

عملکرد سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم زانوی مصنوعی شش میله‌ای

قطع عضو شدن از ناحیه پا، از دیرباز یکی از مشکلات انسان در طول تاریخ زندگی بشر بوده است. بنابراین طراحی درست و بهینه مکانیزم پای مصنوعی و بالاخص، پروتز زانوی مصنوعی پایدارتر، شکیلتر و کم‌مصرف‌تر از نقطه نظر گشتاور اعمالی به سیستم، برای این دسته معلولان می‌تواند بسیار مفید واقع شود. در این مطالعه انواع مکانیزم‌های زانوی شش میله‌ای از دیدگاه سینماتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته و بهبود و تضعیف عملکردشان با هم مقایسه می‌شوند، و مکانیزم زانویی که بهترین عملکرد سینماتیکی و دینامیکی را همزمان ارائه می‌دهد به عنوان مکانیزم زانوی بهینه انتخاب می‌شود.

نرجس قائمی^۱

کارشناسی ارشد

مرتضی دردل^۲

استادیار

محمدحسن قاسمی^۳

استادیار

حسن ظهور^۴

استاد

واژه های راهنما: زانوی مصنوعی، مکانیزم شش میله‌ای، سینماتیک و دینامیک

۱- مقدمه

زانوی مصنوعی با مکانیزم چهار میله‌ای به طور وسیعی توسط دانشمندان مورد بررسی قرار گرفته که معلولان می‌توانند با توجه به نوع عملکرد مورد انتظارشان از این زانوها بهره‌مند شوند [۱] تا [۱۰]. یکی از اشکالات مدل زانوی چهارمیله‌ای، در برخی حرکات مرسوم در کشورهای اسلامی همچون نماز خواندن، چهارزانو نشستن و... می‌باشد که برای رفع نقایص آن از مدل زانوی شش‌عضوی استفاده می‌شود. این مکانیزم در برخی از زانوهای مصنوعی در سال‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته، اما فقط تعداد محدودی از مقالات در مورد عملکرد خاص این مکانیزم به تجزیه و تحلیل پرداخته‌اند، که از آن جمله می‌توان موارد زیر را ذکر کرد:

تحقیقاتی که پاتیل و همکارش انجام دادند، که علاوه بر راه رفتن، حالت نشستن چهارزانو را هم مد نظر قرار داده‌اند [۱۱]. و نیز مطالعاتی که دی ون جین انجام داده، که طراحی زانو ابتدا از طریق روابط سینماتیکی و سپس از طریق روابط دینامیکی برای به کار بردن حداقل گشتاور انجام شده است [۱۲].

^۱ نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ghaemi_narges@yahoo.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل dardel@nit.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل mhghasemi@nit.ac.ir

^۴ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف zohoor@sharif.edu

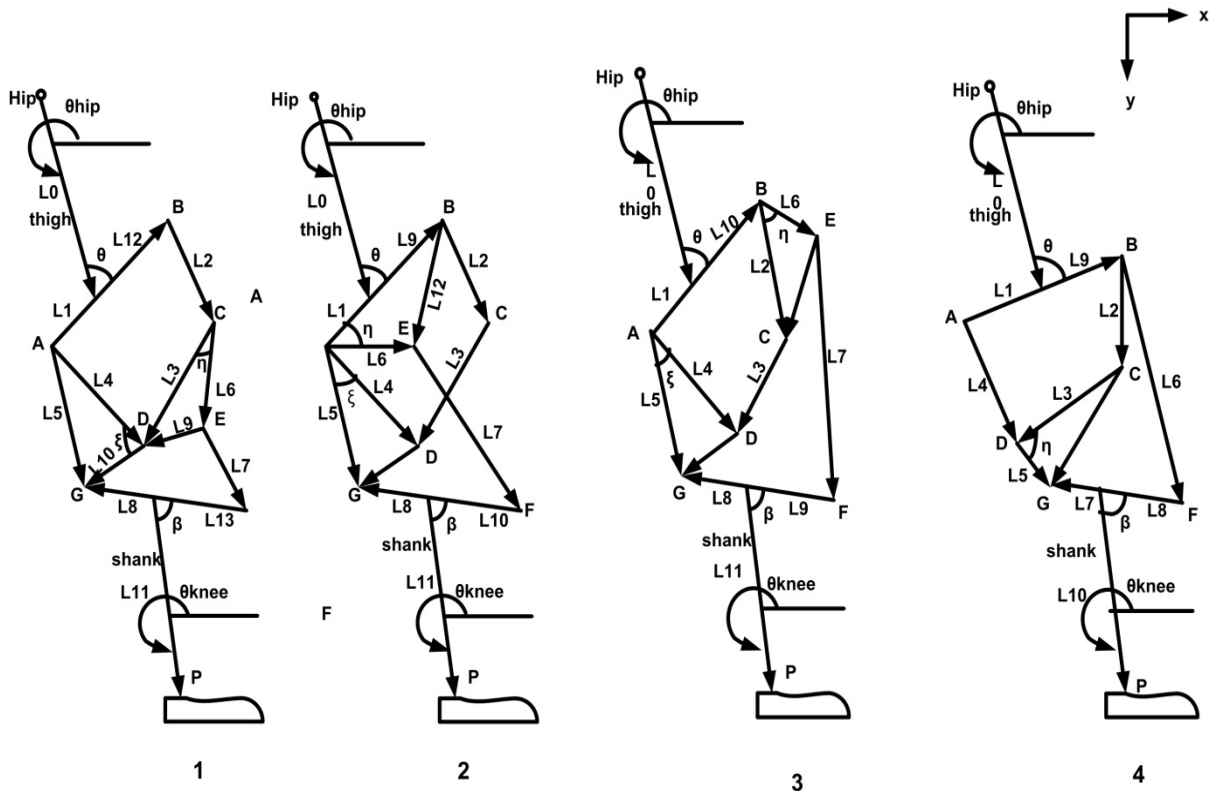
در طراحی پروتزها، مفاصل و ویژگی‌های آنها باید طوری تعیین شوند که تا حد امکان الگوی رفتاری مفاصل طبیعی را داشته باشند و در محدوده‌ی حرکتی این مفاصل قرار بگیرند. همچنین در مورد طراحی زانوی مصنوعی فرضیه‌ی شبیه بودن الگوی گشتاور مفاصل نسبت به شباهت الگوی سینماتیکی از اهمیت بیشتری برخوردار است [۱۳].

