



دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
پنجمین کنفرانس ملی مهندسی برق و سیستم های هوشمند ایران



پنجمین کنفرانس ملی مهندسی برق و سیستم های هوشمند ایران

پنجمین کنفرانس ملی مهندسی برق و سیستم های هوشمند ایران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد - ۸ و ۹ اسفند ۱۳۹۷

ارایه مدل ساختاری کامل از عضله اسکلتی با در نظر گرفتن فیدبک گیرنده های حسی

مهتاب دادخواه^{۱*}، مهدی خضری^{۱و۲}، حمید محمودیان^{۱و۲}

^۱دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

^۲مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

mahtaabdakhah@gmail.com, ma.khezri@gmail.com, h_mahmoodian@pel.iaun.ac.ir

چکیده - در این مطالعه سعی بر آن است مدل کاملی از عضله اسکلتی ارایه شود؛ با این هدف که گویای رفتار آن به طور دقیق باشد. این مدل با در نظر گرفتن نقش پاسخ گیرنده های حسی در عملکرد ماهیچه ارایه می شود. با استفاده از ترکیب تطبیقی آوران های دوک عضلانی و گلژی تاندون، نیروی تولید شده در ماهیچه در شرایط مختلف عملکردی آن تعیین می شود. نتایج مدل پیشنهاد شده با توجه به مدل سازی دقیق گیرنده های حسی در حساسیت های دینامیکی و استاتیکی با نتایج تجربی فعالیت های عضلانی مطابقت داشته است. این مدل می تواند برای پیشگویی رفتار عضله در جلوگیری از آسیب های سیستم عصبی-عضلانی به کار رود.

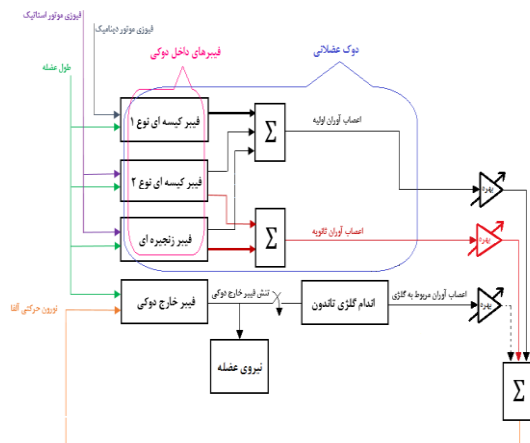
کلید واژه- مدل سازی عضله اسکلتی، بازخوردهای حسی، دوک عضلانی، گلژی تاندون، نیروی عضله

راهکاری مناسب برای شبیه سازی رفتار عضله و مدل سازی آن باشد [۱]. مدل هیل یکی از مهمترین و پرکاربردترین مدل های بافت عضله است. در این مدل رابطه نیروی کششی ایجاد شده با توجه به تغییرات طول عضله گاستروکنمیوس و سولئوس گربه تعیین می شود. این مدل از عناصر انقباضی که به صورت فنر، ضربه گیر و منبع نیرو نشان داده شده است، و عنصر الاستیکی سری و موازی برای تاندون و بافت های همبند که به صورت فنر نشان داده شده است، تشکیل شده است [۲]. در بعضی از مدل های ارایه شده برای ماهیچه های اسکلتی، به منظور بررسی تاثیر گیرنده های حسی دوک و گلژی در رفتار ماهیچه، مدل های ساختاری برای آن ها ارایه شده است. به عنوان مثال حسن مدلی ارایه داد که پاسخ کشش دوک عضلانی را در ماهیچه

۱- مقدمه

مدل سازی بافت ماهیچه های اسکلتی با توجه به رفتار و ساختار فیزیولوژیکی آن ها با در نظر گرفتن ساختاری متشکل از ورودی ها و خروجی هایی شبیه به ماهیچه واقعی انجام می شود. در حلقه های کنترلی سیستم عضلات اسکلتی، ماهیچه نقش عملگر را دارا است که مسئولیت اجرای حرکات را به عهده دارد. ماهیچه های اسکلتی نیروی لازم جهت انجام حرکات ارادی را تامین می کنند. تنظیم میزان نیروی اعمال شده، شدت انقباضات و ترتیب آن ها برای ایجاد حرکات دقیق و پیوسته از طریق ارتباط ماهیچه با سیستم عصبی مرکزی امکان پذیر است. ایجاد رابطه میان نیروی ماهیچه و خاصیت تحریک پذیری آن می تواند

