

طراحی و ساخت یک ربات ماهی و بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی آن

محسن سیاه منصوری^{۱*}؛ احمد قنبری^۲

چکیده

الهام‌گیری از طبیعت برای تولید محصولات رفع‌کننده‌ی نیازهای بشر همواره مورد توجه انسان بوده است. در این بین حرکت و مانور آبزیان از جایگاه خاصی برخوردار است. در این مقاله ابتدا به مقایسه قابلیت‌های گونه‌های مختلف ربات‌های مقلد می‌پردازیم و سپس با توجه به بررسی خواص ربات ماهی‌های گوناگون، به طراحی و ساخت نوعی ربات ماهی می‌پردازیم که برای ساخت آن از ماهی شمشیری^۱ الهام گرفته‌ایم. این ربات با یک باله‌ی موجی چندتکه‌ای^۲ در قسمت زیرینش، نیروی لازم را برای پیشروی و مانور ربات فراهم می‌نماید. تغییر جهت و عمق شنای ربات نیز به وسیله‌ی یک سیستم مکانیکی شامل دو سروو موتور^۳ امکان پذیر است. این ربات به کمک یک دسته کنترلی و توسط یک سیستم کنترل بی‌سیم^۴، فرمان‌های لازم را به ورود کنترلی نصب شده بر روی ربات ماهی جهت حرکت و مانور ارسال می‌کند. بدین ترتیب کنترل ربات از بیرون استخر امکان پذیر است. به کمک این سیستم کنترلی می‌توان سروو موتورهای موجود در باله و سیستم مکانیکی کنترل جهت و عمق شنای ربات را کنترل نمود. در پایان اثر عوامل گوناگون بر روی مانور و سرعت شنای ربات ماهی از دیدگاه آزمایشگاهی بررسی خواهد شد.

کلمات کلیدی: الهام‌گیری از طبیعت، ربات ماهی، باله موجی، کنترل جهت و عمق، سیستم کنترل بی‌سیم، نمودار سرعت

Design, Implementation and Experiments on a Fish-Like Robot

M. Siahmansouri, A. Ghanbari

ABSTRACT

One of main methods for protecting nature is to use nature as an inspiration source for designing new products for human being's needs. Movement and maneuver in fluids is an important issue in human activity. In this work, by inspiration from knife fish, an undulating fin for producing propulsion force are designed and implemented. This undulating fin is a segmental anal fin, and produce sinusoidal waves which are needed for producing propulsion force. Then, parameters of this sinusoidal wave are discussed.

In the fish robot, with using a special mechanical system, the direction of propulsive force is adjustable for controlling of direction and depth of swimming. Then, details of wireless control system for maneuvering and controlling of robot's speed are presented. Finally, the results of fish robot's movement is discussed experimentally.

KEYWORDS: Biomimetic, Fish robot, Undulating fin, Controlling of direction and depth, Wireless control system, velocity Diagrams

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۹/۲۷

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۱۰/۲۶

^{۱*} نویسنده مسئول و م. سیاه منصوری؛ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز؛ mohsen.siahmansouri@yahoo.com

^۲ ا. قنبری؛ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز؛ a-ghanbari@tabrizu.ac.ir

عنوان یک منبع مهم الهام‌گیری برای تولیدات و پرورش نوآوری‌ها توجه نمود [۳].

سعی بر آن است که با الهام‌گیری از طبیعت نیروی لازم را برای حرکت و مانور ربات ماهی‌ها تولید نمود.

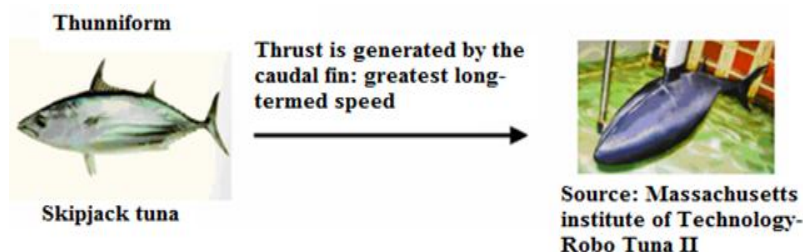
در طبیعت نیروی پیشران ماهی‌ها از دو طریق تولید نوسان بدنه یا باله و یا تولید موج تولید می‌شود. ماهی‌های موجی به دو نوع بدن موجی یا باله موجی تقسیم می‌شوند. البته ترکیب این روش‌های گفته شده، نیز قابل اعمال است.

در اینجا قصد داریم ربات ماهی‌هایی در ابعاد چند ده سانتی‌متری را بررسی کنیم. در این ربات‌ها حرکت نوسانی به دلیل ایجاد نوسانات شدید در آب و هدر دادن توان و همچنین نداشتن مهارت لازم برای شناگری، مناسب نیست.

