیچ‌گونه وسیله مکانیکی یا الکترونیکی نیاز نداشته و این انعطاف‌پذیری به صورت کاملاً خودکار و فقط بر اثر وزن ربات انجام می‌شود. به عنوان مثال چنانچه این قابلیت در ربات تعیه نشده بود، در مرحله شماره 3 از شکل 23 چرخهای ردیف جلویی ربات از روی زمین بلند می‌شد و همین مسئله منجر به اعمال نیروی زیادتری به چرخهای دیگر ربات و همچنین ایجاد ضربه در حرکت ربات می‌شد.

هیچ‌گونه دورانی ندارند، در حالی که ستاره-چرخها در حال چرخش بوده و ربات در حال بالا رفتن از پله‌ها است. این تشابه بسیار مهم در ربات ساخته شده و در حین بالا رفتن از پله‌ها به صورت شکل 21 است.



شکل 21 تشابه بین ستاره-چرخ و پای انسان در واقعیت

با دقت در شکل 21 مشاهده می‌شود که مشابه با مدل‌سازی کامپیوتری، چرخها در تمامی مراحل چرخش ستاره-چرخها کاملاً ثابت بوده و هیچ‌گونه دورانی نسبت به بدنه ربات ندارند در حالی که ستاره-چرخها در حال چرخش بوده و ربات در حال حرکت و عبور از پله‌ها است که این نشان‌دهنده طراحی کاملاً دقیق این قابلیت در ربات است.

8- انعطاف‌پذیری MSRox

در حین حرکت ربات بر روی سطوح صاف، مکعب، محدب و شبیدار، ستاره-چرخهای ربات می‌توانند آزادانه حول محورهای خود دوران داشته باشند. این عامل باعث انعطاف‌پذیر بودن ربات نسبت به سطوح مذکور است زیرا در روی سطح صاف در هر لحظه هشت عدد از چرخهای ربات با زمین در تماس است و چنانچه این قابلیت در ربات وجود نداشته باشد، در هنگام عبور ربات از سطوح مکعب، محدب و شبیدار، انحنای سطح منجر به قطع تماس یک سری از چرخها با زمین می‌شود و باعث بروز مشکل

1-10- محرك‌های MSRox

MSRox دو درجه آزادی در سیستم ربات‌های متحرک است که یکی از درجه‌های آزادی مربوط به چرخش دوازده چرخ ربات و درجه آزادی دوم مربوط به چرخش ستاره-چرخهای ربات است که برای حرکت هریک از این درجه‌های آزادی از یک موتور DC گیربکس دار 24 ولت استفاده شده که مشخصات این موتورها در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2 موتورهای DC

Purpose	Output (Watt)	Gear Ratio
12 Simple Wheels	12	1/16
4 Star-Wheels	30	1/75

علاوه بر این، برای ثابت کردن چرخهای کوچک ربات نسبت به بدنه در هنگام چرخش ستاره-چرخها، از کلاچهای 24 DC ولت استفاده شده است.

2-10- سنسور MSRox

توانایی تشخیص پله‌ها و موانع و هرچه در سر راهش باشد را دارد. این توانایی بوسیله یک عدد سنسور نوری¹ (شکل 25) به ربات داده شده است. این سنسور به برد کنترلی ربات متصل بوده و به محض برخورد اشعه آن با پله‌ها و موانع و فرستادن پیغام به برد مذکور، ربات شروع به حرکت و عبور از آنها می‌نماید.

