



طراحی و تحلیل یک مکانیزم یک درجه آزادی برای پای ربات قورباغه‌ای و شبیه‌سازی شنا-کردن بر اساس حرکت طبیعی قورباغه

وحید ملک محمدی فرادنبه¹، نیما جمشیدی^{2*}، مهرداد پورسینا³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی پزشکی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 81746-73441، n.jamshidi@eng.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 اسفند 1393

پذیرش: 24 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:

قورباغه، طراحی مکانیزم

شبیه‌سازی

دینامیک

ربات

چکیده

مطالعه بر روی مکانیزم حرکتی جانوران همواره از فعالیت‌های مهم در تحقیقات علمی بوده است. در دهه‌های اخیر مطالعه بر روی حرکت قورباغه‌ها در شنا کردن و پریدن و شبیه‌سازی این حرکات افزایش یافته است. در کار پیش رو با الگوبرداری نحوه‌ی عملکرد عضلات و مطالعه‌ی آناتومی پای قورباغه مکانیزمی طراحی شده است که حرکت طبیعی پای قورباغه را تنها با یک عملگر شبیه‌سازی می‌کند. با ارائه روش هندسی در طراحی مکانیزم، حرکت پای قورباغه با توجه به تغییر زوایای مفاصل طراحی می‌شود. مقدار تغییرات زاویه‌های اصلی در مکانیزم بر اساس تغییر زاویه‌ها در حرکت طبیعی قورباغه است. عملگر دارای حرکت دورانی است و به صورت سینوسی دوران می‌کند و با فرکانس‌های مختلف می‌توان سیکل حرکتی قورباغه را ایجاد کرد. با توجه به سرعت حرکت خطی پنجه‌ی پا در شنا قورباغه‌ی طبیعی، مقدار فرکانس لازم برای عملگر به دست می‌آید. همچنین با وارد کردن نیروهای درگ و نیروی تولیدی توسط پنجه‌ی پا، شنا کردن قورباغه شبیه‌سازی شده است. با داشتن سرعت و شتاب حرکت، گشتاور لازم برای عملگر به دست می‌آید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه‌ی آنها با نتایج حاصل از حرکت طبیعی قورباغه نشان دهنده‌ی دقت بالای مکانیزم در تقلید حرکت واقعی پای قورباغه و نحوه شنا کردن و تطبیق مقادیر سرعت و شتاب و نیروهای درگ و نیروی تولیدی محوری است. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان از مکانیزم طراحی‌شده برای شبیه‌سازی حرکت انواع قورباغه در شنا کردن استفاده کرد.

Design and analysis of one degree of freedom mechanism for frog robot leg and simulation of swimming based on frog natural motion

Vahid Malekmohammadi Faradonbeh, Nima Jamshidi*, Mehrdad Poursina

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University, Isfahan, Iran

* P.O.B. 81746-73441 Isfahan, Iran, n.jamshidi@eng.ui.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 March 2015
Accepted 14 May 2015
Available Online 20 June 2015

Keywords:
Frog, design of mechanisms
Simulation
Dynamic
robot

ABSTRACT

The study of the movement mechanism of animals has always been an important activity in academic researches. In recent decades, the investigation of frog motions in swimming and jumping and their simulations has increased. In the work ahead, by modeling the way in which muscles perform and examining the anatomy of frog leg, a mechanism is designed to simulate the natural movement of the frog leg with a single operator. By providing a geometric approach to the design of the mechanism, the movement of frog leg is simulated, according to the variation of joint angles. Variations of major angles in the mechanism are based on those of the frog's natural movement. Actuator has sinusoidal circular motion and frog motion cycles can be created with different frequencies. The required frequency for actuator is obtained by the given speed of linear motion of foot in a natural movement. Also, frog swimming is simulated by entering the drag force and the force generated by the foot. The required torque for actuator is obtained by velocity and acceleration of motion. The results of simulations compared to the results from the natural movement of the frog represent the high resolution of mechanism to mimic the real motion of the frog leg and swimming, and to match the values of velocity and acceleration and the drag force and the generated axial force. According to the obtained results, the designed mechanism can be used to simulate the movement of different types of frogs in swimming.

1- مقدمه

همواره توسط محققان مورد مطالعه بوده است. حرکت طبیعی جانوران همواره

الگو برداری از مکانیزم حرکتی جانوران در طبیعت از فعالیت‌هایی است که پیچیده بوده ولی دارای بازدهی بالایی از نظر انرژی است. حیوانات مختلف از

Please cite this article using:

V. Malekmohammadi Faradonbeh, N. Jamshidi, M. Poursina, Design and analysis of one degree of freedom mechanism for frog robot leg and simulation of swimming based on frog natural motion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 363-370, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تکنیک‌های متفاوت شنا کردن برای حرکت در آب استفاده می‌کنند. به عنوان مثال میگو با استفاده از نوع خاص حرکت پا، اختاپوس و چتر دریایی با استفاده از روش خاص ایجاد نیروی محرکه به صورت جت گونه و بعضی ماهی‌ها از طریق نوسان باله. قورباغه‌ها از جمله حیواناتی هستند که حرکت چندانگانه دارند، یعنی می‌توانند جهش کنند، راه بروند و شنا کنند. به همین دلیل به عنوان حیواناتی چابک کسانی را که علاقه‌مند به مطالعه‌ی حرکت جانوران هستند به خود جذب کرده‌اند.

با توجه به مطالعات انجام شده، بررسی حرکت قورباغه در شنا کردن به پارامترهای بیشتری نسبت به پریدن نیازمند است، به طوری که نحوه‌ی عملکرد هنگام پریدن را می‌توان با داشتن سرعت و زاویه‌ی حین پرش، به طور کامل مورد بررسی قرار داد [1].

مینگ ونگ و همکاران اهمیت اندام عقبی قورباغه (پاها) را در شنا کردن و پریدن بسیار مهم تر از اندام جلویی برشمردند و به طراحی یک مدل ربات برای پرش قورباغه بر اساس تجزیه و تحلیل مکانیزم بیولوژیکی¹ قورباغه پرداختند [2]. ساندرا نولارتز و همکاران به این نتیجه رسیدند که پاهاى قورباغه شنا کردن و پریدن را کنترل می‌کنند ولی در هر حالت به گونه‌ای متفاوت عمل می‌کنند [3]. ساندرا نولارتز و همکاران هم‌چنین شنا کردن در یک سیکل حرکتی را در سه مرحله دسته‌بندی کردند: 1- مرحله‌ی تولید نیروی رانش 2- مرحله‌ی سر خوردن 3- مرحله‌ی بازیابی، که در مرحله‌ی رانش قورباغه با انبساط ناگهانی عضلات پا شتاب می‌گیرد، در مرحله‌ی سرخوردن پا به طور کامل از هم باز می‌شود و در مرحله‌ی بازیابی پا خم می‌شود و برای سیکل بعدی حرکت آماده می‌شود [4].

جولیانا و بلیک برای شنا کردن مرحله‌ی انبساط (باز شدن پاها) را در دو فاز توصیف کردند، که فاز اول مربوط به تولید نیروی درگ و فاز دوم ایجاد اثر جت گونه یا بازتابی است [5، 6]. استامیوس و همکاران شنای قورباغه را ناشی از شتاب دادن حجمی از آب به سمت عقب دانستند که مقدار این حجم وابسته به زمان است [7] و در بحثی دیگر مدل حلقه‌های گردابه‌ای را عامل حرکت دانستند [8]. نولارتز و همکاران برای نوع حرکت پا در شنا کردن دو حالت کلی معرفی کردند: 1- حالت شنای هماهنگ و 2- حالت شنای ناهماهنگ که در حالت اول پاها به صورت هماهنگ حرکت می‌کنند ولی در حالت دوم پاها متناوب و یکی در میان حرکت می‌کنند که این نوع حرکت می‌تواند مربوط به ذخیره انرژی یا تغییر جهت باشد [9]. جانسون و لودر هیدرودینامیک شنای قورباغه در سطح آب را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مقدار نیروی رانش محوری ناشی از به هم پیوستن حلقه‌های گردابه‌ای تولید شده در پشت قورباغه است [10].