در این مقاله به بررسی قابلیت‌های ربات ماهی‌های BCF و MPF می‌پردازیم. سپس دوگونه‌ی قابل تولید ربات‌های الهام گرفته از ماهی‌های MPF را بررسی می‌کنیم و طرح برتر را انتخاب خواهیم کرد و با بیان چگونگی تولید موج‌های سینوسی گوناگون به کمک شش سروو موتور موجود در باله نوع برتر، به طراحی یک سیستم مکانیکی شامل دو سروو موتور کنترل عمق و جهت می‌پردازیم و مدارهای مخابراتی و الکترونیکی را برای کنترل بی‌سیم این ربات ماهی بیان می‌کنیم. سپس اثرات عوامل فیزیکی بر سرعت حرکت ربات ماهی را بصورت تجربی بررسی خواهیم نمود. در پایان، زمینه‌های مختلفی را برای تحقیقات گسترده تر بر روی شناگرهای مصنوعی و ربات ماهی‌ها بیان می‌کنیم.

۲- تقلید و کارایی ربات‌های BCF و MPF

در این بخش به بررسی و مقایسه‌ی ربات‌های الهام گرفته از ماهی‌های BCF و MPF می‌پردازیم. در شکل‌های (۱) و (۲) نمونه‌هایی از این ربات ماهی‌ها به همراه نام موسسه سازنده و نمونه طبیعی آن‌ها آورده شده است.



شکل (۱): نمونه‌هایی از ماهی‌های BCF و ربات‌های مقلد آن‌ها [۴]

به نظر می‌رسد تقلید از طبیعت یکی از راه‌های حفظ آن است. دخالت بیش از حد انسان در طبیعت باعث تخریب آن شده است. یکی از بزرگترین و مهم‌ترین زمینه‌هایی که بشر باعث بر هم خوردن نظم طبیعت شده است، زندگی دریایی است. این مساله ما را به سوی ساخت وسایلی که با طبیعت هماهنگی بیشتری داشته باشند، هدایت می‌نماید. برای رسیدن به این هدف، ایجاد تغییراتی در ساختار وسایل موجود اجتناب‌ناپذیر است. یکی از مهم‌ترین این تغییرات بررسی روش‌های جدید تولید نیروی پیشران است. برای مثال استفاده از پروانه‌ها برای تولید نیروی پیشران کشتی‌ها و قایق‌ها باعث آسیب‌های شنوائی شدید موقتی و پایدار بر روی موجودات دریایی می‌شود [۱]. در طبیعت در موارد بسیاری، این نیروی پیشران به وسیله‌ی ایجاد موج‌های سینوسی تولید می‌شود. یکی از راه‌های بررسی کارایی موج‌های سینوسی در تولید نیروی پیشران لازم برای حرکت کشتی‌ها و زیردریایی‌ها، استفاده از این موج‌ها برای مانور ربات ماهی‌ها است [۲].

علاوه بر طبیعت، پره‌ها در کاربردهای صنعتی نیز در مواردی باعث ایجاد مشکلاتی می‌شوند. پاک شدن لایه‌های محافظ خوردگی در مخازن سیالات در اثر جداشدن مواد اکسند شیمیایی مانند اکسیژن، کلر، اسید سولفوریک، اسیدنیتریک، پرمنگنات در اثر همرفت ناشی از حرکت شدید در پره‌ها، کارایی پایین در لزجت‌های بالا، کاربرد نداشتن در موارد رسوبی و لجنی، امولسیون مضر مثلاً در بخشی از مراحل تصفیه آب و انفجار در اثر همرفت ناشی از حرکت شدید پره‌ها به دلیل پایین بودن انرژی فعال سازی برخی سیالات، نمونه‌هایی از مضرات کاربرد پره‌ها در شناگرهای ساخت بشر هستند. استفاده از موج‌های سینوسی در راستای کاهش مشکلات گفته شده، موثر است. بنابراین می‌توان به طبیعت به

نمونه ای از این مکانیزم در شکل (۳b) آمده است.



(a)



(b)

شکل (۳): (a) مکانیزم باله ربات MPF ساخت دانشگاه ملی صنایع دفاع چین، چنگسا^[۷]

(b) مکانیزم باله ربات MPF در ربات NKF-II ساخت دانشگاه

صنعتی نانیانگ سنکاپور^[۱]

در هر دو طرح بالا برای تولید موج، فاصله بین دو میله باله مجاور همواره در حال تغییر است. در طرح (a) که به طور کامل از ماهی‌های طبیعی الهام گرفته است باید جنس غشاء باله از جنس مناسبی انتخاب شود که شبیه باله‌های ماهی، قابلیت انقباض و انبساط داشته باشد. در غیر این صورت به دلیل فاصله‌ی متفاوت قسمت انتهایی دو میله باله مجاور و سر آن‌ها و همچنین تغییر فاصله دو میله باله مجاور در حین تولید موج، ایجاد چروکیدگی اجتناب ناپذیر است. البته شاید بتوانیم لغزنده‌های ویژه‌ای نیز تولید نماییم که در بین دو میله باله مجاور قرار گیرد و این مشکل را برطرف نماید که البته طرح ساده‌ای نیست.

اما در طرح (b) به این دلیل که میله‌های باله همواره موازی هستند، با لغزنده‌های بسیار ساده‌تری می‌توان از چروکیدگی باله جلوگیری نمود. البته این طرح برای تولید موج سینوسی ساده است و به طور کامل از ماهی تقلید نمی‌کند. موازی بودن میله‌های باله این خاصیت را دارد که بدون لغزنده و با بیشتر نمودن تعداد موتورها و همچنین کاهش اختلاف فاز بین آن‌ها نیز می‌توان چروکیدگی باله را در هنگام تولید موج به حداقل رساند.