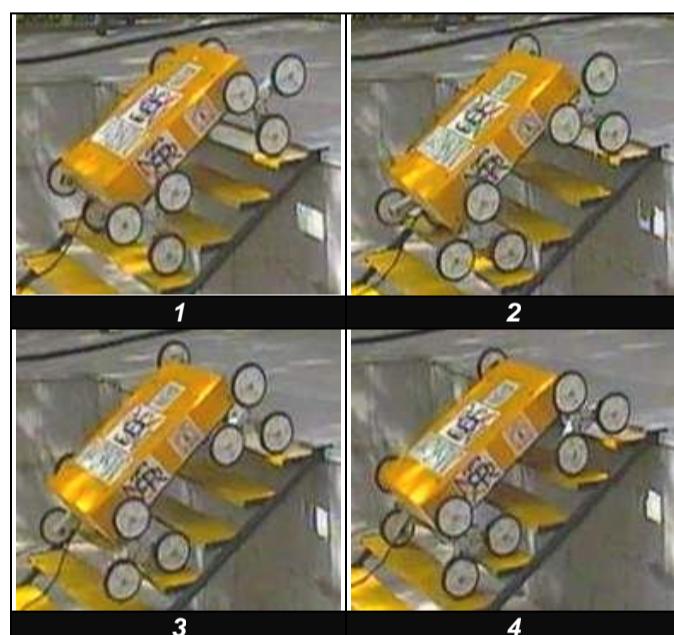
3-10- صفحه کلید کنترل کننده MSRox

کنترل کننده ربات، یک صفحه کلید ماتریسی شش‌تایی (شکل 26) است که به برد کنترلی ربات متصل بوده و می‌توان از طریق آن ربات را به راه انداخت و یا متوقف کرد و سرعت حرکت ربات بر روی سطح صاف یا درحال عبور از پله‌ها و موانع را کم یا زیاد کرد، جهت حرکت آن را عوض کرد و ستاره-چرخها را بدون وجود پله یا مانع به حرکت در آورد.

1. photoelectric sensor

9- پایداری MSRox

ممکن است این سوال پیش آید که در صورت قطع برق ربات یا بروز هرگونه مشکل در حین عبور از پله‌ها چه اتفاقی می‌افتد؟ آیا ربات به پایین پله‌ها سقوط می‌کند؟ در جواب این سؤال باید گفت که در صورت بروز چنین حادثه‌ای هیچگونه مشکلی برای ربات رخ نمی‌دهد و ربات به روی پله‌ای که در حال عبور از آن است باز می‌گردد و در همان جا بدون حرکت باقی می‌ماند و هیچگونه سقوطی اتفاق نمی‌افتد. برای اطمینان از این مسئله در حین حرکت ربات و بالارفتن از پله‌ها ، به صورت دستی برق ربات را قطع کرده و رفتار ربات را مورد بررسی کرده‌ایم که نتایج در شکل 24 نشان داده شده است.



شکل 24 پایداری MSRox

مطابق شکل 24 ربات به روی پله‌ای که در حال عبور از آن بوده برگشته و در همان جا بدون حرکت باقی مانده است.

10- سیستم کنترلی MSRox

سیستم کنترلی ربات یک سیستم میکروکنترلری از خانواده میکروکنترلرهای 8051 (ATMEL 89C51) است و شامل محرکها برای به حرکت در آوردن ربات و ایجاد قابلیتهای مختلف آن ، سنسور برای تشخیص پله‌ها و موانع و صفحه کلید برای کنترل ربات است.

لازم است ذکر شود که تمامی ربات‌های نام برده شده در جدول فوق از نوع ربات‌های پادار¹ و یا پا و چرخ‌دار² می‌باشند که ربات‌های پادار دارای حرکت غیر یکنواخت در سطوح صاف بوده و ربات‌های پا و چرخ‌دار نیز سرعت بسیار کمی در هنگام عبور از پله‌ها دارند. بنابراین می‌توان گفت که MSRox سریعترین ربات متحرک با توانایی حرکت یکنواخت و سریع بر روی سطوح صاف است که ناشی از حرکت بر روی چرخهایش است، می‌باشد.



شکل 25 سنسور نوری MSRox

12- نتیجه‌گیری

در نتیجه‌گیری می‌توان گفت که طراحی مکانیزم [14-12] به درستی انجام شده و می‌توان از این سازوکار برای عبور از پله‌ها و موانع و هر گونه سطوح ناهموار با هر نوع پستی و بلندی استفاده کرد و برای کاربردهای بسیاری از قبیل استفاده در صندلی‌های چرخ‌دار برای جابه‌جایی افراد معلول و ناتوان یا به عنوان فضانورد برای تحقیقات و اکتشافات فضایی یا شناسایی مناطق جنگی و به طور کلی در محلی که پستی و بلندی یا پله داشته باشد می‌توان از این ربات استفاده کرد.