ریچاردز [11] برای بررسی سینماتیک مفاصل پاها و بدن از فیلم گرفته‌شده از قورباغه در سرعت‌های مختلف استفاده کرد و برای حرکت پای قورباغه دو نوع حرکت چرخشی و انتقالی در نظر گرفت و به این نتیجه رسید که تکانه‌ی محوری ایجادشده توسط حرکت چرخشی پای قورباغه بزرگ‌تر از تکانه‌ی ایجادشده توسط حرکت انتقالی آن است. ریچاردز [12] همچنین به مطالعه روی قورباغه‌های آبی و نیمه آبی- زمینی و تفاوت شنا کردن در آنها پرداخت و به این نتیجه رسید که نحوه‌ی شنا کردن در آنها به طور قابل‌ملاحظه‌ای به هم شباهت دارد. ریچاردز [13] هم‌چنین به مطالعه‌ی بین عملکرد عضلات پا و نیروی رانش پرداخت. گیلیس [14] به مطالعه‌ی نقش فلکسورهای نوعی وزغ در شنا کردن پرداخت و عملکرد هر کدام از

فلکسورهای ران، زانو، مچ پا و پنجه را درحالت‌های مختلف شنا کردن مورد بررسی قرار داد.

مکانیزم طراحی شده، از لینک‌هایی که توسط لولا به هم متصل شده‌اند تشکیل شده است و دارای یک عملگر است که به جای گشتاور تمام مفاصل عمل می‌کند. با توجه به پارامترهای طراحی و ایجاد تغییرات در اندازه لینک‌ها می‌توان تغییرات زوایای پا را همانند حرکت پای واقعی در شنا کردن شبیه‌سازی کرد. با دادن فرکانس خاص به عملگر سرعت و شتاب لینک‌ها شبیه‌سازی می‌شود و از این طریق نیروهای محوری و درگ که متناسب با سرعت عمل می‌کنند، حرکت کلی را تشکیل می‌دهند. در مقایسه با کارهای قبلی انجام شده در این زمینه، مکانیزم طراحی شده تنها مکانیزمی است که با یک عملگر کل حرکت پا را شبیه‌سازی می‌کند و با تغییر دادن اندازه‌ی لینک‌ها حرکت انواع قورباغه را توسط آن می‌توان شبیه‌سازی کرد.

2- طراحی مکانیزم

با توجه به مکانیزم‌های ارائه‌شده برای حرکت پا در شنای قورباغه [11، 12، 15] و مطالعاتی که روی عملکرد عضلات پا انجام شده [16-19] به طراحی مکانیزم کاملی برای شبیه‌سازی حرکت پای قورباغه در شنا کردن پرداخته می‌شود. با اندکی دقت در نحوه‌ی عملکرد عضلات قورباغه در مطالعات انجام شده قابل مشاهده است که برای حرکت یک مفصل اغلب انبساط و انقباض عضلات در اطراف مفصل باعث حرکت آن می‌شود و در واقع بر اساس مقاله گیلیس [14] این عضلات به عنوان انتقال‌دهنده‌ی نیرو عمل می‌کنند.

ابتدا طرح کلی مکانیزم در شکل 1 آورده شده است و سپس در مراحل بعدی نحوه‌ی عملکرد قسمت‌های مختلف توضیح داده می‌شود. با توجه به شکل 1 مکانیزم از یک صفحه (بدن قورباغه) و 9 لینک صلب تشکیل شده است. صفحه با عدد 1 و لینک‌ها از عدد 2 تا 10 شماره‌گذاری شده‌اند. هم‌چنین مفاصل که همه‌ی آنها لولایی هستند نیز نام‌گذاری شده‌اند و برای مثال مفصل (1، 2) صفحه‌ی 1 و لینک 2 را به هم متصل می‌کند. مفاصلی که بین لینک‌ها و صفحه هستند به شکل متمایزی (به شکل لوزی) با مفاصل بین خود لینک‌ها (به شکل دایره) نشان داده شده‌اند. عملگر در مفصل (1، 2) واقع است و دارای حرکت دورانی 360 درجه‌ای است.

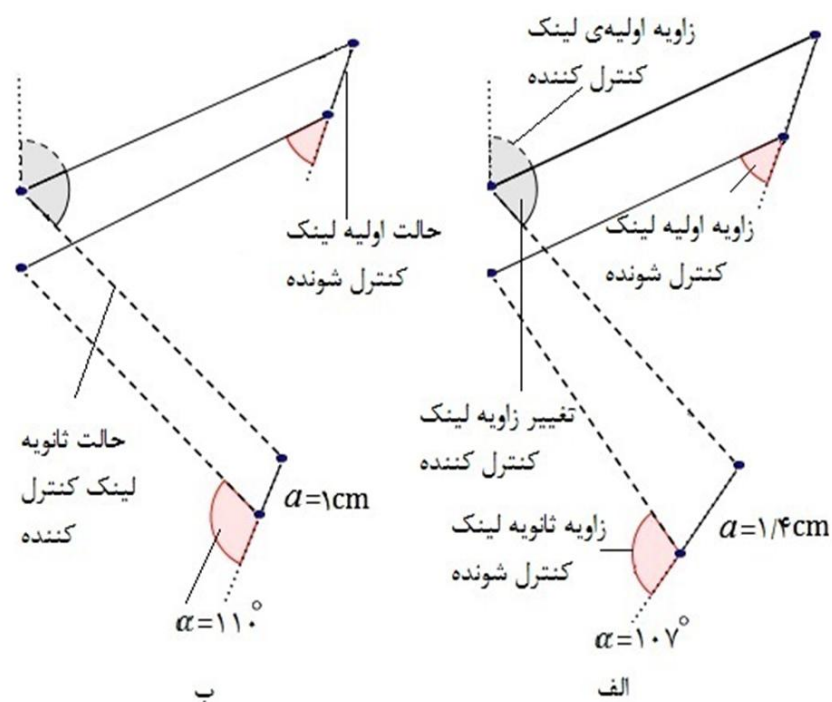
2-1- نحوه‌ی تغییرات زاویه‌ی مفصل ران

یک مکانیزم ساده برای تغییرات زاویه مفصل ران در نظر گرفته شده است که به صورت رفت و برگشت انجام می‌شود. این حرکت با تغییرات زاویه‌ای 360 درجه‌ای و مداوم عملگر به وجود می‌آید. با تعریف تابع خاص برای حرکت عملگر در نرم‌افزار می‌توان سرعت و شتاب‌های متفاوتی را برای مفصل ران منطبق بر حرکت واقعی قورباغه به دست آورد. هم‌چنین با توجه به شکل 2 با تغییر پارامترهای شعاع عملگر و لینک رابط می‌توان تغییرات زاویه‌ی ران را کنترل کرد. تغییرات زاویه‌ی مفصل ران بر اساس حرکت طبیعی پای قورباغه تنظیم می‌شود. هم‌چنین تغییرات زاویه‌ی مفصل ران در این حالت مانند شنای واقعی قورباغه به صورت حدی عمل کرده و سرعت زاویه‌ای مفصل ران به صفر میل می‌کند و برای تغییر جهت آماده می‌شود. شماره‌ی لینک‌ها بر اساس شکل 1 نشان داده شده است. قسمتی از شکل که با نقطه‌چین نمایش داده شده در واقع تغییر حالت مکانیزم با دوران عملگر است.