در این مطالعه ابتدا پارامترهای طراحی سینماتیکی مجهول در چهار نوع از مکانیزم‌های شش‌میله‌ای وات و استفنسون با استفاده از روابط سینماتیکی و بهینه‌سازی معین شده، که بهینه‌سازی در طراحی سینماتیکی با هدف حداکثر تطابق بین مسیر حرکت مفصل مچ پای مصنوعی با شرایط نرمال انجام شده است. مسیر مچ پای طبیعی انسان با به کار بردن نتایج آزمایشگاهی مربوط به زوایای مفصل ران و مفصل زانو و استفاده از روش سینماتیک معکوس و شبیه‌سازی کامپیوتری ترسیم می‌شود [۱۴]. در ادامه تجزیه و تحلیل دینامیکی مکانیزم‌ها، با هدف تمرکز بر حصول حداقل گشتاور مورد نیاز موتور و تعیین محل مفصلی که مقدار این گشتاور در آن به حداقل مقدار خود می‌رسد انجام می‌پذیرد. سرانجام چهار نوع مکانیزم شش‌میله‌ای، از لحاظ عملکرد سینماتیکی و دینامیکی با هم مقایسه می‌شوند و در نهایت مکانیزمی که بهترین عملکرد سینماتیکی و دینامیکی را به طور همزمان ارائه می‌دهد به عنوان مکانیزم مطلوب و بهینه انتخاب می‌شود.

۲- معادلات برداری حاکم بر مکانیزم‌ها

معادلات برداری حاکم بر مکانیزم‌های شش‌میله‌ای در شکل (۱) شامل دو حلقه برداری به صورت ذیل است، که با توجه به غیر خطی بودن معادلات برای حل باید از روش بسط تیلور سینوسی و کسینوسی استفاده کرد.

نوع ۱	$\vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \vec{L}_3 - \vec{L}_4 = 0$ $\vec{L}_7 + \vec{L}_8 - \vec{L}_9 - \vec{L}_{10} = 0$	(۱)
نوع ۲	$\vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \vec{L}_3 - \vec{L}_4 = 0$ $\vec{L}_6 + \vec{L}_7 + \vec{L}_8 - \vec{L}_5 = 0$	(۲)
نوع ۳	$\vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \vec{L}_3 - \vec{L}_4 = 0$ $\vec{L}_1 + \vec{L}_6 + \vec{L}_7 + \vec{L}_8 - \vec{L}_5 = 0$	(۳)
نوع ۴	$\vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \vec{L}_3 - \vec{L}_4 = 0$ $\vec{L}_1 + \vec{L}_6 + \vec{L}_7 - \vec{L}_4 - \vec{L}_5 = 0$	(۴)



شکل ۱- ساختار چهار نوع از مکانیزم‌های شش‌میله‌ای زانوی مصنوعی

مجهولات مسئله در مکانیزم‌های نوع ۱، ۲ و ۳ شامل $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_7$ و در مکانیزم نوع ۴ شامل $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_6$ است، که همه‌ی زوایا نسبت به محور افق سنجیده می‌شوند. لازم به ذکر است که θ_i زاویه مربوط به میله نام است که با جهت مثبت محور افق می‌سازد. پارامترهای طراحی مجهول در هر یک از چهار مکانیزم، که باید از طریق بهینه‌سازی معلوم شوند، به صورت زیر بیان می‌شوند:

جدول ۱- پارامترهای طراحی سینماتیکی در مکانیزم‌های شش‌میله‌ای

مکانیزم نوع ۱	$l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_7 \ l_8 \ l_9 \ l_{10} \ l_{11} \ l_{12} \ l_{13} \ \eta \ \xi \ \theta \ \beta$
مکانیزم نوع ۲	$l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5 \ l_6 \ l_7 \ l_8 \ l_9 \ l_{10} \ l_{11} \ \eta \ \xi \ \theta \ \beta$
مکانیزم نوع ۳	$l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5 \ l_6 \ l_7 \ l_8 \ l_9 \ l_{10} \ l_{11} \ \eta \ \xi \ \theta \ \beta$
مکانیزم نوع ۴	$l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5 \ l_6 \ l_7 \ l_8 \ l_9 \ l_{10} \ \eta \ \theta \ \beta$

۳- حل مسئله با استفاده از سینماتیک معکوس

در این قسمت به علت تشابه تحلیل مسئله در چهار مکانیزم، فقط روابط مربوط به مکانیزم نوع ۱ به تفصیل بیان می‌شود. بنابراین با نوشتن معادلات (۱) به صورت بردارهای مختلط و با جداسازی بخش حقیقی و موهومی در آنها، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
 & (L_{12} + L_1)e^{i\theta_1} + L_2e^{i\theta_2} + L_3e^{i\theta_3} - L_4e^{i\theta_4} = 0 \\
 & L_7e^{i\theta_7} + L_8e^{i\theta_8} - L_9e^{i\theta_9} - L_{10}e^{i\theta_{10}} = 0 \\
 \text{نوع ۱} \quad & (L_{12} + L_1) \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 - L_4 \cos \theta_4 = 0 \\
 & (L_{12} + L_1) \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 - L_4 \sin \theta_4 = 0 \\
 & L_7 \cos \theta_7 + L_8 \cos \theta_8 - L_9 \cos \theta_9 - L_{10} \cos \theta_{10} = 0 \\
 & L_7 \sin \theta_7 + L_8 \sin \theta_8 - L_9 \sin \theta_9 - L_{10} \sin \theta_{10} = 0
 \end{aligned} \tag{۵}$$