تولید نیروی عضلانی معرفی می‌شود. مدل عضله ارایه شده متشکل از مدل ساختاری دوک عضلانی، گلژی تاندون و فیبرهای خارج دوکی ماهیچه است. همچنین با توجه به نیروی مطلوب عضله به صورت ابتکاری وزن‌های تطبیقی برای ترکیب اعصاب آوران تعیین می‌شود. بدین ترتیب مدل عضله می‌تواند برای مدلسازی عضلات مختلف مورد استفاده قرار گیرد. اجزای تشکیل دهنده مدل عضله به صورت سیستم بلوک دیاگرامی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام مدل کلی سیستم کنترلی حرکت در ماهیچه

۲-۱ مدل عضله، دوک عضلانی و گلژی تاندون

همانطور که در بلوک دیاگرام شکل ۱ مشخص شده است نورون حرکتی آلفا وظیفه عصب‌دهی فیبرهای خارج دوکی را به عنوان ورودی بر عهده دارند. این نورون‌ها از طریق اعصاب دستگاه عصبی مرکزی سبب اعمال تحریک به عضله می‌شوند. در حقیقت فعالیت اعصاب آوران مدل عضله به مدل نخاع (و یا مغز) هدایت می‌شوند و از نخاع به عنوان فعالیت نورون حرکتی آلفا به فیبرهای خارج دوکی بازخورد می‌شوند. فعالیت نورون حرکتی آلفا از روش ترکیب اعصاب آوران مربوط به دوک و گلژی بدست می‌آید. تحریک نورون حرکتی آلفا سبب اعمال نیرو به فیبرهای خارج دوکی می‌شود. فیبرهای خارج دوکی به صورت موازی با دوک‌های عضلانی قرار گرفته است. مدل مکانیکی فیبرهای خارج دوکی مشابه مدل هیل از دو فنر تشکیل

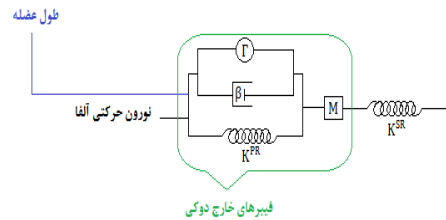
سولئوس گربه تعیین می‌کند. ناحیه حسی در مرکز مدل عضله قرار می‌گیرد و در دو طرف ناحیه حسی، نواحی قطبی قرار گرفته است. حسن با طراحی یک کنترلر PD که شامل اطلاعات طول و سرعت است تغییرات ایجاد شده در عضلات ناحیه حسی که مربوط به ایجاد نرخ آتش اعصاب حسی I_a و II است را نشان می‌دهد [۳]. مایلزونیک و لوب، گلژی تاندون را به عنوان یک گیرنده حساس به کشش معرفی کردند که اطلاعاتی از حالت فعال کشش ماهیچه‌ها را از طریق اعصاب آوران خود برای سیستم‌های عصبی مرکزی (مغز و نخاع) ارسال می‌کند. مطالعات این مدل مکانیکی روی ماهیچه سولئوس گربه انجام شده است. عناصر انقباضی به صورت فنر موازی هستند و دیگر عناصر شامل منبع تولید نیرو و ضربه گیر در نظر گرفته شده‌اند [۴]. پروچازکا و گیلارد نیز نقش رفلکس سیگنال‌های حسی اعصاب آوران اندام‌های عضلانی-تاندونی را در اندام‌های گربه مورد بررسی قرار دادند. برای طراحی آوران گلژی تاندون از یک فیلتر پایین گذر استفاده شده است. این مدل شامل ویژگی‌های تاندون، منحنی طول-نیرو و سرعت-نیرو، همچنین فعالیت بتا فیوزی موتورها است. فعالیت اعصاب آوران دوک و گلژی نیز با توابع تبدیل مدلسازی شده است [۵].