نوع (a) در حین تولید موج علاوه بر تولید نیروی در راستای طولی باله، یک نیروی عمودی نیز تولید می‌نماید. اما نوع (b) فقط به تولید یک نیرو در راستای طولی باله در حین تولید موج منجر می‌شود که جهت این نیرو را می‌توانیم به سادگی به بالا و پایین و طرفین منحرف کنیم و کنترل جهت

Rajiform



stingray



Source: Nanyang Technological University



Source: Osaka University

شکل (۲): نمونه‌هایی از ماهی‌های MPF و ربات‌های مقلد [۵]

یکی از روش‌های مقایسه‌ای در طراحی، گفتن قابلیت‌های مطلوب و امتیازدهی به میزان ارضاء قابلیت گفته شده در هر یک از طرفین در حال مقایسه است. در جدول (۱) نیز به همین روش به مقایسه‌ی ربات‌های BCF و MPF می‌پردازیم.

جدول (۱): مقایسه موردی ربات‌های مقلد

ربات‌های مقلد ماهی BCF	ربات‌های مقلد ماهی MPF	موارد مقایسه
۰	۱	نیروی درگ ^۹ (دراثر حرکت محوربندنه)
۱	۲	میزان نوسان آب
۱	۱	سرعت
۰	۲	داشتن مهارت و تعادل در شنا گری
۱	۰	ابعاد
۳	۶	نمره کل

بنابراین نمونه برتر از نظر ارضای عوامل مطلوب ربات‌های مقلد ماهی‌های MPF می‌باشد.

۳- مقایسه دو نوع مختلف ربات ماهی‌های MPF

تاکنون چند نمونه [۱۰-۵] از این تقلید برای ساخت ربات‌های مقلد انجام شده است. در این بخش دو طرح ساخته شده باله‌ی موجی را بررسی و مقایسه می‌نماییم، (شکل ۳). در برخی از این نمونه‌ها مانند نمونه‌های هو^[۶] و ژنگ^[۷]، میله‌های باله^۸ مستقیماً به محور سرووموتورها متصل است و میله‌های باله حرکت رفت و برگشتی را در یک صفحه انجام می‌دهند و باعث تولید موج طولی می‌شوند که نمونه‌ای از این مکانیزم در شکل (۳a) آمده است. در برخی دیگر از این مکانیزم‌ها مانند طرح‌های لو^[۸] [۱۰، ۸، ۵، ۱] و طرح ویلی^[۹] هر کدام از میله‌های باله به طور قائم به یک لنگ^{۱۱} متصل هستند که این لنگ‌ها توسط محور سرووموتورها به حرکت در می‌آیند و با حرکت کمانی شکل میله‌های باله، موج طولی تولید می‌شود که

از دیگر خواص این ربات، توانایی ترکیب حرکات گفته شده است. با بیشتر شدن تعداد باله ها درمهایها بررسی نیروهای هیدرودینامیکی موجود دشوارتر می شود [۱۲].

۵- طراحی مدل مکانیکی ربات ماهی

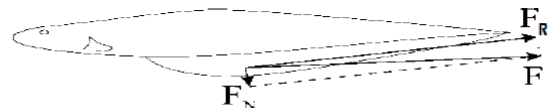
در اینجا طرح باله انجام شده مانند طرح های لو [۱۰، ۸، ۵، ۱] و طرح ویلی [۹] است و به صورت آنچه که در شکل (۵a) نشان داده شده است، شش سروموتور برای تولید موج سینوسی بکار می روند. اما آنچه که در این طرح خاص است، کاربرد یک سیستم مکانیکی شامل دو سروموتور جداگانه برای کنترل جهت و عمق است. هرلنگ در باله می تواند نسبت به راستای طولی بدنه ربات از -90° تا $+90^\circ$ درجه چرخش داشته باشد که میزان این چرخش برای تمامی سروموتورها یکسان و به وسیلهی کاربر قابل کنترل است. اختلاف فاز بین دو لنگ مجاور نیز یکسان و قابل تغییر بین 10° تا 120° درجه است.

برای تغییر جهت و تغییر عمق شنای ربات، همانطور که در شکل (۵b) آمده است، یک سیستم مکانیکی ویژه شامل دو سروموتور جداگانه طراحی شده است. برای حرکت به طرف چپ و راست ربات، باله به وسیلهی سروموتور کنترل جهت، نسبت به صفحه قائم فرضی عبورکننده از راستای طولی بدنه ربات از -90° تا $+90^\circ$ چرخش خواهد داشت و برای تغییر عمق ربات نیز باله ربات به وسیلهی موتور کنترل عمق نسبت به صفحه افق فرضی عبورکننده از راستای طولی بدنه ربات از -90° تا $+90^\circ$ درجه می چرخد. بدین ترتیب ربات ماهی توانایی شنا و مانور در کل استخر را خواهد داشت.