از آنجایی که این معادلات از دسته‌ی معادلات غیر خطی هستند، برای حل باید بسط تیلور سینوس و کسینوس به کار برده شود. در نهایت با حل معادلات ماتریسی زوایای مجهول به دست می‌آیند. با توجه به شکل (۱) مختصات مچ پا یعنی نقطه‌ی P، در مکانیزم شش‌میله‌ای نوع ۱ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 x_P &= x_{\text{hip}} + l_0 \cos \theta_{\text{hip}} + l_{12} \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_6 \cos \theta_6 \\
 &+ l_7 \cos \theta_7 + l_{13} \cos \theta_8 + l_{11} \cos \theta_{\text{knee}} \\
 y_P &= y_{\text{hip}} + l_0 \sin \theta_{\text{hip}} + l_{12} \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_6 \sin \theta_6 \\
 &+ l_7 \sin \theta_7 + l_{13} \sin \theta_8 + l_{11} \sin \theta_{\text{knee}}
 \end{aligned} \tag{۶}$$

در معادلات مذکور، l_0 طول ران در فرد معلول می‌باشد که در اینجا ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در فرایند بهینه‌سازی، تابع هدف به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\text{Min } F(x) = \sum_{i=1}^n \left((x_{p_i} - x_{RP_i})^2 + (y_{p_i} - y_{RP_i})^2 \right) \tag{۷}$$

در تابع فوق n تعداد نقاط دقت در سیکل راه رفتن است، که در اینجا $n=21$ اتخاذ شده است (x_{RP_i}, y_{RP_i}) ، مختصات نقاط مرجع مورد انتظار مچ پا، در راه رفتن طبیعی انسان است، که از طریق داده‌های تجربی و آزمایشگاهی به دست آمده‌اند. (x_{p_i}, y_{p_i}) ، مختصات محاسبه شده مسیر مچ پای مصنوعی در طی فرایند بهینه‌سازی است.

در نهایت با اعمال قیود در طول میله‌ها و زوایای مربوطه و انجام روش‌های بهینه‌سازی، پارامترهای طراحی سینماتیکی مجهول در چهار نوع از مکانیزم‌های شش‌میله‌ای معین می‌شوند، و طراحی سینماتیکی زانوی مصنوعی با مکانیزم شش‌میله‌ای در این مرحله خاتمه می‌یابد.

لازم به ذکر است که بهینه‌سازی، در نرم‌افزار متلب، و با استفاده از تابع `fmincon` انجام گرفته است.

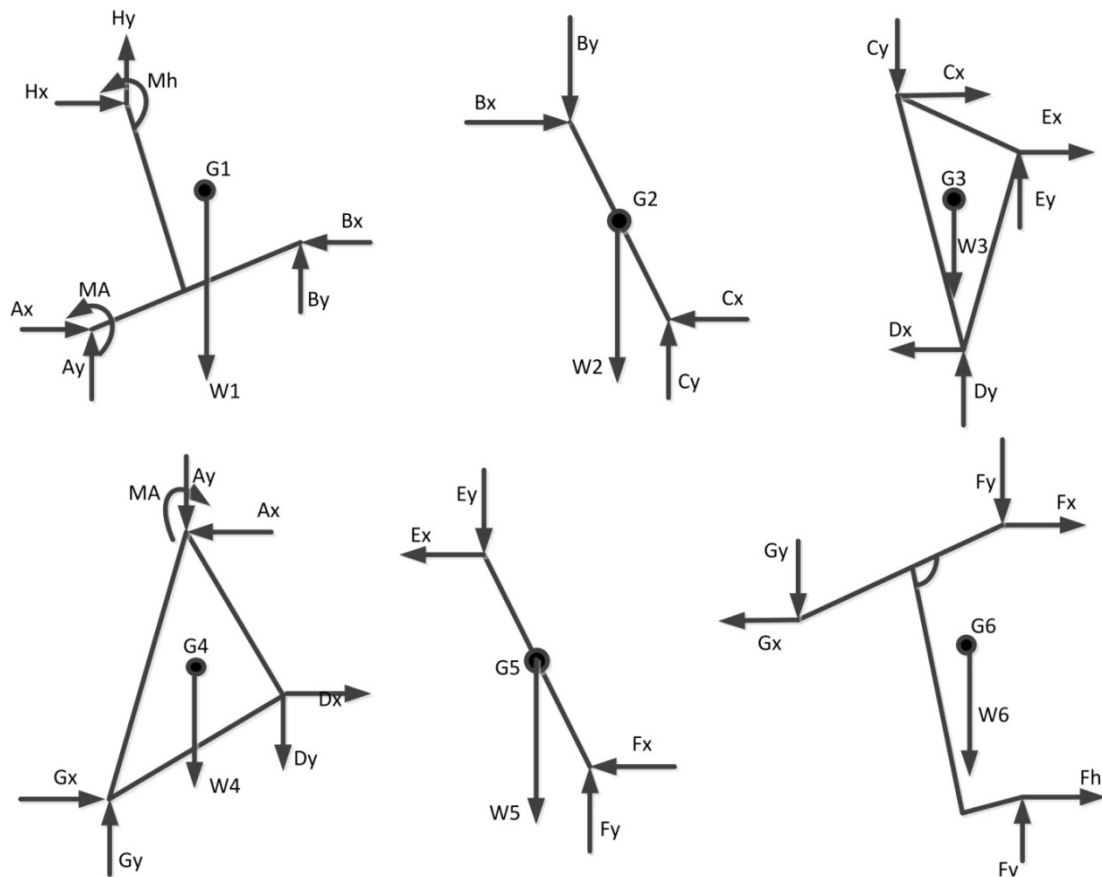
۴- تحلیل دینامیکی مکانیزم زانوی مصنوعی شش‌میله‌ای

تجزیه و تحلیل دینامیکی مکانیزم زانوی شش‌میله‌ای با هدف تمرکز برای دستیابی به حداقل گشتاور مورد نیاز موتور و تعیین محل مفصلی که در آن با اعمال این گشتاور به این هدف نائل می‌شویم انجام می‌گیرد. در این بخش در راستای این اهداف، ابتدا با مشتق‌گیری از معادلات ۱ تا ۴ و به کار بردن سینماتیک معکوس سرعتها و شتابهای زاویه‌ای مجهول میله‌ها به دست می‌آید، سپس به تبیین اعمال قوانین نیوتن در اجزای مکانیزم پرداخته می‌شود.