در این پژوهش با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف تاثیرگذاری گیرنده‌های حسی بر روی رشته‌های عصبی ماهیچه، مدلی کامل از عضله با توجه به ویژگی‌های ساختاری و عملکردی آن طراحی شده است. لازم به ذکر است دوک عضلانی و گلژی تاندون به عنوان گیرنده‌های مکانیکی سیستم حس-عمقی بدن در نظر گرفته شده‌اند. سیستم حس-عمقی زیرمجموعه‌ای از سیستم حسی-پیکری است که شامل گیرنده‌ها و مراکز پردازشی در سیستم عصبی است. اطلاعات از این گیرنده‌ها به اعصاب حسی منتقل می‌شود و از آنجا به مراکز بالا هدایت می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه ساختار مدل عضله اسکلتی با در نظر گرفتن گیرنده‌های حسی آن به منظور بررسی چگونگی

شده که فنر با ضریب سختی کمتر (K^{SR}) مربوط به فیبرهای عضلانی و فنر سخت تر (K^{PR}) مربوط به بافت‌های همبند (اتصال دهنده بافت‌ها و اندام‌های بدن) است. منبع نیرو Γ ، تحریک عصبی ایجاد شده در فیبرهای عضلانی و β ، نماد ویژگی دمپر مانند و نشان دهنده برهم‌پوشانی فیلامان‌های اکتین و میوزین است. M نیز جرم فیبرها را نشان می‌دهد (شکل ۲) [۱].



شکل ۲: مدل مکانیکی فیبرهای خارج دوکی

در رابطه با ساختار دوک عضلانی در مدل عضله ارایه شده می‌توان گفت مدل دوک شامل سه نوع فیبر داخل دوکی (فیبر هسته کیسه‌ای نوع ۱، فیبر هسته کیسه‌ای نوع ۲ و فیبر زنجیره‌ای) است. ساختار هر سه مدل فیبرها شبیه به یکدیگر است لیکن برای پارامترهای هر مدل، مقادیر متفاوتی لحاظ شده است [۱]. هر کدام از مدل‌های فیبرهای داخل دوکی به دو ورودی تغییرات طول و عصبدهی نورون‌های فیوزی موتور پاسخ می‌دهند. فیبر کیسه‌ای نوع ۱، تحت شرایط عصبدهی فیوزی موتور دینامیک، و فیبرهای کیسه‌ای نوع ۲ و زنجیره‌ای از طریق نورون‌های حرکتی فیوزی موتور استاتیک، عصبدهی می‌شوند. خروجی‌های مدل دوک عضلانی نیز شامل فعالیت آوران اولیه (I_a) و آوران ثانویه (II) می‌شود. پاسخ پایانه I_a از فعالیت گیرنده‌های آوران در سه نوع فیبر داخل دوکی حاصل می‌شود. پایانه II نیز از فیبرهای کیسه‌ای نوع ۲ و زنجیره‌ای بدست می‌آید. برای هر دوک عضلانی دو ناحیه در نظر گرفته می‌شود: ناحیه حسی و ناحیه قطبی. کشش در ناحیه حسی سبب تحریک رشته‌های آوران، دپلاریزه شدن غشا و افزایش نرخ پتانسیل آتش می‌شود. ناحیه حسی با یک فنر مدلسازی کرده است که در آن کشش با آتش اعصاب آوران، متناسب است. در ادامه ناحیه