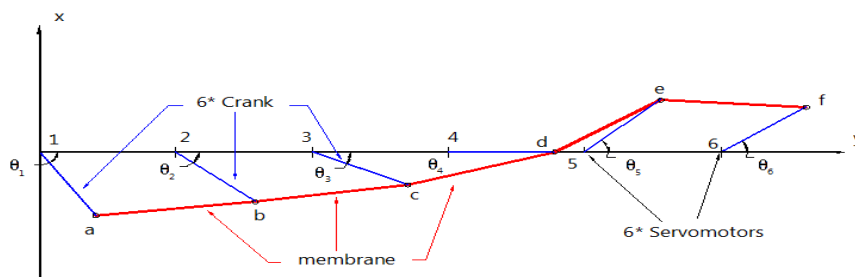
نیروی پیشران در طرح (b) ساده تر و دقیق تر از نوع (a) است. بنابراین طرح برگزیده ما طرح (b) است.

۴- تحلیل نیرویی ربات ماهی MFP با میله های باله موازی

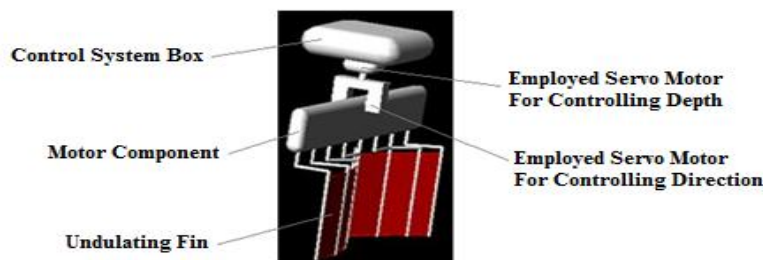
برای پیشروی و مانور ربات ماهی و البته برای غلبه بر نیروی برآیند نیروهای وزن و شناوری وارد بر ربات، به یک نیروی پیشران با قابلیت تغییر جهت نیاز داریم. برای کاهش چگالی ربات می توانیم از طرح های مختلفی استفاده نماییم [۱۸، ۹]، که البته در این ربات از یک جلیقه کاهنده چگالی استفاده می کنیم. برای حرکت رو به جلو، باید باله های ربات یک نیروی رو به عقب به سیال وارد نماید و برای غلبه بر نیروی برآیند وزن و شناوری، باله باید یک نیروی رو به پایین به سیال وارد نماید. به این دلیل که چگالی ربات حتی با جلیقه های کاهنده چگالی نیز باید بیشتر از چگالی سیال باشد. پس، مانند آنچه که در شکل (۴) آمده است، جهت برآیند این نیروها برای حرکت رو به جلوی ربات به شکل تأمین می شود.



شکل (۴): نیروهای تولید شده به وسیلهی باله و برآیند آن ها [۱۱] برای حرکت ربات رو به بالا، جهت این نیروی برآیند به جهت نیروی قائم و برای حرکت رو به پایین آن به سمت نیروی افقی نزدیک می شود. برای حرکت به طرف چپ و راست ربات نیز این نیرو در صفحات افقی و برای تغییر عمق ربات این نیرو در صفحات قائم چرخش خواهد داشت.



(a)



(b)

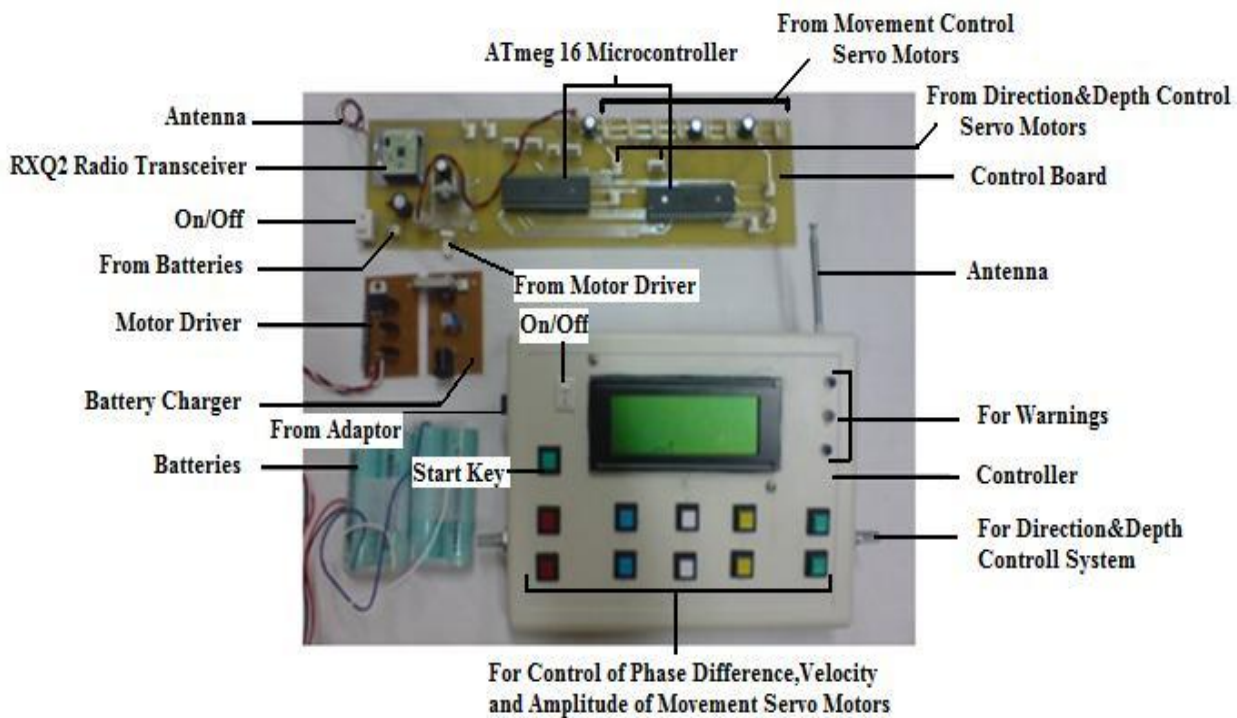
شکل (۵): (a) سروموتورهای موجود در باله با اختلاف فاز مشخص بین لنگ های مجاور،