با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی و آزمایش‌های واقعی ربات مشخص می‌شود که مدل‌سازی‌های ربات کاملاً درست و کامل انجام شده و برای تحقیق در زمینه نحوه حرکت MSRox در حین عبور از هر مانع یا پله‌ای با ابعاد و اشکال مختلف می‌توان از مدل‌سازی کامپیوتری استفاده کرد.

همچنین معادلات حاکم بر ستاره-چرخهای ربات بدروستی به دست آمده و (انشاء...) از آنها برای طراحی ستاره-چرخهایی با کابردهای ویژه یا ستاره-چرخ بزرگتر و هوشمند در MSRox II استفاده خواهد شد.



شکل 26 صفحه کلید کنترل کننده MSRox

11- سرعت MSRox

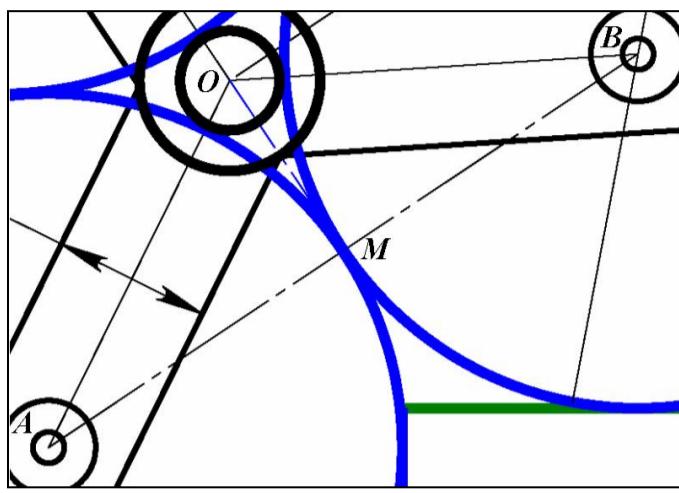
MSRox برای عبور از هر پله فقط به 0/75 ثانیه زمان احتیاج دارد که این زمان قابل کاهش نیز هست. مقایسه بین سرعت ربات‌های موجود در دنیا که توانایی عبور از پله‌ها و موانع را دارند و MSRox در جدول 3 آورده شده است [16].

جدول 3 سرعت عبور از پله

ربات	سرعت (پله/ثانیه)
Raibert Biped	0/6
MSRox	0/75
Honda P3	1/5
RHex	1/0 - 1/55
WL-12RIII	2/6
Wheel-Leg Biped	3
MelCrab-II	10

1. Legged Robot
2. Leg-wheeled Robot

(r_{\max}) را برای جلوگیری از برخورد چرخها به یکدیگر، با کمک شکل الف - 2 محاسبه کرد.



شکل - الف - 2 بزرگنمایی شکل 4

با توجه به مثلث OBM از شکل الف - 2 می‌توان نوشت:

$$OB=R \quad \& \quad BM = r_{\max} \quad \& \quad \angle OBM = 30^\circ \rightarrow$$

$$r_{\max} = R \cos(30^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} R \quad (\text{الف-6})$$

$$(5) \rightarrow r_{\max} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2} \quad (\text{الف-5})$$

الف - 3 - محاسبه r_{\min}

با در دست داشتن ارتفاع و عمق پله‌ها (b,a) و شعاع ستاره-چرخها و نصف ضخامت نگهدارنده چرخها، می‌توان کمترین مقدار شعاع چرخهای کوچک ربات استاره-چرخ با پله، به کمک شکل الف - 3 محاسبه کرد.

با توجه به مثلث ABC در شکل الف - 3 می‌توان نوشت:

$$\angle ACB + \angle ABC = 90^\circ \quad (\text{الف-8})$$

همچنین با توجه به مثلث OBC در شکل (الف - 3)

می‌توان نوشت:

$$\angle OBC = \angle OCB = 30^\circ \rightarrow$$

$$\angle ACB = \theta' + 30^\circ \quad \& \quad \angle ABC = \theta + 30^\circ \quad (\text{الف-9})$$

با استفاده از روابط (الف-8) و (الف-9) می‌توان نوشت:

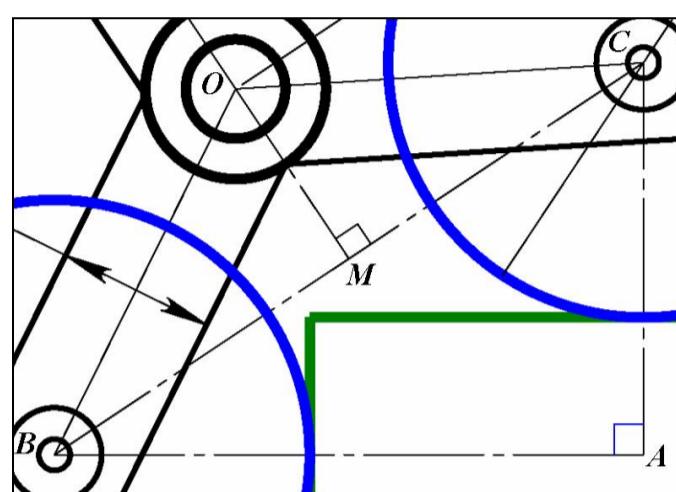
$$(8) \rightarrow \theta + \theta' = 30^\circ \rightarrow \theta' = 30^\circ - \theta \quad (\text{الف-9})$$

$$(\text{الف-10})$$

13- ضمیمه الف

الف - 1 - محاسبه R

با در دست داشتن ارتفاع و عمق پله‌ها (b,a) می‌توان شعاع ستاره-چرخ (R) را به کمک شکل الف - 1 محاسبه کرد.



شکل الف - 1 بزرگنمایی شکل 3

با توجه به مثلث OCM در شکل الف - 1 می‌توان نوشت:

$$OC=R \quad \& \quad \angle OCM=30^\circ \rightarrow CM = R \cos(30^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} R \quad (\text{الف-1})$$

و همچنین می‌دانیم که:

$$BC = 2CM \quad (\text{الف-2})$$

با استفاده از روابط (الف-1) و (الف-2) می‌توان نوشت:

$$(3) \rightarrow BC = \sqrt{3}R \quad (\text{الف-2}), (\text{الف-1}) \quad (\text{الف-3})$$

همچنین با توجه به مثلث ABC داریم:

$$AB=b \quad \& \quad AC=a \rightarrow BC^2 = a^2 + b^2 \rightarrow BC = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (\text{الف-4})$$

اکنون با استفاده از روابط (الف-3) و (الف-4) می‌توان نوشت:

$$(5) \rightarrow R = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{3}} \quad (\text{الف-4}), (\text{الف-3}) \quad (\text{الف-5})$$

الف - 2 - محاسبه r_{\max}

با در دست داشتن ارتفاع و عمق پله (b,a) و شعاع ستاره-چرخها، می‌توان بیشترین شعاع چرخهای کوچک ربات

$$\Rightarrow X = \frac{\sqrt{3}b + 3a}{6R} \Rightarrow \cos(\theta) = \frac{\sqrt{3}b + 3a}{6R} \quad (15)$$

با توجه به (الف-14) می‌توان نوشت:

$$(14) \Rightarrow \sin(\theta) = \frac{2b}{3R} - \frac{\sqrt{3}}{3} \cos(\theta) \quad (16)$$

$$\Rightarrow \tan(\theta) = \frac{2b}{3R \cos(\theta)} - \frac{\sqrt{3}}{3} \quad (17)$$

می‌دانیم:

$$BG = r_{\min} = BF + FG \quad (18)$$

با توجه به مثلث BEF در شکل (الف-3) می‌توان

نوشت:

$$BF = \frac{BE}{\cos(\theta)} = \frac{t}{\cos(\theta)} \quad (19)$$

همچنین با توجه به مثلث HGF در شکل (الف-3)

می‌توان نوشت:

$$HG = a - r_{\min} \quad \& \quad FG = HG * \tan(\theta) \Rightarrow$$

$$FG = (a - r_{\min}) \tan(\theta) \quad (20)$$

با استفاده از روابط (الف-18)، (الف-19) و (الف-20)