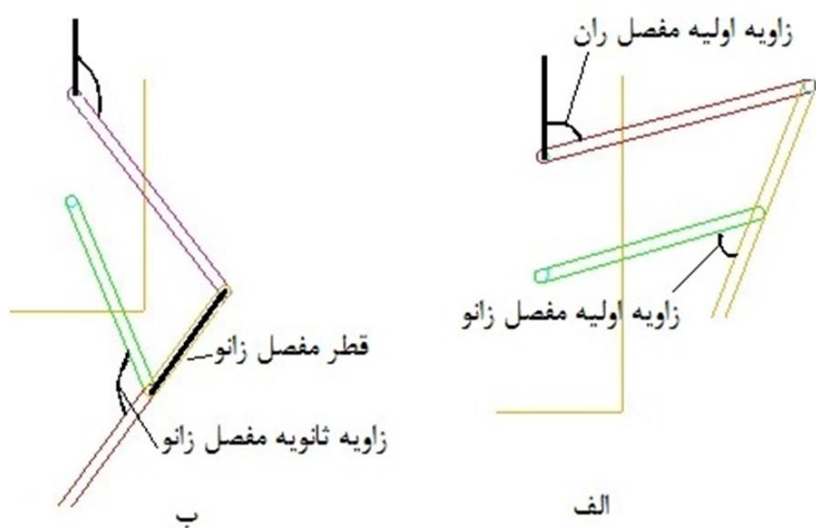
2-2- نحوه‌ی کنترل زاویه‌ی مفاصل زانو و مچ پا

برای حرکت مفصل از یک مکانیزم ساده استفاده می‌شود و در مفصل حرکت

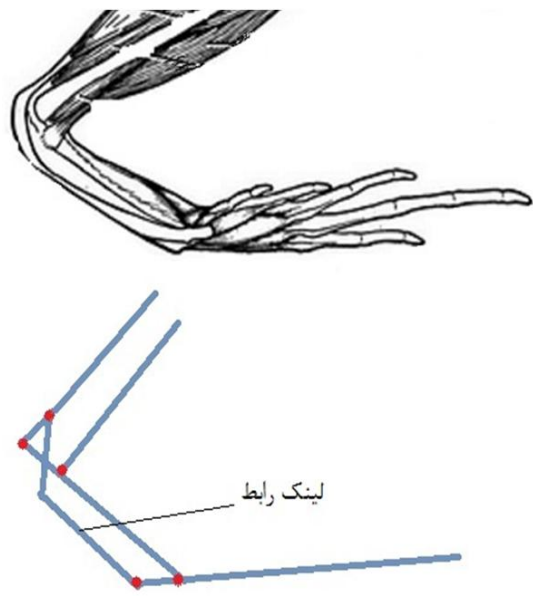
پنجه، سعی شده است که نحوه انتقال نیرو و تغییرات زاویه بر اساس عملکرد عضلات طراحی شود. در شکل 5 شکل واقعی عضلات پا برای حرکت پنجه و نحوه طراحی بر این اساس نمایش داده شده است. برای کنترل تغییرات زاویه مفصل پنجه از لینک واسط استفاده می‌شود. این لینک برای تغییر زاویه و انتقال نیرو در نظر گرفته شده و با تغییرات اندازه آن می‌توان تغییرات زاویه پنجه را کنترل کرد.



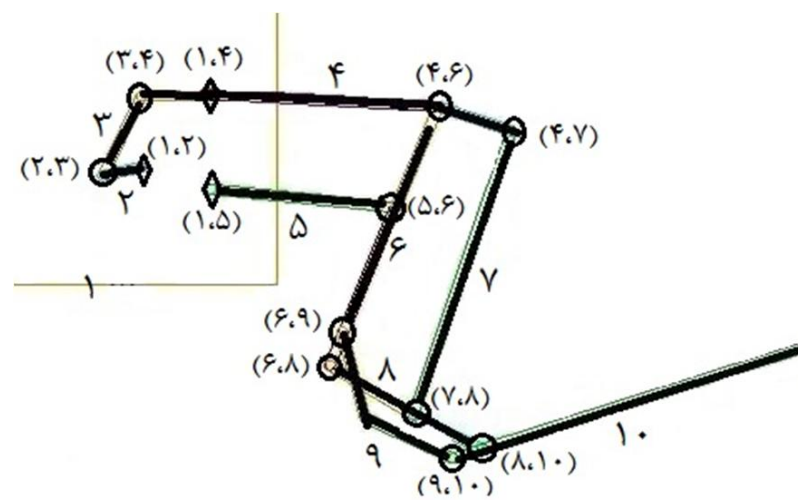
شکل 3 (الف) لینک کنترل شونده با اندازه‌ی بیشتر و تغییر زاویه کمتر و (ب) با اندازه‌ی کمتر و تغییر زاویه‌ی بیشتر



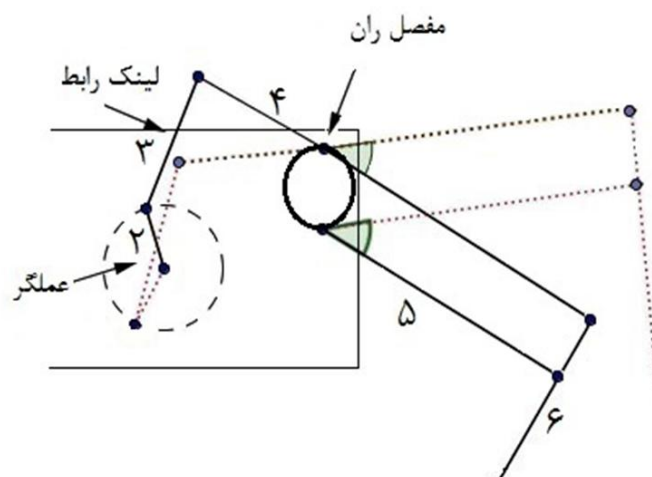
شکل 4 زوایای مفصل ران و زانو در (الف) ابتدای نیم سیکل و (ب) پایان نیم سیکل



شکل 5 (الف) پنجه‌ی طبیعی و (ب) پنجه‌ی طراحی شده با لینک



شکل 1 شماره‌گذاری لینک‌ها و مفاصل



شکل 2 نحوه‌ی تغییر زاویه‌ی مفصل ران توسط دوران عملگر و لینک رابط

زانو و مچ پا شبیه‌سازی می‌شود به این صورت که با تغییر زاویه یک لینک بتوان تغییر زاویه لینک دیگر را کنترل کرد و در این حالت لینک‌های صلب همانند راست کننده و خم کننده عضلات به عنوان انتقال‌دهنده نیرو عمل می‌کنند. در شکل 3 این شبیه‌سازی مشخص شده است به صورتی که در ابتدا مقادیر زاویه اولیه لینک کنترل کننده و لینک کنترل شونده به دلخواه تنظیم می‌شوند (در طراحی مکانیزم این زوایا بر اساس حرکت طبیعی پای قورباغه می‌باشند) و با دوران لینک کنترل کننده به مقدار مشخص، زاویه لینک کنترل شونده نیز تغییر می‌کند. حال با تنظیم کردن اندازه لینک کنترل شونده می‌توان زاویه آن را نیز کنترل کرد. با توجه به شکل 3 اندازه لینک کنترل شونده در حالت (الف) از 1/4 سانتی متر به 1 سانتی متر در حالت (ب) کاهش یافته ولی مقدار زاویه از 107 درجه به 110 درجه افزایش یافته است. به این ترتیب می‌توان با تغییر دادن زاویه لینک به اندازه‌ای خاص، زاویه لینک دیگری را به اندازه دلخواه تغییر داد.

از مکانیزمی که در شکل 3 توضیح داده شد، برای کنترل مفاصل زانو و مچ پا استفاده می‌شود. به این صورت که جابه‌جایی و تغییر زاویه مفصل زانو توسط مفصل ران کنترل می‌شود. به گونه‌ای که لینک‌های واسط همانند عضلات خم کننده و راست کننده عضلات عمل می‌کنند و علاوه بر جابه‌جایی نقش انتقال نیرو را نیز بر عهده دارند. با توجه به شکل 4 مقدار زوایای ران و زانو در ابتدای نیم سیکل و زاویه مفصل ران در انتهای نیم سیکل بر اساس حرکت طبیعی تنظیم می‌شوند، سپس مقدار قطر مفصل زانو به گونه‌ای تنظیم می‌شود که مقدار زاویه مفصل زانو در انتهای نیم سیکل منطبق با حرکت طبیعی باشد. از همین مکانیزم برای کنترل زاویه مفصل مچ پا توسط تغییرات زاویه مفصل زانو استفاده می‌شود.