(b) مدل شماتیک ربات ماهی

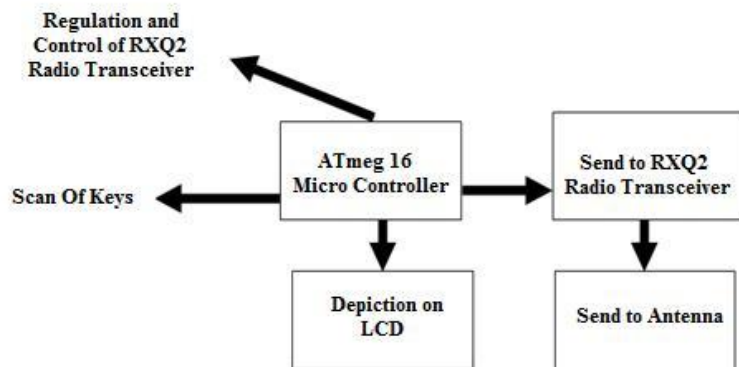
۶-۶- سیستم کنترل بی سیم

دسته کنترلی این ربات دارای یک صفحه کنترل است. برنامه‌ای که برای میکروکنترلر این صفحه نوشته شده، اعمال نشان داده شده در شکل (۷) را انجام می‌دهد. فرمان‌های برنامه‌ریزی شده در ریزکنترل کننده^{۱۷} موجود در این دسته در LCD نمایش داده می‌شوند و با زوج کلیدهای افزایشی و کاهشی دسته کنترلی قابلیت کنترل و تغییر دارند. سپس این فرمان‌ها با فرستنده مخابراتی^{۱۸} تقویت و به کمک آنتن موجود در دسته کنترلی به آنتن صفحه نصب شده بر روی ربات انتقال می‌یابد.

تاکنون چندین نمونه از سیستم‌های کنترلی این نوع ربات‌های ماهی اجرا شده است [۱۰، ۸، ۵]. این سیستم‌های کنترلی به روش‌های خاصی به کنترل ربات ماهی‌های تک باله زیرشکمی^{۱۹} [۸، ۵] و دو باله پهلویی^{۱۶} [۱۰] می‌پردازند. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، سیستم کنترلی ربات ماهی ارائه شده در این مقاله از دو قسمت تشکیل شده است. این سیستم شامل دسته کنترلی و صفحه کنترلی نصب شده بر روی ربات است.