شایان ذکر است که تمامی نتایج براساس شرایط راه رفتن نرمال انسان یعنی سرعت ثابت ۱ m/s و تقریباً بدون شتاب در نظر گرفته شده است.

۴-۱- معادلات نیرو و قوانین نیوتن حاکم بر مکانیزم شش میله‌ای

در مکانیزم پای شش میله‌ای، هجده معادله و هجده مجهول به شرح زیر وجود دارد: مجهولات مسئله شامل نیروهای وارد بر مفاصل و گشتاور مفصل ران و نیز گشتاور مورد نیاز موتور می‌باشند. و معلومات مسئله نیز شامل وزن میله‌ها، شتاب‌های زاویه‌ای، شتاب‌های خطی، نیروی عمودی سطح و نیروی اصطکاک است، که از داده‌های تجربی و آزمایشگاهی، برای یک مورد خاص ممکن است در نظر گرفته شود [۱۵]. همانطور که از دیاگرام آزاد شکل (۲) ملاحظه می‌شود، اعمال قوانین نیوتن به صورت زیر انجام می‌گیرد:



شکل ۲- دیاگرام آزاد مکانیزم شش میله ای نوع ۱ با گشتاور اعمالی در مفصل A

$$\sum F_x = H_x - B_x + A_x = (m_{L_0} + m_{L_1})a_{G_{1x}} \quad (۸)$$

$$\sum F_y = H_y + B_y + A_y - W_1 = (m_{L_0} + m_{L_1})a_{G_{1y}} \quad (۹)$$

$$\sum M = M_A + M_h + x_{h/G_1}H_y - y_{h/G_1}H_x + x_{A/G_1}A_y - y_{A/G_1}A_x + x_{B/G_1}B_y + y_{B/G_1}B_x \quad (10)$$

$$= J_{G_1}\ddot{\theta}_h$$

$$\sum F_x = B_x - C_x = m_2 a_{G_2x} \quad (11)$$

$$\sum F_y = C_y - B_y - W_2 = m_2 a_{G_2y} \quad (12)$$

$$\sum M = -x_{B/G_2}B_y - y_{B/G_2}B_x + x_{C/G_2}C_y + y_{C/G_2}C_x = J_{G_2}\ddot{\theta}_2 \quad (13)$$

$$\sum F_x = C_x + E_x - D_x = m_3 a_{G_3x} \quad (14)$$

$$\sum F_y = -C_y + E_y + D_y - W_3 = m_3 a_{G_3y} \quad (15)$$

$$\sum M = x_{E/G_3}E_y - y_{E/G_3}E_x - x_{C/G_3}C_y - y_{C/G_3}C_x + x_{D/G_3}D_y + y_{D/G_3}D_x = J_{G_3}\ddot{\theta}_3 \quad (16)$$

$$\sum F_x = -A_x + D_x + G_x = m_4 a_{G_4x} \quad (17)$$

$$\sum F_y = -A_y - D_y + G_y - W_4 = m_4 a_{G_4y} \quad (18)$$

$$\sum M = -M_A - x_{A/G_4}A_y + y_{A/G_4}A_x - x_{D/G_4}D_y - y_{D/G_4}D_x + x_{G/G_4}G_y - y_{G/G_4}G_x = J_{G_4}\ddot{\theta}_4 \quad (19)$$

$$\sum F_x = -E_x - F_x = m_5 a_{G_5x} \quad (20)$$

$$\sum F_y = -E_y + F_y - W_5 = m_5 a_{G_5y} \quad (21)$$

$$\sum M = -x_{E/G_5}E_y + y_{E/G_5}E_x + x_{F/G_5}F_y + y_{F/G_5}F_x = J_{G_5}\ddot{\theta}_5 \quad (22)$$

$$\sum F_x = F_x + F_h - G_x = m_6 a_{G_6x} \quad (23)$$

$$\sum F_y = -F_y + F_v - G_y - W_6 = m_6 a_{G_6y} \quad (24)$$

$$\sum M = -x_{G/G_6}G_y + y_{G/G_6}G_x - x_{F/G_6}F_y - y_{F/G_6}F_x + x_{T/G_6}F_v - y_{T/G_6}F_h = J_{G_6}\ddot{\theta}_6 \quad (25)$$

با حل همزمان معادلات مذکور گشتاورها و نیروهای مجهول مفاصل معین می‌شوند.