2-3- بررسی مفصل پنجه و نحوه تغییرات زاویه‌ی آن

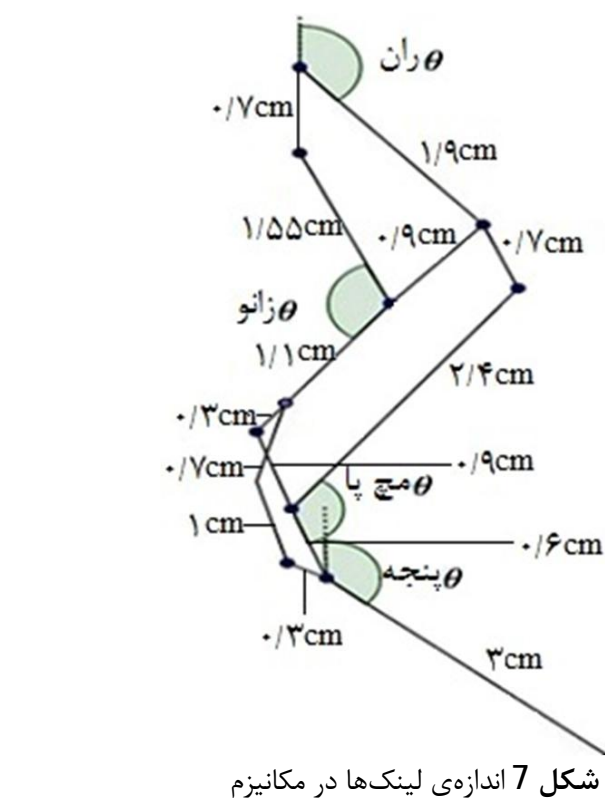
با توجه به فیزیولوژی¹ حرکت قورباغه و مطالعه‌ی نحوه تغییرات زاویه

2-4- طرح کلی مکانیزم

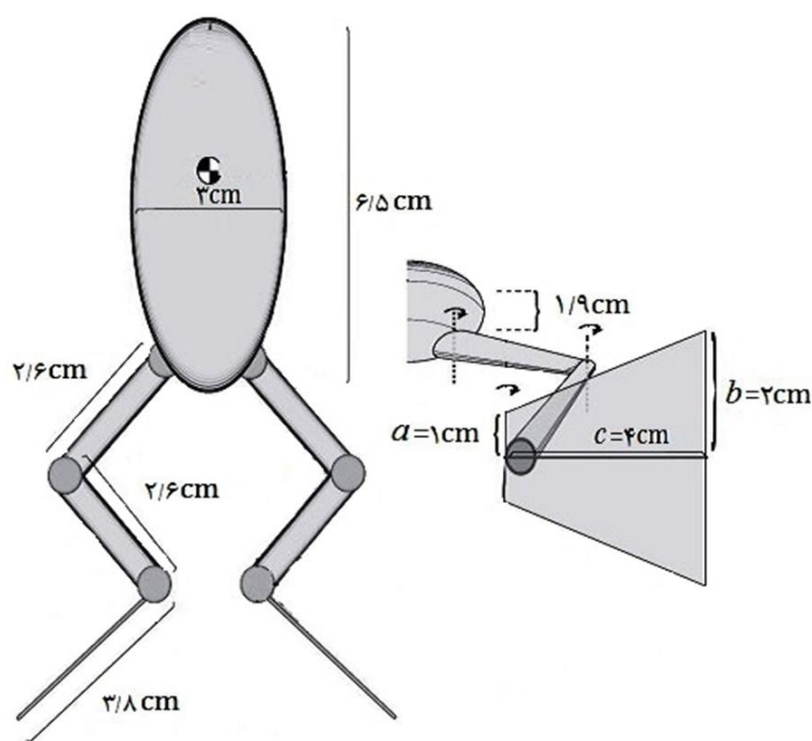
با معرفی قسمت‌های مختلف مکانیزم، اکنون می‌توان نحوه عملکرد کلی مکانیزم را مورد بررسی قرار داد. در شکل 6 زوایای اصلی برای حرکت پای قورباغه مشخص شده‌اند که با تغییرات این زوایا حرکت کلی حاصل می‌شود. در ابتدا زوایا در حالت بسته‌ی پا بر اساس زوایای طبیعی قورباغه رسم می‌شوند. در آغاز، حرکت دورانی عملگر باعث حرکت مفصل ران می‌شود و تغییر زاویه‌ی لینک راست کننده‌ی عضله بین مفصل ران و زانو همانند لینک کنترل‌کننده عمل می‌کند و باعث کنترل و تغییر زاویه‌ی مفصل زانو می‌شود که با تنظیم اندازه‌ی قطر مفصل زانو تغییر زاویه‌ی آن را می‌توان به گونه‌ای تنظیم کرد که در حالت باز پا برابر زاویه‌ی پا در حالت طبیعی باشد. به همین ترتیب تغییرات زاویه‌ی مفصل زانو، به وسیله‌ی لینک راست کننده‌ی عضله بین مفصل زانو و مچ پا باعث تغییرات زاویه‌ی قطر مفصل مچ پا شده و تغییرات زاویه‌ی مفصل مچ پا را کنترل می‌کند و اندازه‌ی قطر مفصل مچ پا را به گونه‌ای می‌توان تنظیم کرد که در حالت باز پا مقدار زاویه‌ی آن، منطبق با حالت طبیعی باشد. تغییرات زاویه‌ی مفصل مچ پا نیز باعث تغییر زاویه‌ی پنجه می‌شود، به گونه‌ای که با تنظیم اندازه‌ی لینک رابط پنجه، می‌توان مقدار زاویه‌ی پنجه را در حالت باز پا برابر حالت طبیعی به دست آورد و به این ترتیب حرکت کلی تنها با یک عملگر شبیه‌سازی می‌شود.

2-5- اندازه و جرم لینک‌ها

برای شبیه‌سازی کامل مکانیزم باید جرم و ابعاد آن بر اساس قورباغه طبیعی وارد شود. برای این منظور از اطلاعات مقاله آقای ریچاردز¹ استفاده می‌شود [11]. در شکل 7 ابعاد مکانیزم نشان داده شده است که اندازه‌ها بر اساس مدل ریچاردز است. هم چنین در شکل 8 نمونه شبیه‌سازی ابعاد مربوط به پای قورباغه از مقاله ریچاردز آورده شده است، که از نوعی قورباغه به نام زنبوس لویز² استفاده شده است. جرم نوع بالغ آن 28 گرم است. چون یک طرف بدن قورباغه شبیه‌سازی می‌شود جرم آن 14 گرم در نظر گرفته می‌شود و به دلیل اینکه پای قورباغه 11 درصد جرم کل را شامل می‌شود، مقدار آن 1/5 گرم در نظر گرفته می‌شود.



شکل 7 اندازه‌ی لینک‌ها در مکانیزم



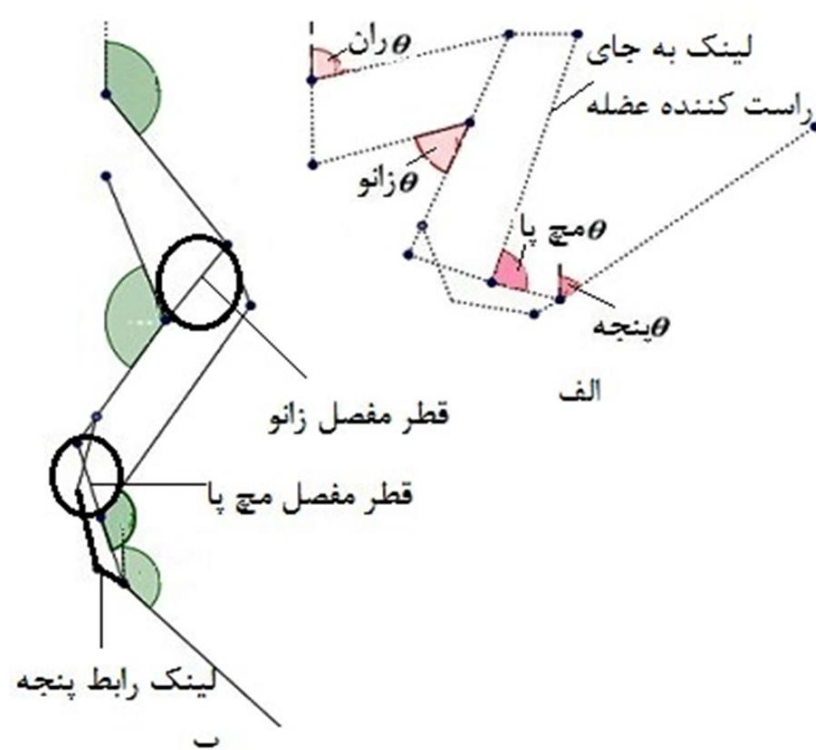
شکل 8 ابعاد مربوط به قورباغه در مقاله ریچاردز [11]

3- طراحی و شبیه‌سازی دینامیکی در نرم‌افزار آدامز³

بعد از طراحی، مکانیزم را در نرم‌افزار آدامز شبیه‌سازی کرده و حرکت آن بررسی می‌شود. کل حرکت توسط حرکت دورانی عملگر به طور کامل شبیه‌سازی می‌شود.