حسی فیبرهای داخل دوکی از هر دو طرف، دو ناحیه قطبی وجود دارد. نواحی قطبی شامل فنر غیرفعال موازی با عناصر انقباضی تولید کننده نیروی فعال و عنصر دمپر هستند. ساختار مدل مکانیکی هر کدام از فیبرهای داخل دوکی مشابه با مدل مکانیکی فیبرهای خارج دوکی مدلسازی شده است. در مدل دوک عضلانی L ، طول فیبرها؛ L^{PR} ، طول ناحیه قطبی؛ L_0^{SR} ، طول اولیه ناحیه حسی؛ L_N^{SR} ، آستانه طول ناحیه حسی؛ $L_{secondary}$ ، طول اولیه آوران ثانویه و L_N^{PR} ، نشان دهنده طول آستانه ناحیه قطبی است. G ، معیار ثابت مربوط به کشش ناحیه حسی در فیبرهای داخل دوکی است. تغییر طولی ایجاد شده در ناحیه حسی هر کدام از فیبرها با عبارت $(\frac{T}{K^{SR}})$ محاسبه شده است. (معادله ۱) [۴].

(۱)

$$I_{a_{potential}} = G \times \left[\frac{T}{K^{SR}} - (L_N^{SR} - L_0^{SR}) \right]$$

X ، نشان دهنده درصدی از آوران ثانویه است که در ناحیه حسی واقع شده است و هنگامی که تحت کشش قرار می‌گیرند با ضرب شدن در G ، آتش آوران ثانویه بدست می‌آید (معادله ۲) [۴].

(۲)

$$II_{potential} = G \times \left\{ X \times \frac{L_{secondary}}{L_0^{SR}} \times \left[\frac{T}{K^{SR}} - (L_N^{SR} - L_0^{SR}) \right] + (1 - X) \times \frac{L_{secondary}}{L_0^{PR}} \left(L - \frac{T}{K^{SR}} - L_0^{SR} - L_N^{PR} \right) \right\}$$

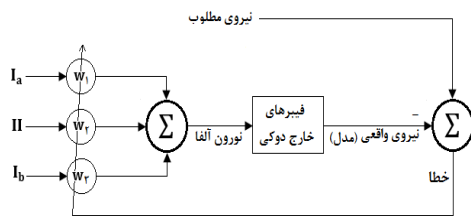
در رابطه با ساختار گلژی تاندون‌ها در مدل عضله ارایه شده می‌توان گفت ساختار این گیرنده‌های حسی ساده‌تر از دوک‌های عضلانی است. آن‌ها از دنباله‌های حسی فیبرهای تاندونی تشکیل شده‌اند [۶]. گلژی‌ها به صورت سری در میان فیبرهای عضلانی و تاندون و آپونورز قرار گرفته‌اند. یک آکسون به هر اندام گلژی وارد شده و در آنجا به شاخه‌هایی منشعب می‌شود و در میان دسته کلاژن‌های گلژی قرار می‌گیرند. از کنار هم قرار گرفتن کلاژنی و دپلاریزاسیون دنباله‌های آوران حساس به فشار، غشا دپلاریزه می‌شود و به آکسون اعصاب آوران گلژی (I_b).

G بدست می‌آید. عبارت $(L_{sens}^{comX} - L_{sens_rest}^{com})$ نیز نشان دهنده کشش طولی در ناحیه حسی است [۹].

$$I_{b_{potential}} = G \times \sum_{f=1}^2 (P_{f-comX} \times A_{f-inner}) \times (L_{sens}^{comX} - L_{sens_rest}^{com})$$

۲-۲ ترکیب تطبیقی آوران‌های عضله

در این پژوهش به منظور تعمیم مدل عضله ارایه شده برای عضلات اسکلتی مختلف (و نه برای عضله‌ای خاص) از فیلتر تطبیقی حداقل میانگین مربعات در مدل‌سازی فعالیت نورون حرکتی آلفا استفاده شده است. وزن‌های تطبیقی با توجه به نیروی مطلوب عضله در اندام‌های خاص تعیین می‌شوند. شکل ۴ نشان دهنده بلوک دیاگرام فیلتر تطبیقی بکار گرفته شده در مدل است. f_r ، نیروی واقعی مدل و f_d ، معرف نیروی مطلوب است. خطای سیگنال از تفاوت مقدار واقعی و مطلوب بدست می‌آید. مقادیر خطای کمینه به معنای عملکرد بهتر فیلترینگ تعریف می‌شود [۱۰]. W_1 ، W_2 و W_3 نیز به ترتیب گویای بردار وزن مربوط به فعالیت اعصاب آوران I_a ، I_II و I_b هستند [۱۱].