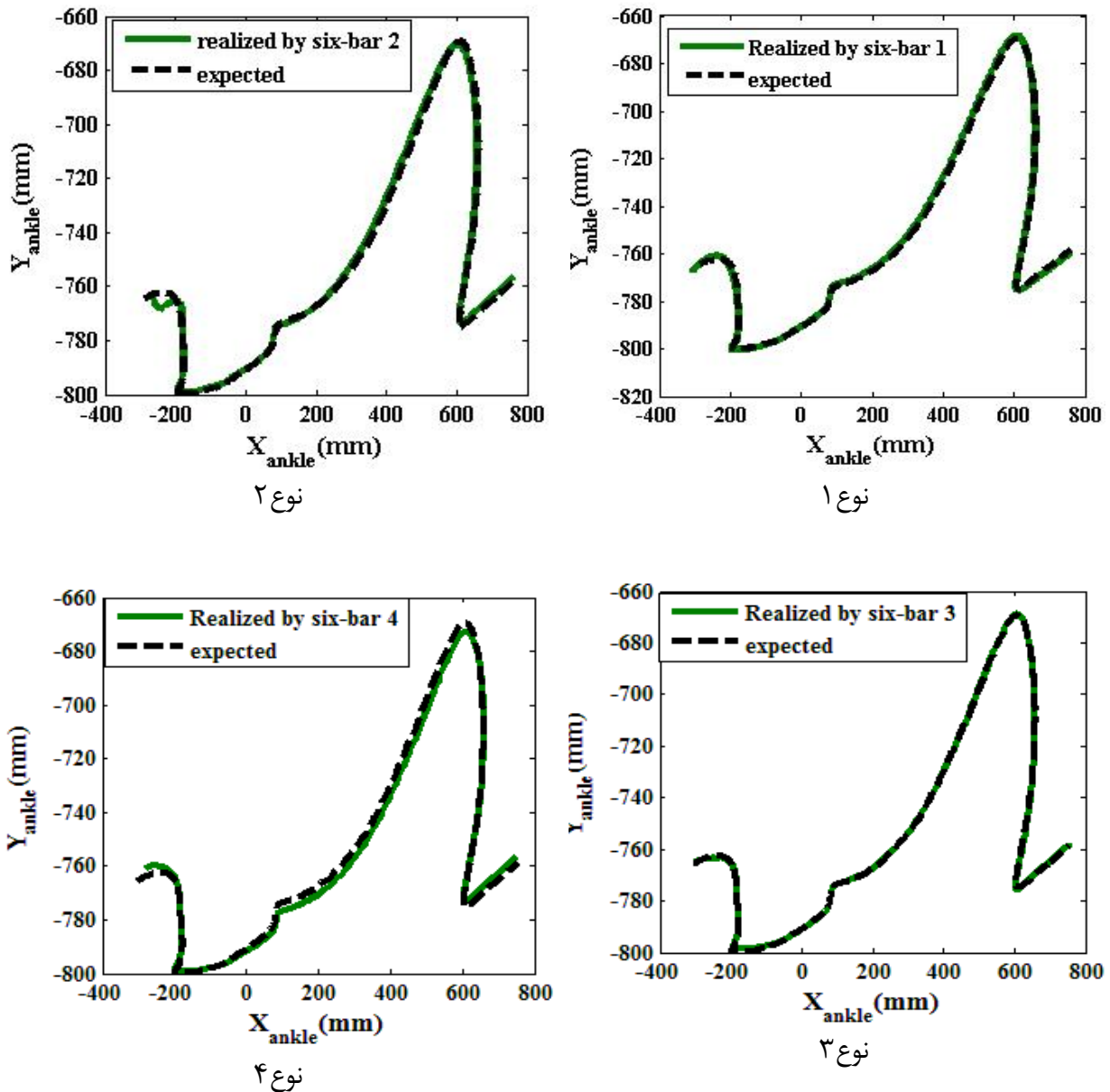
در معادلات مزبور M_A گشتاور ورودی مکانیزم است که از طریق موتور در مفصل A وارد می‌شود. با حل معادلات مشابه برای مفاصل B، G و F، گشتاورهای نظیر M_B ، M_G و M_F مشخص می‌شوند، که از بین آنها مفصلی مطلوب است که در آن گشتاور موتور به حداقل مقدار خود می‌رسد. با انجام تحلیل‌های مشابه و حل معادلات ماتریسی برای سه مکانیزم دیگر گشتاورهای مورد نیاز موتور در آنها نیز معلوم می‌شوند.

۵- بحث پیرامون نتایج عملکرد سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم‌های زانوی مصنوعی

در این بخش ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرکت مفصل مچ پای واقعی ارائه شده، که نتایج حاصل از همه‌ی شبیه‌سازی‌های حرکت مفصل مچ پای مصنوعی نسبت به آن سنجیده می‌شود، سپس با مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های سینماتیکی و دینامیکی چهار مکانیزم شش‌میله‌ای پای مصنوعی، مزایا و معایب هر یک از پنج مکانیزم به تفصیل بیان خواهد شد، و در نهایت مکانیزمی که هم از حیث دینامیکی و هم از نقطه نظر سینماتیکی عملکرد بهتری را ارائه می‌دهد، به عنوان مکانیزم مطلوب انتخاب می‌شود.

با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، مسیر ردیابی شده‌ی مچ پا توسط مکانیزم زانوی شش‌میله‌ای نوع ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. همچنین مقادیر پارامترهای سینماتیکی در هر چهار مکانیزم در جدول (۲) مشخص شده‌اند. همانطور که از نتایج جدول (۳) برمی‌آید، در شرایط طراحی یکسان بهترین

عملکرد سینماتیکی از حیث ردیابی مسیر مورد انتظار مچ پای نرمال مربوط به مکانیزم زانوی شش میله‌ای نوع ۱ می‌باشد و پس از آن مکانیزم شش میله‌ای نوع ۳ با اندکی تفاوت در جایگاه دوم قرار می‌گیرد.



شکل ۳- مسیر مچ پا در چهار نوع از مکانیزم‌های زانوی شش میله‌ای

مقادیر گشتاور کنترلی موتور نیز در هر چهار نوع مکانیزم شش میله‌ای در مفصل A، B، G و F در شکل‌های (۴) تا (۷) ترسیم شده است.

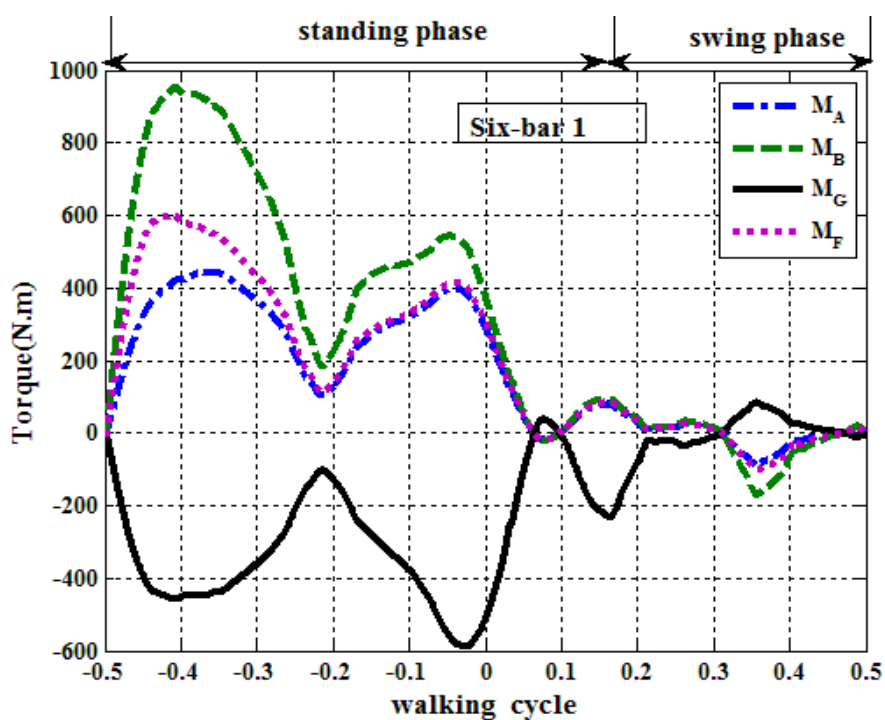
در مکانیزم نوع ۱ با پارامترهای طراحی معلوم، اعمال گشتاور کنترلی به هر چهار مفصل A، B، G و F امکان‌پذیر است. اما امکان دسترسی به حداقل گشتاور کنترلی تنها در مفصل A وجود دارد و پس از آن با اندکی تفاوت مفصل F و G حائز این شرایط هستند. افزایش مصرف انرژی با اعمال این گشتاور در مفصل B محسوس می‌باشد شکل (۴).