3-1- پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی

در شکل 9 پارامترهای لازم برای سرعت و تولید نیروی محوری و درگ نشان داده شده است. که EFV^4 نشان دهنده‌ی سرعت مؤثر انتهای پنجه‌ی پا نسبت به بدن در راستای حرکت است. v_t در واقع سرعت خطی ابتدای پنجه نسبت به بدن است و با دوران پنجه و اضافه شدن مؤلفه‌ی حاصل از سرعت زاویه‌ای پنجه (v_r) در راستای عمود بر حرکت (عمود بر صفحه‌ی x-y در شکل 9)، مقدار EFV حاصل می‌شود. با توجه به اینکه حرکت کلی با یک عملگر شبیه‌سازی شده است، می‌توان با داشتن سرعت EFV برای محاسبه‌ی سرعت دورانی عملگر استفاده کرد. که از یک تابع سینوسی استفاده می‌شود.



شکل 6 زوایای اصلی حرکت پای قورباغه در (الف) حالت بسته‌ی پا و (ب) باز پا

3- MSC ADAMS

4- Effective Foot Velocity

1- Christopher T. Richards

2- Xenopus laevis

نیروی D در واقع نیروی درگ حاصل از حرکت قورباغه است که در خلاف جهت حرکت به بدن قورباغه وارد می‌شود. این موضوع در شکل 9 مشخص شده است. نحوه محاسبه نیروی درگ در فرمول 8 آورده شده است:

$$D = \frac{1}{2} \rho A_{\text{body}} C_{D,\text{body}} v_{\text{frog}}^2 \quad (8)$$

A_{body} در واقع سطح خیس شونده از بدن قورباغه در جهت حرکت است و با توجه به اطلاعات موجود در مقاله نولارتز [4]، مقدار 54 سانتی‌متر مربع تخمین زده شده است. $C_{D,\text{body}}$ ضریب درگ بدن قورباغه است و از مقاله ریچاردز [11]، 0/14 در نظر گرفته می‌شود. سرعت قورباغه است که با سرعت COM برابر است.

4- نتایج و بحث

4-1- بررسی تطبیق تغییرات زوایای مکانیزم با حرکت طبیعی پای قورباغه

با توجه به اینکه هدف از طراحی، شبیه‌سازی حرکت پای قورباغه واقعی است، در این بخش تغییر زوایای اصلی پا در حرکت مکانیزم و حرکت طبیعی بررسی و مقایسه می‌شود. برای این منظور از اطلاعات مقاله ریچاردز [12] در جدول 1 که حاصل نمودارهای مربوط به مطالعه‌ی شای چهار نوع قورباغه است، استفاده می‌شود. با توجه به اینکه نوع حرکت در انواع قورباغه متفاوت است، کمترین و بیشترین مقدار زاویه برای هر مفصل در یک بازه معرفی شده است.

اکنون با داشتن مکانیزم شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار می‌توان نحوه تغییرات زوایا را در یک سیکل از حرکت بدست آورد. در شکل 10 این تغییرات زوایا وجود دارد. با توجه به زوایای اصلی در حرکت و اندازه‌گیری تغییرات این زوایا در مکانیزم طراحی شده و مقایسه‌ی این تغییرات زوایا با نتایج حاصل از مطالعه‌ی حرکت طبیعی چند قورباغه از مقاله ریچاردز [12]، در جدول 1 که حاصل نتایج آزمایشگاهی است، قابل مشاهده است که مکانیزم در تغییرات زوایای اصلی در بازه‌ی حرکت طبیعی عمل می‌کند.

یکی دیگر از پارامترهای مهم دیگر در طراحی مکانیزم نحوه حرکت پنجه است. به طوری که بر اساس حرکت طبیعی قورباغه، سرعت دورانی پنجه بیشتر از سرعت خطی ابتدای پنجه است [12] و در تولید نیروی تراست اهمیت بیشتری دارد. در واقع سرعت انتهای پنجه حاصل سرعت ابتدای پنجه و سرعت خطی حاصل از دوران پنجه است. این پارامترها در شکل 11 مشخص شده است و نشان دهنده تطبیق حرکت شبیه‌سازی شده‌ی پنجه در مکانیزم با حرکت طبیعی است.

4-2- مقایسه‌ی نتایج مطالعات تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی

مقدار EFV در یک سیکل حرکتی در مقاله ریچاردز از طریق فیلم‌برداری از حرکت قورباغه محاسبه شده است. در شکل 12 پارامترهای EFV و سرعت و شتاب COM (مرکز جرم قورباغه) در یک سیکل حرکتی موجود است و (u, v) دستگاه مرجع است.

جدول 1 محدوده تغییرات زاویه‌ی مفصل از اطلاعات مقاله ریچاردز [12]

مفصل	کمترین زاویه (درجه)	بیشترین زاویه (درجه)
ران	70-100	130-150
زانو	30-70	115-140
مچ پا	50-90	120-160
مفصل	20-80	120-170

(u, v) دستگاه مختصات مرجع است و COM¹ مرکز جرم قورباغه است. و v_1 سرعت ابتدای پنجه در راستای محور x است.

نیروهای لازم برای ایجاد حرکت طبیعی قورباغه شامل T (تراست²) و D (درگ³) است که نیروی تراست خود شامل دو مؤلفه است.

$$T = T_{\text{Drag}} + T_{\text{amass}} \quad (1)$$

که T_{Drag} حاصل نیروی تولیدی از سرعت پنجه‌ی پا نسبت به آب است و بر اساس مقاله ریچاردز [11]، از فرمول 2 به دست می‌آید.

$$T_{\text{Drag}} = \rho C_D \sin \theta_f \int_0^c \left(\frac{b-a}{c} r + a \right) [rv_r + (v_t - v_{\text{COM}})]^2 dr \quad (2)$$

v_r سرعت دورانی پنجه‌ی پا در دستگاه مرجع است و A_{foot} سطح خیس شونده پنجه پا و $C_{D,\text{foot}}$ ضریب درگ پنجه است که از مقاله ریچاردز [11] عددی بین 1 تا 2 را شامل می‌شود و r متغیر مربوط به طول پنجه است و a و b و c مربوط به ابعاد پنجه می‌باشند.

T_{amass} در واقع نیروی حاصل از تکانه‌ی حرکت آب توسط پا است که در نیم سیکل حرکتی که شامل باز شدن پا است در جهت حرکت قورباغه و در نیم‌سیکل بسته شدن پا در خلاف جهت حرکت، به پنجه قورباغه وارد می‌شود. معادلات شماره‌ی 3 تا 7 مربوط به محاسبه‌ی T_{amass} از مقاله ریچاردز [11] است که در معادلات v_n سرعت خطی ابتدای پنجه در دستگاه مرجع است.

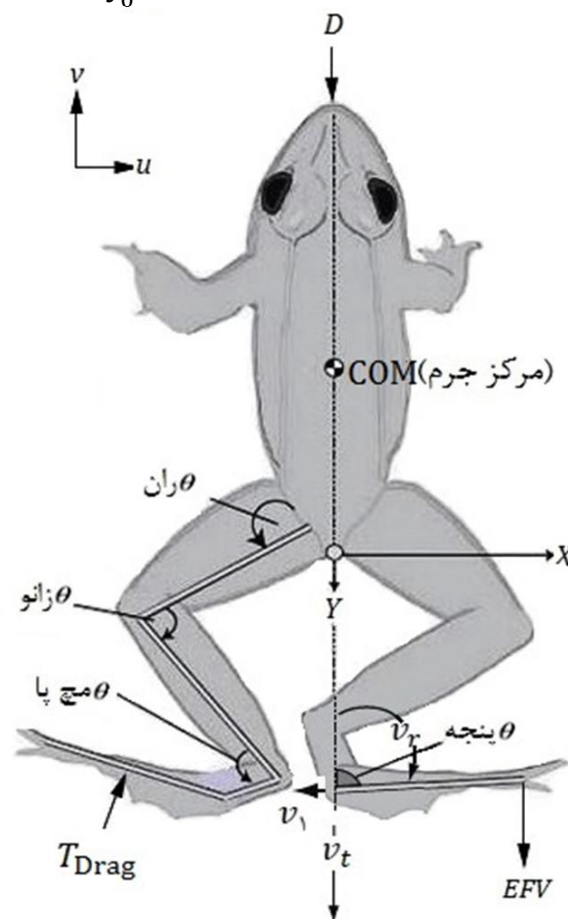
$$v_n = v_t - v_{\text{COM}} \quad (3)$$

$$T_{\text{amass}} = 2(\dot{v}_n m_{11} + v_1 v_r m_{22} + \dot{v}_r m_{61}) \quad (4)$$

$$m_{11} = \rho \pi \sin^2 \theta_f \int_0^c \left(\frac{b-a}{c} r + a \right)^2 dr \quad (5)$$

$$m_{22} = \rho \pi \cos^2 \theta_f \int_0^c \left(\frac{b-a}{c} r + a \right)^2 dr \quad (6)$$