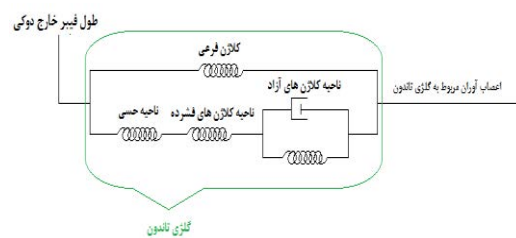


شکل ۴: بلوک دیاگرام سیستم فیلتر تطبیقی حداقل میانگین مربعات

۲-۳ نتایج

مدل عضله اسکلتی در محیط سیمولینک نرم افزار متلب ۲۰۱۸ مدل‌سازی شده است. نتایج آزمایشگاهی استفاده شده در این مدل از عضله سولئوس و یا گاستروکنمیوس گربه بدست آمده است. در این مدل طول عضله تحت کشش رمپ و هولد با سرعت 30 mm/s قرار

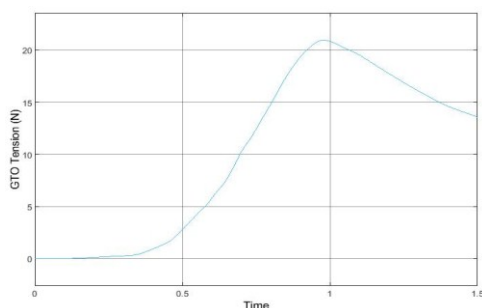
پتانسیل عمل وارد می‌شود [۷]. آکسون پایانه عصبی I_b به گلژی تاندون وارد می‌شود. چندین فیبر ماهیچه‌ای نیز به یک گلژی تاندون متصل است و هر فیبر متعلق به یک واحد حرکتی متفاوت است. انقباض یک واحد حرکتی سبب کشیدگی فیبرهای متصل به تاندون و ایجاد فعالیت در آکسون I_b می‌شود [۸]. اطلاعات گلژی تاندون‌ها به دستگاه عصبی مرکزی رفته و در یک مدار رفلکسی، نیروی لازم برای تنظیم موقعیت هر عضله مشخص می‌شود. تنظیم نیروی وارد شده به عضله از خستگی و پاره شدن آن جلوگیری می‌کند [۱]. ورودی این مدل شامل تنش ۲ فیبر عضلانی است. در این مدل هر فیبر ماهیچه‌ای که به اندام گلژی وارد شده است در ارتباط با دو نوع کلاژن فرعی و برانگیخته قرار می‌گیرد [۹]. شکل ۳، مدل مکانیکی گلژی تاندون را نشان داده است. ناحیه حسی نشان دهنده کلاژن‌هایی است که در ارتباط مستقیم با دنباله‌های حسی هستند و با فتر مدل شده است. کلاژن‌های فشرده شده در شبکه کلاژنی، موازی با یک دمپر قرار گرفته‌اند. دمپر نشان دهنده توانایی رشته‌های کلاژن در بازیابی مجدد رشته‌های کلاژن پس از کشش است. خروجی مدل اندام گلژی به صورت فعالیت آوران‌ها در نواحی عصب‌دهی در ارتباط با شبکه کلاژنی است و با محاسبه کشش در ناحیه حسی مدل‌سازی شده است.