می‌توان نوشت:

$$(الف-18), (الف-19), (الف-20) \Rightarrow$$

$$r_{\min} = \frac{t}{\cos(\theta)} + (a - r_{\min}) \tan(\theta) \quad (21)$$

و همچنین با استفاده از روابط (الف-17) و (الف-21)

می‌توان نوشت:

$$(الف-21), (الف-21)$$

$$\Rightarrow r_{\min} = \frac{t}{\cos(\theta)} + (a - r_{\min}) \left(\frac{2b}{3R \cos(\theta)} - \frac{\sqrt{3}}{3} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{3tR + 2b(a - r_{\min})}{3R \cos(\theta)} = \frac{\sqrt{3}}{3}a + \frac{3 - \sqrt{3}}{3}r_{\min} \quad (22)$$

اکنون با کمک (الف-15) می‌توان نوشت:

$$(الف-22), (الف-22) \Rightarrow$$

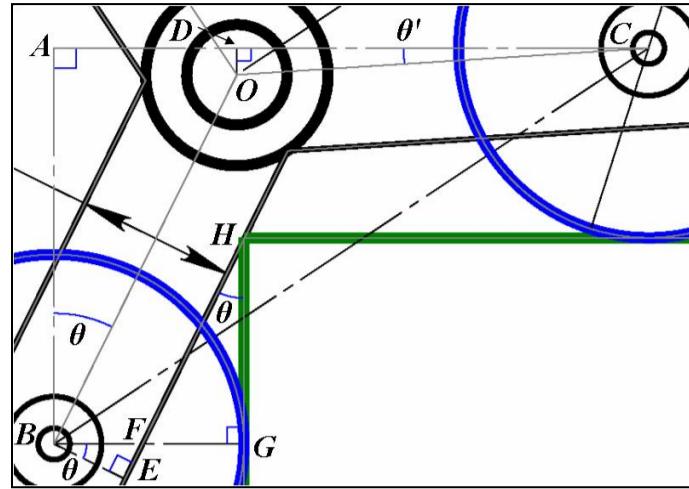
$$\frac{6tR + 4b(a - r_{\min})}{\sqrt{3}b + 3a} = \frac{\sqrt{3}}{3}a + \frac{3 - \sqrt{3}}{3}r_{\min}$$

\Rightarrow

$$3tR + 4ab - 4br_{\min} = ab + \sqrt{3}a^2 + (\sqrt{3} - 1)br_{\min} + (3 - \sqrt{3})ar_{\min}$$

$$\Rightarrow 6tR + (3b - \sqrt{3}a)a = [(3 - \sqrt{3})a + (3 + \sqrt{3})b]r_{\min} \Rightarrow$$

$$r_{\min} = \frac{6tR + a(3b - \sqrt{3}a)}{(3 - \sqrt{3})a + (3 + \sqrt{3})b} \quad (23)$$



شکل - الف - 3 بزرگنمایی شکل 5

همچنین با توجه به مثلث ODC در شکل الف-3 و (الف-10) می‌توان نوشت:

$$CO=R \Rightarrow DC=R \cos(\theta')=R \cos(30-\theta) \quad (11)$$

با استفاده از (الف-11) و پاره خط AD در شکل الف-3 داریم:

$$AD=AC-DC \quad & \quad AC=b \Rightarrow AD=b-R \cos(30-\theta) \quad (12)$$

و از طرف دیگر:

$$OB=R \Rightarrow AD=R \sin(\theta) \quad (13)$$

اکنون با استفاده از روابط (الف-12) و (الف-13) می‌توان نوشت:

$$(الف-13) \Rightarrow R \sin(\theta)=b-R \cos(30-\theta) \Rightarrow$$

$$R \sin(\theta)=b-R \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta)+\frac{1}{2} \sin(\theta) \right]$$

$$\Rightarrow \frac{3}{2}R \sin(\theta)=b-\frac{\sqrt{3}}{2}R \cos(\theta) \quad (14)$$

$$\Rightarrow \frac{3}{2}R \sin^2(\theta)=[b-\frac{\sqrt{3}}{2}R \cos(\theta)]^2 \Rightarrow$$

$$\frac{9}{4}R^2(1-\cos^2(\theta))=b^2+\frac{3}{4}R^2 \cos^2(\theta_2)-\sqrt{3}bR \cos(\theta_2)$$