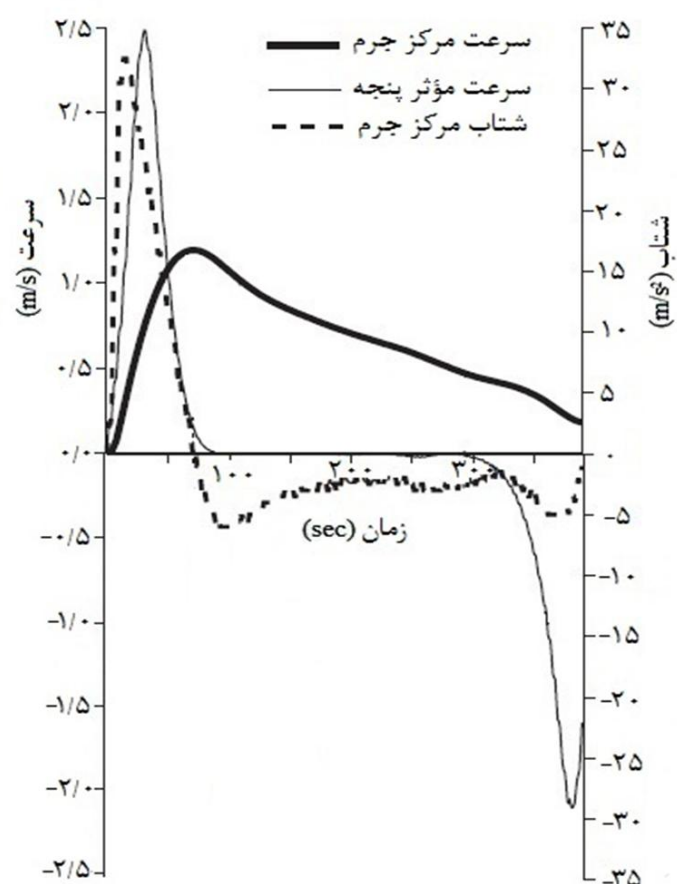
$$m_{61} = \rho \frac{\pi}{2} \sin \theta_f \int_0^c r \left(\frac{b-a}{c} r + a \right)^2 dr \quad (7)$$



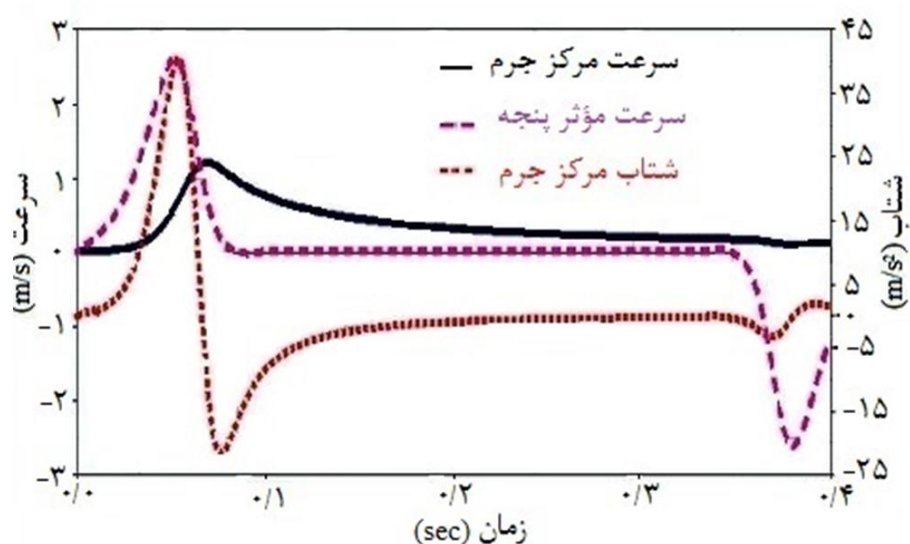
شکل 9 پارامترهای لازم در محاسبات

- 1- Center of Mass
- 2- Thrust
- 3- Drag

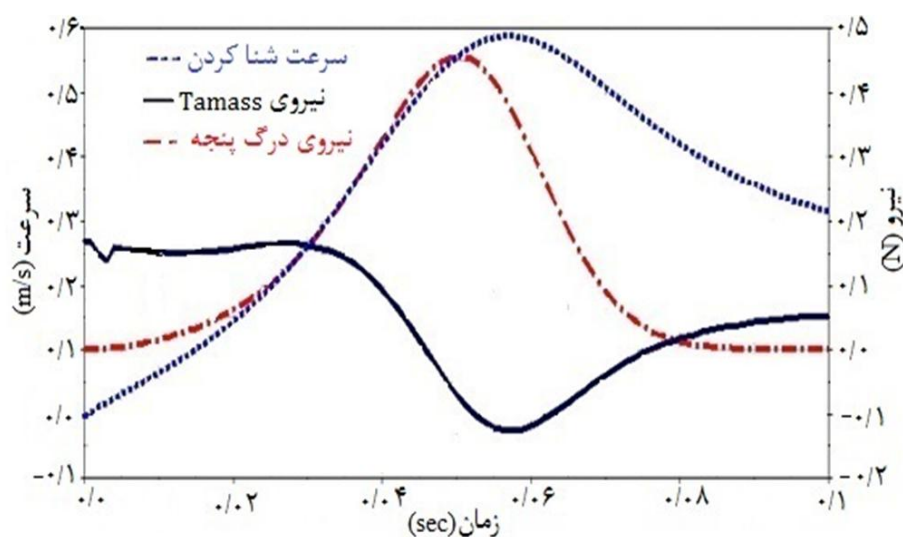
به سرعت و شتاب حرکت قورباغه نیز با دقت قابل قبولی شبیه به نتایج مقاله ریچاردز [12] به دست آمده است. همچنین نتایج به دست آمده در شبیهسازی در شکل 14 در تولید نیروهای لازم در ایجاد حرکت، مانند نیروی T_{amass} که در ابتدا مقداری مثبت دارد و سپس به یک مقدار منفی تبدیل می شود، مطابق با حرکت طبیعی قورباغه است، به گونه ای که در ابتدا پنجه



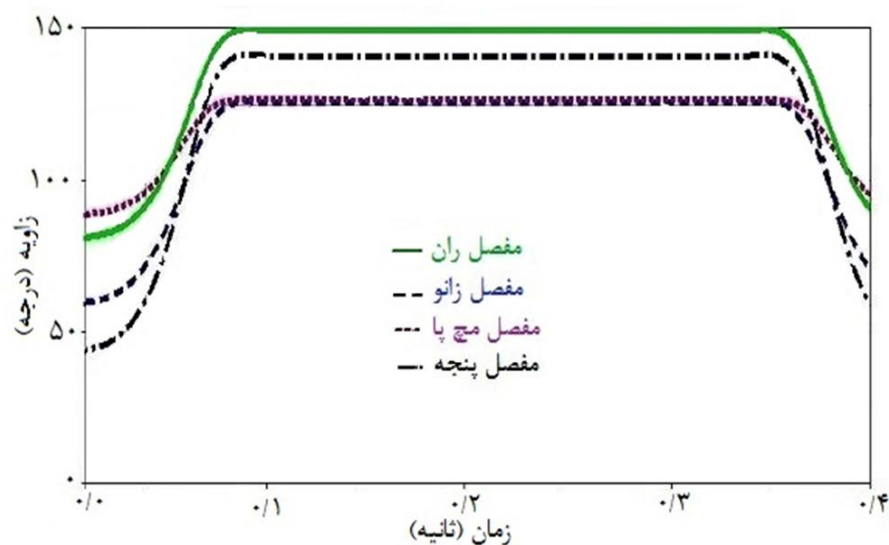
شکل 12 تغییرات سرعت و شتاب مرکز جرم و سرعت پنجه از مقاله ریچاردز [12]