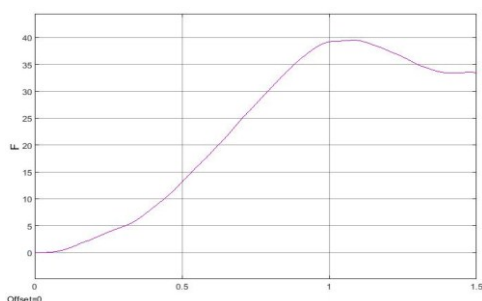
شکل ۳: مدل مکانیکی گلژی تاندون

عبارت $\sum_{f=1}^2 (P_{f-comX} \times A_{f-inner})$ نشان دهنده مساحت کلی سطح مقطع عرضی کلاژن‌ها است. فعالیت آوران‌ها در نواحی عصب‌دهی در ارتباط با شبکه‌های کلاژنی با محاسبه کشش در ناحیه حسی توسط فاکتور بهره

افزایش می‌یابد. از طرفی نیروی کلی فیبرهای خارج دوکی است و از ترکیب روابط کششی دوک، گلژی و فیبرهای خارج دوکی حاصل می‌شود. نمودار نیروی ایجاد شده در حقیقت نشان دهنده برهم‌پوشانی فیلامان‌های اکتین و میوزین و تاثیر آن بر کشش یا انقباض ایجاد شده در عضله است. در ابتدا عضله از حالت استراحت، تحت انقباض (یا کشش) قرار می‌گیرد. فیلامان‌های اکتین و میوزین در فاصله‌ای نسبی از یکدیگر قرار دارند و با اعمال انقباض به یکدیگر نزدیک می‌شوند تا جایی که پل متقاطع تشکیل می‌دهند. حرکات کشویی این فیلامان‌ها سبب افزایش نیروی انقباضی می‌شود تا جایی که کاملاً روی یکدیگر قرار می‌گیرند. نمودارهای نیروی ایجاد شده در گلژی تاندون و نیروی کلی عضله به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.



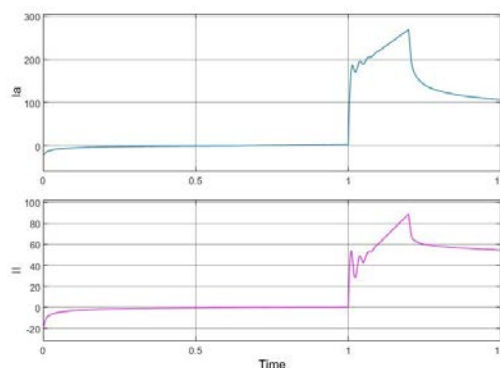
شکل ۶: نیروی گلژی تاندون



شکل ۷: نیروی کلی عضله

با مقایسه مراحل ایجاد و بازه فعالیت نیروی کلی عضلانی در مدل ارائه شده و نتایج بدست آمده توسط هرزوغ (در فرکانس ۳۰ هرتز) [۱۳]، می‌توان نتیجه

گرفته است. همانطور که اشاره شد نیروی عضله از تنش ایجاد شده در فیبرهای خارج دوکی حاصل می‌گردد. ترکیب اعصاب آوران I_a ، I_b و II سبب تحریک نورون حرکتی آلفا و اعمال نیرو به فیبرهای خارج دوکی می‌شود. در رابطه با عملکرد I_a و II (شکل ۵) می‌توان گفت در گروه آوران I_a ، تحریک فیوزی موتور باعث افزایش قابل توجه حساسیت کششی می‌شود. این افزایش به دلیل افزایش حساسیت دینامیکی (حساسیت سرعت) نسبت به حساسیت استاتیکی است. در گروه آوران II ، تحریک گامای استاتیک سبب افزایش حساسیت استاتیک و بایاس می‌شود. هر چه سرعت کشش دوک عضلانی بیشتر باشد، طول ناحیه حسی توسط دنباله‌های آوران به مقدار بیشتری تحت کشش قرار می‌گیرد و دپلاریزاسیون با مقادیر بیشتری رخ می‌دهد. مقادیر افزایش نرخ آتش در I_a بیشتر از پاسخ آوران II بوده است و نشان می‌دهد سرعت جریان عصبی I_a بیشتر از فیبرهای عصبی II است و این مسئله با پاسخ حالت بیولوژیکی دوک عضلانی نیز مطابقت دارد.