جدول ۲- مقادیر به دست آمده پارامترهای سینماتیکی در مکانیزم‌های شش‌میله‌ای

(mm)	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	l_9	l_{10}	l_{11}	l_{12}	l_{13}
نوع ۱	۳۵/۲	۴۸	۴۸/۴	۴۰/۴	-	-	۴۰/۴	۴۸	۵۳	۳/۳	۳۸۲/۶	۳۳	۳۰
نوع ۲	۳۴/۸	۷۱	۶۶	۴۰/۵	۲۵	۴۳/۵	۷۰	۵۱/۵	۲۵/۷	۲۴	۴۰/۹	-	-
نوع ۳	۱۶	۲۵	۳۱	۳۸/۸	۱۸/۸	۱۱/۷	۱۰	۱۵	۱۰	۱۰	۳۹۶/۵	-	-
نوع ۴	۴۰	۴۳	۲۰	۴۹	۴۵	۲۰	۲۷/۴	۱۰/۲۲	۱۰	۳۹۴/۵۸			
زوایا (Rad)	η	ξ	θ	β									
نوع ۱	۱/۹	۰/۱۷	۰/۶۹۸	۰/۶۹۸									
نوع ۲	۲/۲۶	۰/۱۷	۱/۵۷	۱/۳۴									
نوع ۳	۰/۱۷	۱	۱/۱۶	۱/۵۷									
نوع ۴	۰/۲۶۲	-	۰/۶۹۸	۰/۶۹۸									

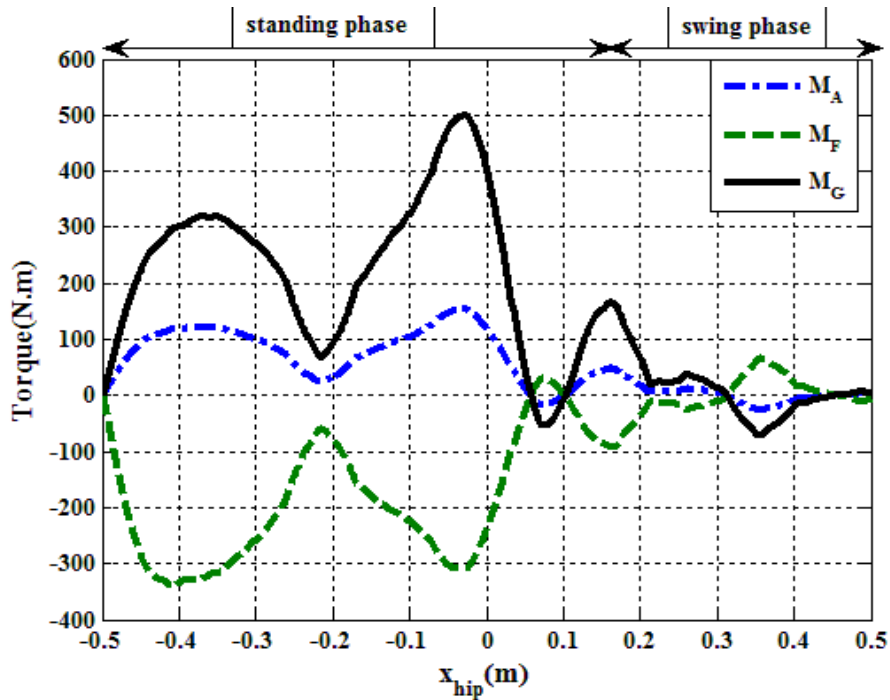
جدول ۳- مقدار خطای اندازه‌گیری شده در ردیابی مسیر مورد انتظار مچ پا در انواع مکانیزم زانو

نوع مکانیزم زانو	شش‌میله‌ای نوع ۱	شش‌میله‌ای نوع ۲	شش‌میله‌ای نوع ۳	شش‌میله‌ای نوع ۴
نرم خطای محاسبه در ردیابی مسیر مورد انتظار	41.74×10^{-6}	1476×10^{-6}	43.9×10^{-6}	691.6×10^{-6}