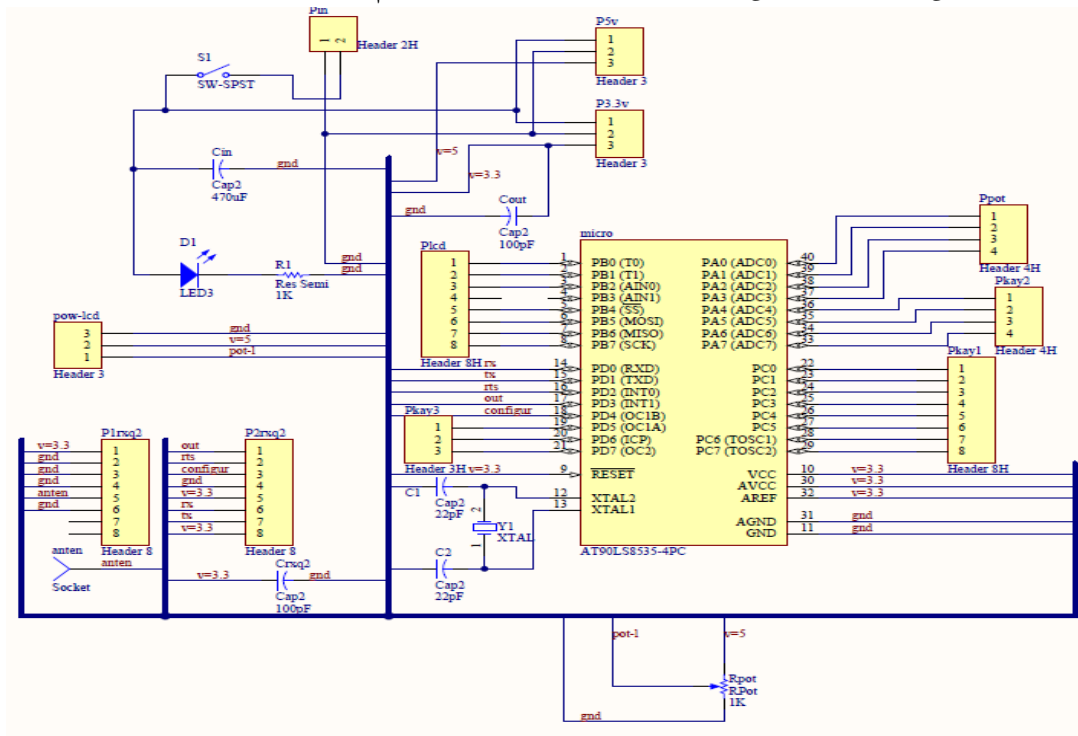
شکل (۶): اجزای سیستم کنترل ربات ماهی



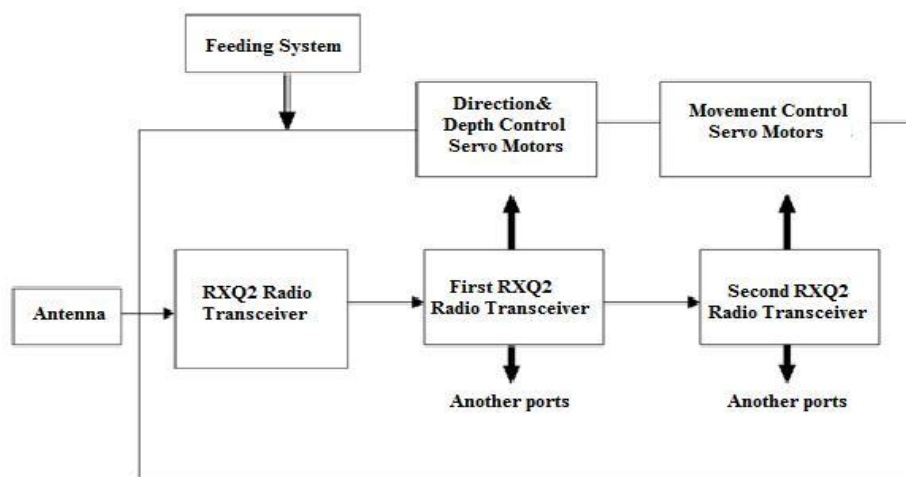
شکل (۷): روند کنترل فرستنده مخابراتی بکار رفته در صفحه کنترل دسته کنترلی ربات ماهی

سپس فرستنده مخابراتی موجود در صفحه کنترلی نصب شده بر روی ربات ماهی دریافت می‌شود و به ریزکنترل کننده اول تحویل داده می‌شود تا به کنترل سرووموتورهای کنترل جهت و عمق بپردازد. این ریزکنترل کننده بعد از پردازش اطلاعات قسمتی از اطلاعات را به کنترل کننده دوم تحویل می‌دهد تا کار کنترل سرووموتورهای موجود در باله را انجام دهد.

مدار صفحه کنترلی دسته کنترل در شکل (۸) نشان داده شده است. در قسمت صفحه کنترلی نصب شده بر روی ربات دو میکروکنترلر قرار داده شده است. همان‌طور که در شکل (۹) مشخص است ریز کنترل کننده اول فرستنده مخابراتی و موتورهای کنترل جهت و ارتفاع و ریزکنترل کننده دوم سرووموتورهای موجود در باله را کنترل می‌نماید. اطلاعات ارسالی از دسته کنترلی، به وسیله آنتن و

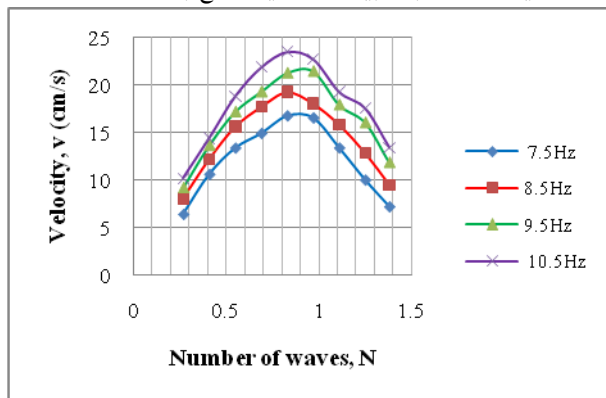


شکل (۸): مدار صفحه کنترلی دسته کنترل ربات ماهی



شکل (۹): روند کنترل سرووموتورها و فرستنده مخابراتی بکار رفته در صفحه کنترل نصب شده بر روی ربات

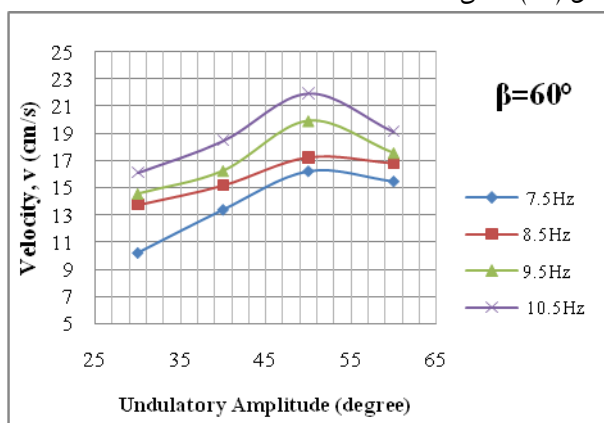
موج‌های تولید شده در باله بین ۰/۸ و یک موج باشد.