شکل ۵: فعالیت اعصاب آوران I_a و II

پاسخ‌های آوران I_b (پاسخ‌های استاتیک و دینامیک) نیز در طول فعالیت واحد حرکتی فیبر عضلانی S بررسی شده است [۱۲]. هر واحد حرکتی به طور معمول شامل یک یا دو فیبر عضلانی است که به گلژی تاندون وارد شده است. نتایج خروجی اعصاب آوران مدل گلژی تاندون از رقابت میان خروجی‌های آوران دو شبکه کلازنی حاصل می‌شود. آتش آوران شبکه کلازنی بر اساس کشش در ناحیه حسی آن مدل‌سازی شده است. هر چه کشش یا نیروی اعمال شده به گلژی بیشتر باشد، فرکانس تحریک نیز

transduction in the muscle spindle," J. Neurophysiol., vol. 96, pp. 1789-1802, March 2006.

- [5] A. Prochazka, D. Gillard and D. J. Bennett, "Implications of Positive Feedback in the Control of Movement," The american physiological society, J. Neurophysiol., vol. 77, Issue. 6, pp. 3237-3251, June. 1997.
- [6] S. Roatta and M. Passatore, "Muscle sensory receptors," Wiley, encyclopedia of biomed eng., April. 2006.
- [7] G. E. Loeb and M. Mileusnic, "Proprioceptors and models of transduction," Springer, pp. 437-465, November. 2015.
- [8] U. Proske and S. C. Gandevia, "The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force," The american physiological society, J. Neurophysiol., vol. 92, Issue. 4, pp. 1651-1697, October. 2012.
- [9] M. P. Mileusnic, J. E. Brown, N. Lan, and G. E. Loeb, "Mathematical models of proprioceptors. II. Structure and function of the golgi tendon organ," J. Neurophysiol., vol. 96, pp. 1772-1788, March 2006.
- [10] A. Zaknich, "Principles of adaptive filters and self-learning systems," Springer, Advanced textbooks in control and signal processing, Adaptive filtering., 2005.
- [11] B. Widrow, J. McCool and M. Ball, "The complex LMS algorithm," J. Journals & Magazines, Proceedings of IEEE., vol. 63, Issue. 4, April. 1975.
- [12] J. E. Gregory and U. Proske, "The responses of Golgi tendon organs to stimulation of different combinations of motor units," The Physiological Society, J. Physiol., vol. 295, Issue. 1, pp. 251-262, October. 1979.
- [13] W. Herzog and T. R. Leonard, "Force enhancement following stretching of skeletal muscle: a new mechanism," The Company of Biologists, J. Experimentally Biology., pp. 1283-1275, 2002.

گرفت نیروی عضله در مدل ارایه شده با ثبت تجربی نیروی کلی عضلانی مطابقت داشته است.

۴- نتیجه گیری

این مقاله بر مدلسازی خواص استاتیکی و دینامیکی عضلات در شبیه سازی کامپیوتری عضله متمرکز شده است. در این مدل ویژگی‌ها و مدل‌های اجزای تشکیل دهنده عضله بررسی شده است. این مدل می‌تواند به منظور بدست آوردن اطلاعات مکانیکی در روابط میان اجزای تشکیل دهنده عضله مورد استفاده قرار گیرد. همچنین برای ارزیابی نقش نوروهای محرک عضله نیز می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. در این مدل ساختار مکانیکی ماهیچه با توجه به روابط عصبی میان اجزای تشکیل دهنده آن مدلسازی شده است. به دلیل مطابقت نتایج مدل با محدوده بیولوژیکی ثبت‌های واقعی از عضله، این مدل می‌تواند به عنوان یک مدل پایه عضلانی برای ماهیچه اسکلتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مراجع

- [1] C. K. Lin and P. E. Crago, "Structural model of the muscle spindle," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 30, pp. 68-83, 2002.
- [2] A. V. Hill, "The heat of shortening and the dynamic constant of muscle," Section of biophysics, Department of physiology, 1938.
- [3] Z. A. Hasan, "A model of spindle afferent response to muscle stretch," J. Neurophysiol., vol. 49, no. 4, pp. 989-1006, April. 1983.
- [4] M. P. Mileusnic, J. E. Brown, N. Lan, and G. E. Loeb, "Mathematical models of proprioceptors. I. control and