$$\cos(\theta)=X \Rightarrow \frac{9}{4}R^2-\frac{9}{4}R^2X^2-b^2-\frac{3}{4}R^2X^2-\sqrt{3}bRX=0$$

$$\Rightarrow 3R^2X^2-\sqrt{3}bRX+(b^2-\frac{9}{4}R^2)=0 \Rightarrow$$

$$X=\frac{\sqrt{3}bR \pm \sqrt{27R^4-9b^2R^2}}{3R^2} \Rightarrow X=\frac{\sqrt{3}b \pm 3\sqrt{3R^2-b^2}}{6R}$$

$$\& \quad 3R^2-b^2=3(\frac{a^2+b^2}{3})-b^2=a^2 \Rightarrow X=\frac{\sqrt{3}b \pm 3a}{6R}$$

$$b=1.5a \Rightarrow \sqrt{3}b-3a=(1.5 * \sqrt{3}-3)a=-0.4a < 0 \Rightarrow X < 0$$

$$\Rightarrow \cos(\theta) < 0 \Rightarrow 90^\circ < \theta < 270^\circ$$

غیر قابل قبول است (همیشه $\theta < 90^\circ$)

(الف-15)، (الف-16)

$$\Rightarrow \sin(\theta) = \frac{2b}{3R} - \frac{\sqrt{3}}{3} \left(\frac{\sqrt{3}b + 3a}{6R} \right) \Rightarrow \sin(\theta) = \frac{3b - \sqrt{3}a}{6R}$$

(الف-28)

همچنین با استفاده از روابط (الف-15)، (الف-16) و (الف-27) می‌توان نوشت:

(الف-28) \rightarrow (الف-15)

$$t_{1\max} = r \left(\frac{\sqrt{3}b + 3a}{6R} \right) - (a - r) \left(\frac{3b - \sqrt{3}a}{6R} \right) \Rightarrow$$

$$t_{1\max} = \frac{ar(3 - \sqrt{3}) + br(3 + \sqrt{3}) + a(\sqrt{3}a - 3b)}{6R} \Rightarrow$$

$$t_{1\max} = \frac{3r(a + b) - \sqrt{3}r(a - b) + a(\sqrt{3}a - 3b)}{6R}$$

(الف-29)

الف-5- محاسبه a_{\max}

با در دست داشتن شعاع چرخها و شعاع ستاره-چرخها، می‌توان بیشترین ارتفاع پله‌ای را که ربات توانایی عبور از آن را دارد، به کمک شکل الف-5 محاسبه کرد.

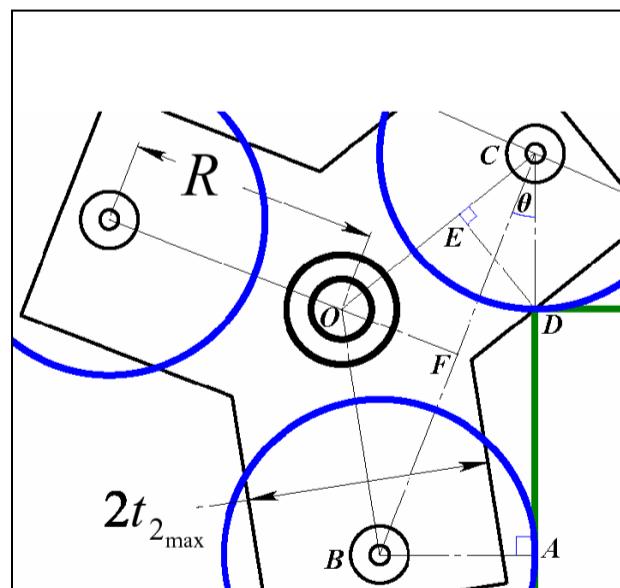
با توجه به مثلث CAB در شکل الف-5 می‌توان این مقدار مورد نظر را محاسبه کرد:

$$AC = a_{\max} \quad BC = \sqrt{3}R \quad AB = r \Rightarrow$$

$$a_{\max}^2 = 3R^2 - r^2 \Rightarrow$$

$$a_{\max} = \sqrt{3R^2 - r^2}$$

(الف-30)