شکل (۱۱): نمودار سرعت حرکت سروموتور بر حسب تعداد موج‌های تولید شده در باله و فرکانس سروموتورها

اختلاف فاز لازم برای حرکت بهینه موج سینوسی در باله این ربات ماهی برابر با ۶۰ درجه است که این مقدار به کمک الگوریتم ژنتیک^{۱۹} محاسبه شده است.

در آزمایش‌های دیگری سرعت شنای ربات بر حسب دامنه چرخش لنگ‌ها نسبت به خط طولی باله، در نوسانات مختلف و در $\beta=60^\circ$ را اندازه‌گیری نمودیم. نتایج این بررسی در نمودار شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۲): نمودار سرعت حرکت سروموتور بر حسب دامنه چرخش لنگ‌ها و فرکانس سروموتورها در $\beta=60^\circ$

دیده می‌شود که سرعت بیشینه همواره در دامنه ۴۴ تا ۴۶ درجه اتفاق می‌افتد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بیان ضرورت پیروی از طبیعت برای ساخت محصولات جدید، به مقایسه مکانیزم‌های گوناگون برای تولید نیروی پیشران در سیال پرداختیم و با برگزیدن مکانیزم باله موجی چندتکه‌ای با میله‌های باله موازی، مزایای این نوع باله نسبت به پیشراننده‌های فعلی را بیان نمودیم. طرح باله در این مقاله در آینده می‌تواند جایگزین مکانیزم‌های فعلی برای تولید

مدار صفحه کنترلی نصب شده بر روی ربات ماهی در شکل (۱۰) آورده شده است.

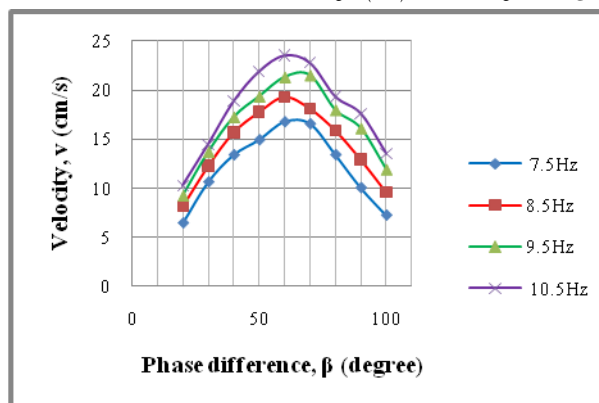
اختلاف فاز موجود در بین هر دو سروموتور مجاور سبب تولید موج سینوسی منظم می‌شود. با کنترل اختلاف فاز دو سروموتور مجاور، نوسان و همچنین دامنه چرخش محور سروموتورها، سرعت تولید و تعداد موج‌های سینوسی در باله ربات کنترل می‌شود. افزایش اختلاف فاز در سروموتورهای مجاور، موجب افزایش تعداد موج‌ها با رابطه (۱) می‌شود،

$$N = \frac{\beta \cdot n_f}{360}, n_f = N - 1 \quad (1)$$

که در آن N ، تعداد موج‌های تولید شده در باله و β ، اختلاف فاز بین سروموتورهای مجاور در باله است.

۷- نتایج آزمایشگاهی بر روی ربات ماهی

سرعت ربات ماهی، v را بطور آزمایشگاهی برای اختلاف فازهای گوناگون در سروموتورهای مجاور، β و در فرکانس‌های گوناگون سروموتورها، n اندازه گرفته‌ایم. در این بررسی‌ها، اختلاف فاز بین سروموتورهای مجاور در سراسر طول باله یکسان است. نتایج آزمایشگاهی مربوط به این آزمایش در نمودار شکل (۱۰) آورده شده است.



شکل (۱۰): نمودار سرعت حرکت سروموتور بر حسب اختلاف فاز و فرکانس سروموتورها

مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس سروموتورها، سرعت ربات ماهی افزایش می‌یابد و سرعت بیشینه، همواره بین اختلاف فازهای ۶۰ و ۷۰ درجه اتفاق می‌افتد.

به کمک رابطه (۱) و نمودار شکل (۱۰)، سرعت ربات را بر حسب تعداد موج‌های سینوسی تولید شده در باله و در فرکانس‌های گوناگون سروموتورها اندازه گرفته‌ایم. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند. دیده می‌شود که بیشینه سرعت حرکت ربات هنگامی اتفاق می‌افتد که تعداد

سرووموتور مجاور در باله، همواره دوران‌های نامناسب اطراف محورهای مختصات، که منجر به کاهش تعادل ربات می‌شود، کاهش می‌یابد و این موضوع سبب نوسانات سرعت کمتر در حرکت ربات ماهی می‌شود.