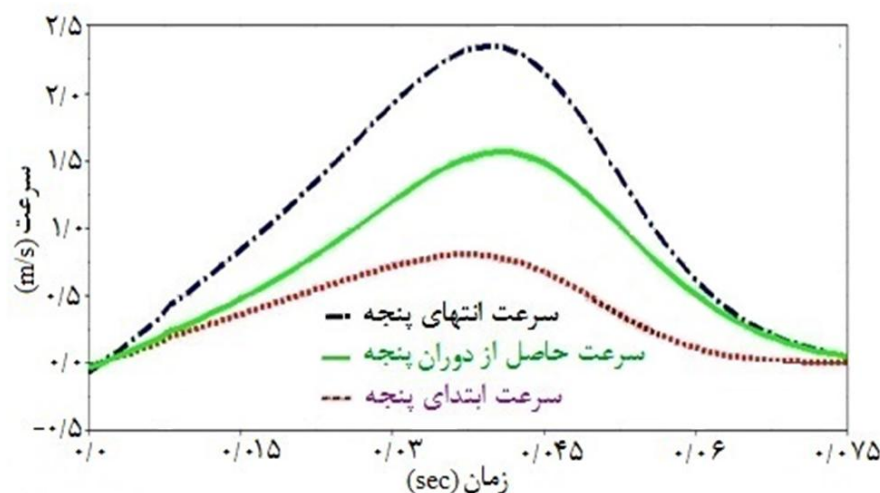
شکل 13 سرعت و شتاب مرکز جرم و سرعت پنجه در یک سیکل



شکل 14 سرعت قورباغه و نیروی های تولیدی توسط پنجه



شکل 10 نحوه تغییرات زاویه های اصلی در مکانیزم در یک سیکل از حرکت



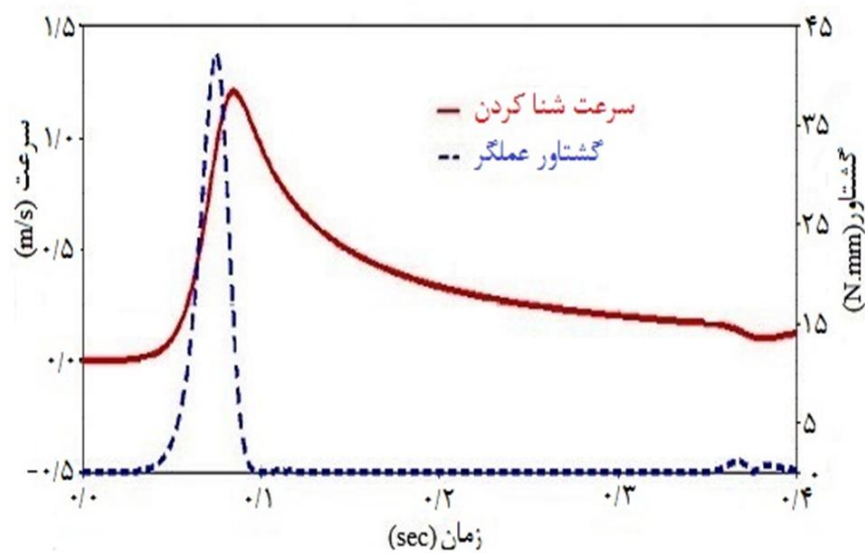
شکل 11 پارامترهای سرعت مربوط به حرکت پنجه نسبت به بدن

اکنون با داشتن سرعت پای قورباغه نسبت به بدن که توسط عملگر تولید می شود، با وارد کردن مؤلفه های نیرو، حرکت کلی قورباغه در دستگاه مرجع شبیه سازی می شود. در واقع با داشتن سرعت EFV، سرعت COM که از حرکت طبیعی به دست آمده شبیه سازی می شود. در شکل 13 نمودار مربوط به EVF در شبیه سازی آورده شده است.

با دوران عملگر مؤلفه های سرعت به وجود می آید و از این طریق نیروها که در نرم افزار بر اساس فرمول های موجود تعریف شده اند، به وجود می آیند و حرکت کلی شبیه سازی می شود. همچنین مقدار T_{amass} با توجه به تعریف جرم آب، با شروع حرکت عملگر به وجود می آید. در شکل 14 نمودار حرکتی که شامل سرعت قورباغه و نیروی تراست است، موجود است، که در این حالت مربوط به شنای آهسته است.

با تعریف نیروهای وارد بر قورباغه با استفاده از اطلاعات موجود در مقالات و شبیه سازی این نیروها در نرم افزار، شنا کردن قورباغه نیز شبیه سازی شده است. مقایسه ی شکل 12 از مقاله ریچاردز [12] و شکل 13 (شبیه سازی در نرم افزار) نشان دهنده ی شباهت عملکرد مکانیزم در تولید اندازه ی مقادیر سرعت و شتاب شنا کردن و سرعت پنجه ی پا است. مقایسه ی سرعت و شتاب مکانیزم نشان دهنده ی شباهت حرکت مکانیزم به حرکت طبیعی در یک سیکل از حرکت است.

نتایج حاصل از شبیه سازی نشان دهنده ی دقت بالای مکانیزم در ایجاد نحوه ی تغییرات زوایا نسبت به حرکت طبیعی است. در مقایسه با پژوهش های اخیر انجام شده که شامل طراحی مکانیزم برای شبیه سازی شنا کردن قورباغه است [20,21] و تنها نتایج مربوط به نیروهای تولیدی توسط پنجه ی پا و تغییرات زوایا موجود است، در این پژوهش علاوه بر این نتایج، نتایج مربوط



شکل 17 سرعت شنا کردن و گشتاور عملگر در یک سیکل

معرفی شده، حرکت انواع قورباغهها را در شنا کردن شبیهسازی و مورد مطالعه قرار داد و علاوه بر آن از نتایج مربوط به شبیهسازی در ساخت انواع ربات قورباغه‌ای در مدل‌های آزمایشگاهی استفاده کرد.

5- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
a	شتاب (ms^{-2})
C_D	ضریب درگ
D	نیرو (nm^{-2})
r	طول (m)
T	نیرو (nm^{-2})
v_1, v_{COM}, v_t	سرعت (ms^{-1})
v_r	سرعت زاویه‌ای ($rads^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
علائم یونانی	
ρ	چگالی (kgm^{-3})
زیر نویس‌ها	
Body	بدن
Foot	پنجه
frog	قورباغه

6- مراجع

- [1] R. L. Marsh, Jumping ability of anuran amphibians, *Adv Vet Sci Comp Med*, vol. 38B, pp. 51-111, 1994
- [2] M. Wang, X.-z. Zang, J.-z. Fan, and J. Zhao, Biological jumping mechanism analysis and modeling for frog robot, *Journal of Bionic Engineering*, vol. 5, pp. 181-188, 2008.
- [3] S. Nauwelaerts, J. Ramsay, and P. Aerts, Morphological correlates of aquatic and terrestrial locomotion in a semi-aquatic frog, *Rana esculenta*: no evidence for a design conflict, *Journal of Anatomy*, vol. 210, pp. 304-317, 2007.
- [4] S. Nauwelaerts, P. Aerts, and K. D'Août, Speed modulation in swimming frogs, *Journal of motor behavior*, vol. 33, pp. 265-272, 2001.
- [5] J. M. Gal and R. Blake, Biomechanics of frog swimming: I. Estimation of the propulsive force generated by *Hymenochirus boettgeri*, *Journal of experimental biology*, vol. 138, pp. 399-411, 1988.
- [6] J. M. Gal and R. Blake, Biomechanics of frog swimming: II. Mechanics of the limb-beat cycle in *Hymenochirus Boettgeri*, *Journal of experimental biology*, vol. 138, pp. 413-429, 1988.
- [7] S. Nauwelaerts, E. J. Stamhuis, and P. Aerts, Propulsive force calculations in swimming frogs I. A momentum-impulse approach, *Journal of experimental biology*, vol. 208, pp. 1435-1443, 2005.
- [8] E. J. Stamhuis and S. Nauwelaerts, Propulsive force calculations in swimming frogs II. Application of a vortex ring model to DPIV data, *Journal of experimental biology*, vol. 208, pp. 1445-1451, 2005.
- [9] S. Nauwelaerts and P. Aerts, Two distinct gait types in swimming frogs, *Journal of Zoology*, vol. 258, pp. 183-188, 2002.