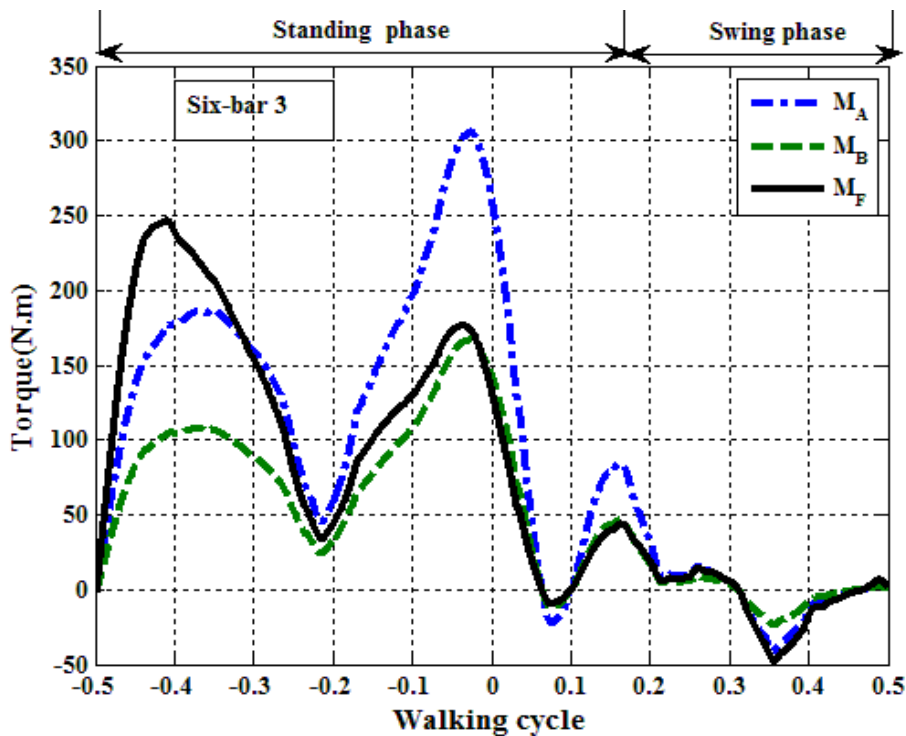


شکل ۴- گشتاور کنترلی در مکانیزم زانوی شش‌میله‌ای نوع ۱

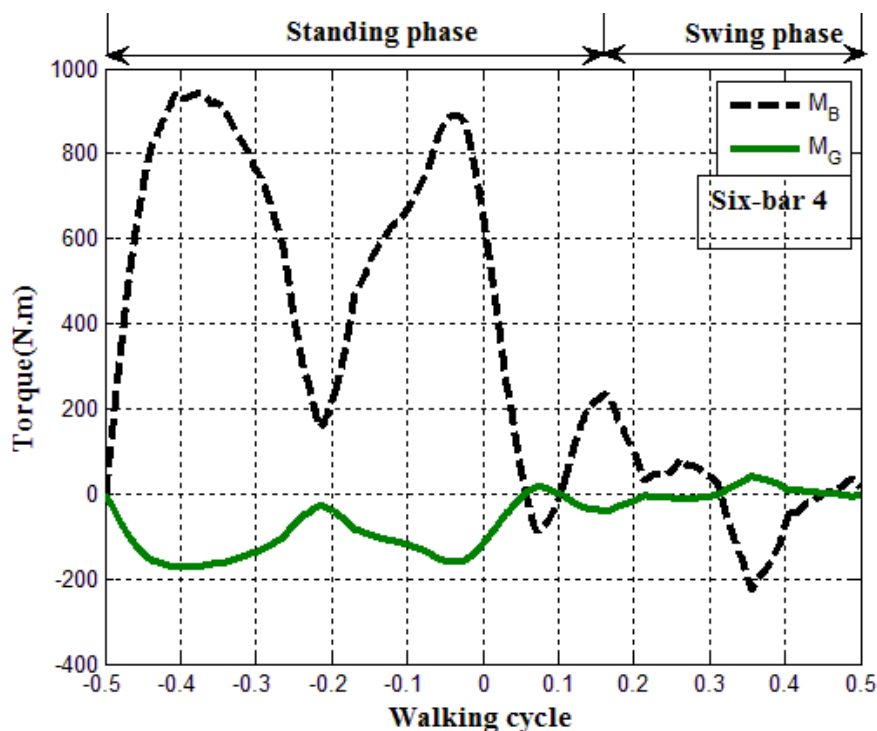
در مکانیزمهای نوع ۲ و ۳ و ۴ همانطور که از شکل‌های (۵) تا (۷) مشهود است دستیابی به حداقل گشتاور مورد نیاز موتور به ترتیب در مفاصل A، B و G امکان‌پذیر است. بدین ترتیب این مفاصل به عنوان مفصل بهینه انتخاب می‌شوند. به عبارت دیگر با اعمال گشتاور موتور به این مفاصل می‌توان به مقادیر کمتری از انرژی در سیکل راه رفتن دست یافت.



شکل ۵- گشتاور کنترلی در مکانیزم زانوی شش‌میله‌ای نوع ۲

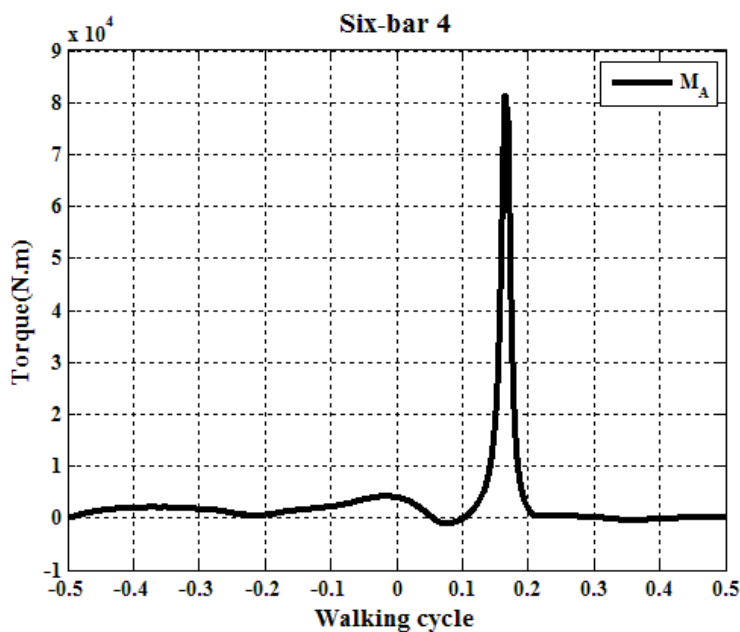


شکل ۶- گشتاور کنترلی در مکانیزم زانوی شش‌میله‌ای نوع ۳



شکل ۷- گشتاور کنترلی در مکانیزم زانوی شش میله‌ای نوع ۳

شایان ذکر است که در مکانیزم‌های نوع ۲، ۳ و ۴ گشتاور اعمالی در مفاصلی که از نقطه نظر دینامیکی پاسخگو نمی‌باشند در شکل نیامده، به عبارت دیگر مقادیر گشتاور در این مفاصل به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و مکانیزم عملکرد دینامیکی مطلوبی را ارائه نمی‌دهد. در شکل (۸) نمونه‌ای از این عملکرد نامطلوب در مکانیزم شش میله‌ای نوع ۴ نشان داده شده است.