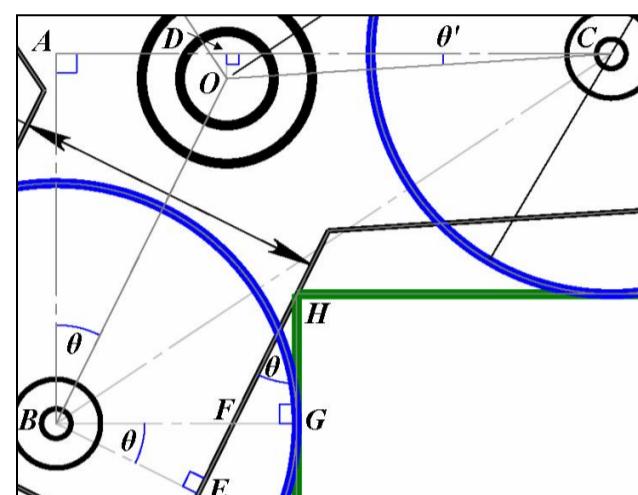
شکل-الف-5 بزرگنمایی شکل 7

الف-6- محاسبه $t_{2\max}$

با در دست داشتن ارتفاع و عمق پله (b,a) و شعاع چرخها می‌توان نصف بیشترین ضخامت نگهدارنده چرخهای

الف-4- محاسبه $t_{1\max}$

با در دست داشتن ارتفاع و عمق پله (b,a) و شعاع چرخها، می‌توان بیشترین مقدار نصف ضخامت نگهدارنده چرخهای کوچک ربات ($t_{1\max}$) را برای جلوگیری از برخورد نگهدارنده چرخهای ستاره-چرخ با پله به کمک شکل الف-4 محاسبه کرد.



شکل-الف-4 بزرگنمایی شکل 6

در شکل الف-4 داریم:

$$BG = r = BF + FG \quad (الف-24)$$

با توجه به مثلث BEF در شکل الف-4 می‌توان نوشت:

$$BF = \frac{BE}{\cos(\theta)} = \frac{t_{1\max}}{\cos(\theta)} \quad (الف-25)$$

و همچنین با توجه به مثلث HGF در شکل الف-4 می‌توان نوشت:

$$HG = a - r \quad FG = HG * \tan(\theta) \Rightarrow$$

$$FG = (a - r) \tan(\theta) \quad (الف-26)$$

با استفاده از روابط (الف-24)، (الف-25) و (الف-26) می‌توان نوشت:

$$(الف-24), (الف-25), (الف-26) \Rightarrow$$

$$r = \frac{t_{1\max}}{\cos(\theta)} + (a - r) \tan(\theta) \Rightarrow$$

$$t_{1\max} = r \cos(\theta) - (a - r) \sin(\theta) \quad (الف-27)$$

با استفاده از روابط (الف-15) و (الف-16) می‌توان نوشت:

- on Robotics and Automation (ICRA); Vol. 3; pp 2222-2227; Washington; D.C.; U.S.A.; May 11-15, 2002.*
- [3] Moore, E.Z.; Buehler, M.; "Stable Stair Climbing in a Simple Hexapod"; *4th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots*; Karlsruhe; Germany; September 24 - 26; 2001.
- [4] Saranli, U.; Buehler, M.; Koditschek, D. E.; "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot"; *Int. J. Robotics Research*; 20 (7): 616-631; July 2001.
- [5] Altendorfer, R.; Moore, E. Z.; Komsuoglu, H.; Buehler, M.; Brown Jr. H. B.; McMordie, D.; Saranli, U.; Full, R.; Koditschek, D. E.; "RHex: A Biologically Inspired Hexapod Runner" *Autonomous Robots*; 11: 207-213; 2001.
- [6] KOYANAGI. Eiji; YUTA, Shin'ich; "A development of a six wheel vehicle for indoor and outdoor environment"; *Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics*; pp.52-63; 1999-8; Pittsburgh.
- [7] Wellman, Parris; Krovi, Venkat; Kumar, Vijay; Harwin, William; "Design of a Wheelchair with Legs for People with Motor Disabilities"; *IEEE transactions on rehabilitation engineering*; vol. 3; No. 4; December 1995.
- [8] Krovi , Venkat; Kumar , Vijay; "Modeling and Control of a Hybrid Locomotion System"; *ASME Journal of Mechanical Design*; Vol. 121; No. 3; pp. 448-455; September 1999.
- [9] Halme, Aarne; Leppnen, Ilkka; Montonen, Miso ;Ylnen, Sami; "Robot motion by simultaneously wheel and leg propulsion"; *Automation Technology Laboratory*; Helsinki University of Technology; PL 5400; 02015 HUT; Finland ; 2001
- [10] <http://biorobots.cwru.edu/>
- [11] D. Quinn, Roger; M. Nelson, Gabriel; J. Bachmann, Richard; A. Kingsley, Daniel; Offi,