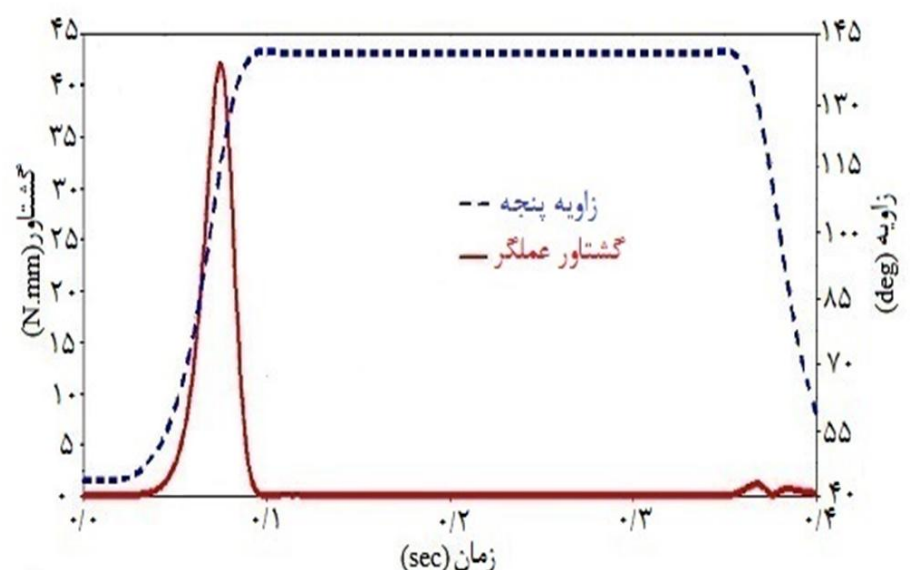
با عقب راندن آب، نیرویی در جهت حرکت دریافت می‌کند و سپس با افزایش سرعت حرکت از طریق افزایش نیروی درگ پنجه، نیروی T_{amass} در خلاف جهت حرکت به پنجه وارد می‌شود. برتری دیگر مکانیزم در ایجاد حرکت توسط یک عملگر است که می‌توان گشتاور و توان لازم توسط عملگر را به دست آورد.

3-4- نتایج جدید حاصل از شبیهسازی

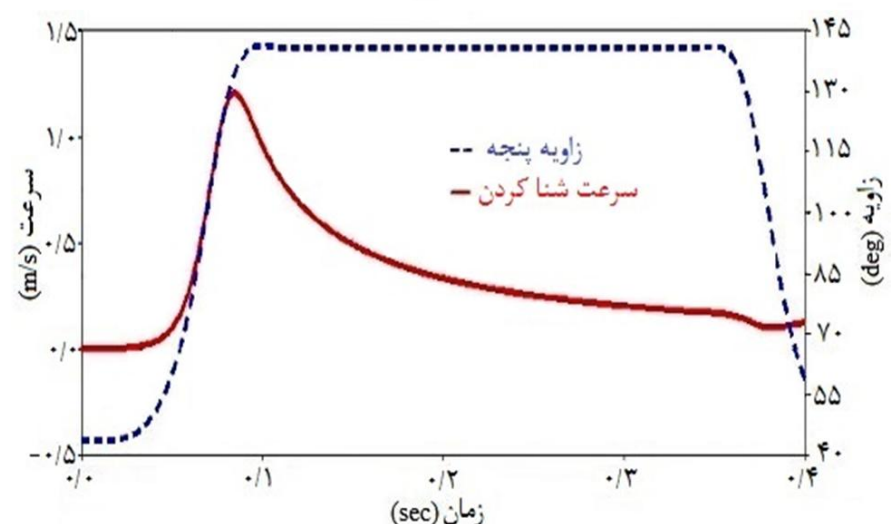
با توجه به این که حرکت توسط یک عملگر انجام می‌شود، می‌توان نتایج مربوط به عملگر را با پارامترهایی مانند زاویه پنجه و سرعت شنا کردن در یک سیکل از حرکت مورد مطالعه قرار داد. همان‌طور که در شکل 15 مشخص است بیشترین گشتاور تولیدی توسط عملگر در حدود زاویه 115 درجه‌ای پنجه رخ می‌دهد. در شکل 16 بیشترین سرعت شنا قورباغه در زاویه حدود 130 درجه‌ای پنجه رخ می‌دهد. همچنین در شکل 17 سرعت شنا کردن و گشتاور عملگر موجود است که بر اساس آن ماکسیمم گشتاور عملگر حدود 0/02 ثانیه زود تر از ماکسیمم سرعت رخ می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصل‌شده از شبیهسازی مکانیزم در نرم‌افزار مانند تغییرات زوایای اصلی و سرعت و شتاب حرکت قورباغه و سرعت پنجه و مقایسه آن با نتایج حاصل از مطالعات تجربی از مقاله ریچاردز [12]، می‌توان براساس دقت قابل قبول مکانیزم در ایجاد حرکت طبیعی قورباغه و سرعت و شتاب لازم برای حرکت، از نتایج مربوط به گشتاور عملگر برای انتخاب عملگر مناسب در ساخت ربات قورباغه‌ای استفاده کرد.

با توجه به اینکه مکانیزم قابلیت تغییر در اندازه‌ی لینک‌ها را دارد می‌توان با تغییر دادن اندازه‌ی آنها و نحوه‌ی کنترل زوایا بر اساس روش



شکل 15 گشتاور عملگر و زاویه پنجه در یک سیکل



شکل 16 زاویه پنجه و سرعت شنا کردن در یک سیکل

- [16] C. T. Richards and C. J. Clemente, Built for rowing: frog muscle is tuned to limb morphology to power swimming, *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 10, p. 20130236, 2013.
- [17] C. T. Richards, Building a robotic link between muscle dynamics and hydrodynamics, *The Journal of experimental biology*, vol. 214, pp. 2381-2389, 2011.
- [18] E. Azizi and T. J. Roberts, Muscle performance during frog jumping: influence of elasticity on muscle operating lengths, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, p. rspb20092051, 2010.
- [19] T. Přikryl, P. Aerts, P. Havelková, A. Herrel, and Z. Roček, Pelvic and thigh musculature in frogs (Anura) and origin of anuran jumping locomotion, *Journal of anatomy*, vol. 214, pp. 100-139, 2009.
- [20] J. Pandey, N. Reddy, R. Ray, and S. N. Shome, Multi-body dynamics of a swimming frog: A co-simulation approach, in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 842-847, 2013.
- [21] J. Pandey, N. Reddy, R. Ray, and S. Shome, Biological swimming mechanism analysis and design of robotic frog, in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 1726-1731, 2013.
- [10] L. C. Johansson and G. V. Lauder, Hydrodynamics of surface swimming in leopard frogs (*Rana pipiens*), *Journal of experimental biology*, vol. 207, pp. 3945-3958, 2004..
- [11] C. T. Richards, The kinematic determinants of anuran swimming performance: an inverse and forward dynamics approach, *Journal of Experimental Biology*, vol. 211, pp. 3181-3194, 2008.
- [12] C. T. Richards, Kinematics and hydrodynamics analysis of swimming anurans reveals striking inter-specific differences in the mechanism for producing thrust, *The Journal of experimental biology*, vol. 213, pp. 621-634, 2010.
- [13] C. T. Richards and C. J. Clemente, A bio-robotic platform for integrating internal and external mechanics during muscle-powered swimming, *Bioinspiration & biomimetics*, vol. 7, p. 016010, 2012.
- [14] G. B. Gillis and A. A. Biewener, Hindlimb extensor muscle function during jumping and swimming in the toad (*Bufo marinus*), *Journal of Experimental Biology*, vol. 203, pp. 3547-3563, 2000.
- [15] W. J. Kargo and L. C. Rome, Functional morphology of proximal hindlimb muscles in the frog *Rana pipiens*, *Journal of Experimental Biology*, vol. 205, pp. 1987-2004, 2002.