شکل ۸- گشتاور کنترلی مفصل A در مکانیزم زانوی شش میله‌ای نوع

همچنین نتایج حاصل از طراحی دینامیکی از نقطه نظر قدرمطلق حداکثر گشتاور مصرفی بهینه در طول یک سیکل از قرار زیر است، جدول (۴).

جدول ۴- قدرمطلق حداکثر گشتاور مصرفی در مکانیزم‌های زانو

نوع مکانیزم زانو	شش‌میله‌ای نوع ۱	شش‌میله‌ای نوع ۲	شش‌میله‌ای نوع ۳	شش‌میله‌ای نوع ۴
قدرمطلق حداکثر گشتاور مصرفی ($N.m$)	$M_A=443$	$M_A=153$	$M_B=167$	$M_G=175$

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این قسمت به ارائه‌ی گزارشی از نتایج به دست آمده از مطالعات و بررسی‌های انجام شده در بخش‌های پیشین پرداخته می‌شود.

بهترین عملکرد سینماتیکی

همانطور که از جدول (۳) مشهود است، بهترین عملکرد سینماتیکی با حداقل خطا در ردیابی مسیر مچ پای واقعی، مربوط به مکانیزم شش‌میله‌ای نوع ۱ است و پس از آن با اختلاف بسیار ناچیز مکانیزم شش‌میله‌ای نوع ۳ نیز از این مزیت برخوردار است.

بهترین عملکرد دینامیکی

همانطور که از جدول (۴) ملاحظه می‌شود، دستیابی به بهترین عملکرد دینامیکی از نقطه نظر حداقل کار مصرفی، در مکانیزم شش‌میله‌ای نوع ۲ و پس از آن با تفاوت ناچیز در مکانیزم نوع ۳ امکان‌پذیر است. در هر حال مکانیزم زانویی که بهترین عملکرد سینماتیکی و دینامیکی را به صورت همزمان ارائه می‌دهد مربوط به مکانیزم شش‌میله‌ای نوع ۳ و پس از آن مکانیزم شش‌میله‌ای نوع ۲ می‌باشد.

مراجع

- [1] Radcliffe, C.W., and Deg, M., "Biomechanics of Knee Stability Control with Four-bar Prosthetic Knees", ISPO Australia Annual Meeting Melbourne, November, (2003).
- [2] Radcliffe, C., "Four-bar Linkage Prosthetic Knee Mechanisms: Kinematics, Alignment and Prescription Criteria", *Prosthetics and Orthotics International*, Vol. 18, No. 3, pp. 159-173, (1994).

- [3] Öberg, K., "Knee Mechanisms for Through-knee Prostheses", *Prosthetics and Orthotics International*, Vol. 7, No. 1, pp. 107-112, (1983).
- [4] Srinivasan, S., and Reddy, V.V., "Design and Analysis of a Knee Mechanism for Knee-ankle-foot Orthosis".
- [5] Torfason, L., and Hobson, D., "Computer Optimization of Polycentric Prosthetic Knee Mechanisms", *Bulletin of Prosthetics Research*, Vol. 10, pp. 187-201, (1975).
- [6] Gong, S., Yang, P., and Song, L., "Development of an Intelligent Prosthetic Knee Control System", in *Electrical and Control Engineering (ICECE)*, International Conference on Wuhan, (2010).
- [7] Kim, K.J., Wu, C.D., Wang, F., and Wen, S.G., "The Research of the Four-Bar Bionic Active Knee", *Advanced Materials Research*, Vol. 308, pp. 1988-1991, (2011).
- [8] Hamon, A., and Aoustin, Y., "Cross Four-bar Linkage for the Knees of a Planar Bipedal Robot", in *Humanoid Robots (Humanoids)*, International Conference on Nashville, TN, (2010).
- [9] Farhat, N., Mata, V., Rosa, D., and Fayos, J., "A Procedure for Estimating the Relevant Forces in the Human Knee using a Four-bar Mechanism", *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, Vol. 13, pp. 577-587, (2010).
- [10] Van Oort, G., Carloni, R., Borjerink, D.J., and Stramijoli, S., "An Energy Efficient Knee Locking Mechanism for a Dynamically Walking Robot", in *Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE International Conference, Shanghai, (2011).
- [11] Chakraborty, J., and Patil, K., "A New Modular Six-bar Linkage Trans-Femoral Prosthesis for Walking and Squatting", *Prosthetics and Orthotics International*, Vol. 18, No. 2, pp. 98-108, (1994).
- [12] Jin, D., Zhang, R., and Dima, H., "Kinematic and Dynamic Performance of Prosthetic Knee Joint using Six-bar Mechanism", *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 40, pp. 39-48, (2003).
- [13] Font-Liagunes, J.M., Pamies-Vila, R., Alonso, J., and Luginis, U., "Simulation and Design of an Active Orthosis for an Incomplete Spinal Cord Injured Subject", *Procedia IUTAM*, Vol. 2, pp. 68-81, (2011).
- [14] Low, K., "Subject-oriented Overground Walking Pattern Generation on a Rehabilitation Robot Based on Foot and Pelvic Trajectories", *Procedia IUTAM*, Vol. 2, pp. 109-127, (2011).
- [15] Vaughan, Ch. L., Davis, B.L., and O'Connor, J.C., "*Dynamics of Human Gait*", Second Edition ed, South Africa, Mills Litho, Cape Town, (1999).

Abstract

Loss of limb has been a problem as long as man has been in existence. In order to restore the lost ability of amputees, artificial knee has been used by human. In this paper, the kinematic and dynamic performance of four types of six-bar mechanism used in the active knee prosthesis is investigated by computer simulation and discuss the differences criteria for four different classes of six-bar linkage mechanisms for fitting to amputees and compare improvement and weakening performance of the knees with together, and selected the best mechanism.