ربات را برای آنکه ربات توانایی عبور از پله‌هایی با بیشترین ارتفاع ممکن (به دست آمده در 5) داشته باشد، را به کمک شکل الف - 5 محاسبه کرد.

با توجه به مثلث CDE از شکل الف - 5 می‌توان نوشت:

$$DE = t_{2\max} \quad \& \quad CD = r \quad \& \quad \angle ECD = \theta + 30^\circ \rightarrow \\ t_{2\max} = r \sin(30 + \theta) = \frac{1}{2}r \cos(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2}r \sin(\theta)$$

الف-31

همچنین با توجه به مثلث CAB در شکل الف - 5 می‌توان نوشت:

$$\sin(\theta) = \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{r}{R} \quad \& \quad \cos(\theta) = \frac{a_{\max}}{\sqrt{3}R} = \frac{\sqrt{3R^2 - r^2}}{\sqrt{3}R}$$

الف-32

و با استفاده از روابط (الف-31) و (الف-32) می‌توان نوشت:

$$(الف-31), (الف-32) \rightarrow \\ t_{2\max} = \frac{r\sqrt{3R^2 - r^2}}{2\sqrt{3}R} + \frac{r^2}{2R} = \frac{r(\sqrt{3R^2 - r^2} + \sqrt{3}r)}{2\sqrt{3}R}$$

الف-33

$$\text{به کمک (الف - 5) داریم:} \\ (الف-5) \rightarrow 3R^2 = a^2 + b^2, \quad \sqrt{3}R = \sqrt{a^2 + b^2}$$

الف-34

و با استفاده از روابط (الف-33) و (الف-34) می‌توان نوشت:

$$(الف-34), (الف-33) \rightarrow \\ t_{2\max} = \frac{r(\sqrt{a^2 + b^2 - r^2} + \sqrt{3}r)}{2\sqrt{a^2 + b^2}}$$

الف-35

13- منابع

- [1] Buehler, M.; "Dynamic Locomotion with One, Four and Six-Legged Robots"; *Invited Paper; Journal of the Robotics Society of Japan*; 20(3):15-20; April 2002.
- [2] Moore, E. Z.; Campbell, D.; Grimminger, F.; Buehler, M.; "Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod 'RHex"'; *IEEE Int. Conf.*

- [14] M. Dalvand, Mohsen; M. Moghadam, Majid; “Design and modeling of a stair climber smart mobile robot (MSRox)”; *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics* (ICAR 2003); Coimbra; Portugal; June30-July3; pp. 1062-1067; 2003.
- [15] <http://ai.eecs.umich.edu/RHex/RHexversions.html>
- [16] Moore, Z.; “Design a stair climbing controller”; Moore – Sample Projects
- John; E. Ritzmann , Roy; “Insect Designs for Improved Robot Mobility”; *Proc. 4th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots*; Berns and Dillmann eds.; Prof. Eng. Pub.; 69-76; 2001.
- [12] M. Dalvand, Mohsen; M. Moghadam, Majid; “Design and modeling of a stair climber smart mobile robot (MSRox)”; *Journal of Robotic System (Wiley Canada)*; submitted in February 2003.
- [13] M. Dalvand, Mohsen; M. Moghadam, Majid; “Stair Climbing in a Wheeled Mobile Robot (MSRox)”; *Proceedings of the 35th International Symposium on Robotics* (ISR 2004); Paris; Nord Villepinte; France; March 2004.