آزمایش‌های زیر فشار آب و بررسی عوامل موثر در افزایش بازدهی در این شرایط، می‌تواند دستور کار محققان قرار گیرد. در مطالعات آینده، پژوهشگران همچنین می‌توانند ظرفیت حمل بار و فاکتورهای موثر در بالا بردن این ظرفیت را بررسی نمایند. هماهنگی و کار گروهی ربات ماهی‌ها نیز مورد نظر محققان است [۱۳]. صرفه جویی در انرژی به وسیله تولید باله‌های الکتریکی و همچنین تولید ربات‌های بسیار کوچک برای رفع محدودیت‌های فضایی نیز مورد توجه دانشمندان است [۱۴، ۱۵].

۹- تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت پالایش نفت تبریز به دلیل تامین هزینه‌های مالی پروژه کمال تشکر را دارند.

نیروی پیشران لازم برای حرکت و مانور شده و مضرات کاربرد پره‌ها، که به تفصیل به آن‌ها پرداختیم را به حداقل مقدار ممکن برساند. در ادامه مقاله مکانیزم مکانیکی ویژه‌ای را مخصوص کنترل عمق و جهت مانور ربات ماهی طراحی نمودیم. سپس به طراحی مدارهای الکترونیکی و مخابراتی لازم برای کنترل سرووموتورهای بکار رفته در ربات ماهی پرداختیم. این سیستم کنترلی به کمک یک سیستم بی‌سیم ربات ماهی را از خارج استخر و تا فاصله ۱۵۰ متری کنترل می‌نماید. سپس، یک نمونه ربات ماهی طبق مکانیزم و طرح‌های بیان شده در این مقاله ساخته شد.

آزمایش‌ها نشان می‌دهند که سرعت بیشینه همواره با افزایش فرکانس سرووموتورها افزایش می‌یابد و در ربات ماهی بررسی شده در این مقاله این سرعت بیشینه همواره بین اختلاف فازهای ۶۰ و ۷۰ درجه اتفاق می‌افتد. در این اختلاف فازها تعداد موج تولید شده در باله بین ۰/۸ و ۱ موج خواهد بود. همچنین سرعت بیشینه همواره در دامنه چرخش لنگ بین ۴۴ و ۴۶ درجه اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش اختلاف فاز بین دو

۱۰- مراجع

- [۱] سیاه منصوری، محسن؛ طراحی مکانیزم و ساخت یک ربات ماهی باله موجی با الهام گیری از knife fish. یازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۹.
- [۲] Low, K. H., "Modeling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots," Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, pp. 615-632, 2009..
- [۳] Low, K. H., "Preface: Why biomimetic?," Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, pp. 511-512, 2009.
- [۴] Low, K. H., "Parametric study of modular and reconfigurable robotic fish with oscillating caudal fin mechanisms," International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 2007.
- [۵] Low, K. H., "Maneuvering of biomimetic fish by integrating a buoyancy body with modular undulating fins," International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 4, pp. 671-695, 2007.
- [۶] Hu, T., Shen, L., Lin, L., Xu, H., "Biological inspirations, kinematics Modelling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*," Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, pp. 633-645, 2009.
- [۷] Zhang, D., Hu, D., Shen, L., Xie, H., "Design of an artificial bionic neural network to control fish-robot's locomotion," Neurocomputing, Vol. 71, pp. 648-654, 2008.
- [۸] Low, K. H., "Design, development and locomotion control of bio-fish robot with undulating anal fins," International Journal of Robotics and Automation, Vol. 22, pp. 88-99, 2007.
- [۹] Willy, A., Low, K. H., "Development and initial experiment of modular undulating fin for untethered biorobotic AUVs," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics.
- [۱۰] Low, K. H., Willy, A., "Biomimetic motion planning of an undulating robotic fish fin," Journal of Vibration and Control, Vol. 12, pp. 1337-1359, 2006.
- [۱۱] Sfakiotakis, M., Lane, D. M., Davies, J. B. C., "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 24, pp. 237-252, 1999.
- [۱۲] Lauder, G. V., Drucker, E. G., "Morphology and experimental hydrodynamics of fish fin control surfaces," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 29, pp. 556-571, 2004.
- [۱۳] Shao, J., Wang, L., Yu, J., "Development of an artificial fish-like robot and its application in cooperative transportation," Control Engineering Practice Vol. 16, pp. 569-584, 2008.
- [۱۴] Sugiyama, K., Ishii, K., Kaneto, K., "Development of an oscillating fin type actuator for underwater robots," International Congress Series, Vol. 1301, pp. 214-217, 2007.
- [۱۵] Wanga, Z., Hanga, G., Li, J., Wang, Y., Xiao, K., "A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin," Sensors and Actuators A, Vol. 144, pp. 354-360, 2008.

- ^۱ Knifefish
- ^۲ Modular
- ^۳ Servomotor
- ^۴ Wireless
- ^۵ Drag force
- ^۶ Hu, T.
- ^۷ Zhang, D.
- ^۸ Fin rays
- ^۹ Low, K.H.
- ^{۱۰} Willy, A.
- ^{۱۱} Crank
- ^{۱۲} University of defense technology, Changsha
- ^{۱۳} Nanyang technological university, Singapore
- ^{۱۴} Slider
- ^{۱۵} Anal fin
- ^{۱۶} Pectoral fin
- ^{۱۷} Microcontroller
- ^{۱۸} Radio transceiver
- ^{۱۹} Genetic algorithm

