



## Reconstruction of the neural network model of motor control for virtual *C. elegans* on the basis of actual organism information

Zahra Nazem Ashora<sup>1</sup>, Majid Hassanpour-ezatti<sup>2\*</sup>, Behrooz Raesi<sup>1</sup>, Ardeshir Dolati<sup>1</sup>

1. Dept. Mathematics, Basic Sciences School, Shahed University, Tehran, Iran

2. Dept. Biology, Basic Sciences School, Shahed University, Tehran, Iran

Received: 10 Mar 2012

Accepted: 18 Apr 2012

### Abstract

**Introduction:** *C. elegans* neural network is a good sample for neural networks studies, because its structural details are completely determined. In this study, the virtual neural network of this worm that was proposed by Suzuki *et al.* for control of movement was reconstructed by adding newly discovered synapses for each of these network neurons. These synapses are newly discovered in the actual organism by laser ablation technique.

**Methods:** An input weight of each neuron in this network was obtained from wormweb site. Internal state of each neuron and the whole network in this new situation were calculated after mathematical modeling. Then output of the network in this new model was simulated and drawn by Simulink software in MATLAB environment and compared with Suzuki model outputs.

**Results:** The results show that in spite of adding new synapses to the last model, its output shape does not change and preserve its sinusoidal form, and only its frequency, phase and amplitude of internal state of whole network are changed after modification. Also, adding of these new synapses to models change silent neurons in forward motion in Suzuki model to sinusoidal internal state producing neurons in this new situation.

**Conclusion:** These findings not only show that this neural network has high capability for production of more output patterns than previously supposed, but also illustrates the effect of addition of new synapses per each neuron and rewiring on the whole network outputs as a simulation of situation that possibly happens after neural plasticity.

**Key words:** *C. elegans*, motor neural network, internal state

\* Corresponding author e-mail: Hassanpour@shahed.ac.ir  
Available online at: www.phypha.ir/ppj

## بازسازی مدل شبکه عصبی کنترل حرکت در سی الگانس مجازی بر اساس اطلاعات موجود زنده

زهرا ناظم عاشورا<sup>۱</sup>، مجید حسن پورعزتی<sup>۲\*</sup>، بهروز رئیسی<sup>۱</sup>، اردشیر دولتی<sup>۱</sup>

۱. گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شاهد، تهران

۲. گروه زیست شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شاهد، تهران

پذیرش: ۳۰ فروردین ۹۱

دریافت: ۲۰ اسفند ۹۰

### چکیده

**مقدمه:** شبکه عصبی کرم سی الگانس یک نمونه خوب برای مطالعه شبکه های عصبی است، زیرا جزئیات ساختاری آن بطور کامل شناسایی شده است. در این مقاله، شبکه مجازی کنترل کننده حرکت این کرم که توسط سوزوکی و همکاران پیشنهاد شده بود با افزودن سیناپس های جدیدی به آن باز سازی شد. این سیناپس ها به تازگی و توسط روش حذف نورون توسط لیزر در موجود واقعی شناسایی شده اند.

**روش ها:** وزن های ورودی هر یک از نورون ها در این شبکه عصبی از سایت wormweb بدست آمد. حالت درونی برای تک تک نورون ها و کل خروجی این شبکه عصبی در شرایط جدید پس از مدل سازی ریاضی محاسبه شد. سپس با استفاده از نرم افزار Simulink در محیط MATLAB خروجی شبکه در مدل جدید شبیه سازی و ترسیم و با خروجی حاصل از مدل اولیه ارائه شده توسط سوزوکی مقایسه شد.

**یافته ها:** نتایج نشان می دهند که علارغم افزوده شدن این سیناپس های جدید به شبکه عصبی قبلی، خروجی آن همچنان شکل سینوسی خود را حفظ می کند و افزوده شدن این سیناپس های جدید فقط سبب تغییر در فرکانس، فاز و دامنه حالت درونی کل شبکه عصبی نسبت به مدل قبلی می شود.

**نتیجه گیری:** این یافته ها نه تنها نشان دهنده توانمندی تولید الگوهای بیشتری توسط این شبکه عصبی در مقایسه با مدل پیشنهادی قبلی است، بلکه همچنین نشان دهنده اثر افزایش تعداد سیناپس ها به ازای هر نورون و اثر مدار بندی جدید این شبکه بر خروجی کل آن است که می تواند تا حدودی به عنوان شبیه سازی از پدیده ای شکل پذیری نورونی در نظر گرفته شود. همچنین افزوده شدن این سیناپس های جدید به مدل سوزوکی سبب تغییر نورون های خاموش به هنگام حرکت رو به جلو در مدل سوزوکی شده و این نورون ها در این شرایط شروع به تولید حالت درونی سینوسی می کنند.

**واژه های کلیدی:** کرم سی الگانس، شبکه عصبی حرکتی، حالت درونی

### مقدمه

رفتارهای پیچیده حیوانات شده است. تکرار پذیری آزمایشات و کنترل دقیق تر شرایط محیطی نسبت به آزمایشات انجام شده بر روی حیوانات با استفاده از مدل های مجازی مدار عصبی راحت تر است. البته مدل سازی و بررسی و تحلیل عملکردهای مدارهای عصبی مدل ها بر اساس اطلاعات حاصل از موجودات پر سلولی که تعداد کمتری نورون در سیستم اعصاب خود دارند نیز کار را راحت تر می کند. سی الگانس (*Caenorhabditis*)

امروزه به لطف مدل های ریاضی و شبیه سازی های کامپیوتری کمک شایانی به کشف اصول حاکم بر مدارهای عصبی و نحوه عملکرد آنها و ارتباط این عملکردها با

\* نویسنده مسئول مکاتبات: Hassanpour@shahed.ac.ir

www.phypha.ir/ppj

وبگاه مجله:

*elegans*) یک جاندار شاخص در تحقیقات ژنتیک و علوم اعصاب است. این کرم دارای ساختار عصبی ساده‌ای بوده و سیستم اعصاب این کرم به کمک تحقیقات میکروسکوپی الکترونی مورد شناسایی قرار گرفته است. نوع، موقعیت و تعداد سیناپس‌های موجود بین نورون‌های سیستم اعصاب این کرم به کمک آزمایش‌های انهدام با لیزر (Laser ablation) مشخص شده است. سیستم عصبی این کرم برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ معرفی شد [۱۹] و سپس در سال ۱۹۹۳ بر اساس این ساختار عصبی، تئوری عصبی حاکم بر حرکت سینوسی این حیوان بیان شد [۱۳]. تاکنون انواع مختلف حرکت‌های این کرم مورد مدل‌سازی واقع شده اند [۱۰، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. امروزه، تلاش‌های بسیاری برای شبیه‌سازی کامل تری از شبکه عصبی حرکتی این کرم صورت می‌گیرد تا شاید از آن بتوان در زمینه ساخت ربات‌ها استفاده کرد [۱۸].

بدن سی‌الگانس بطور متعارف از ۹۵۹ سلول تشکیل شده است و سیستم عصبی آن حدود ۳۰۲ نورون دارد. نورون‌های سیستم عصبی این کرم در سه عقده عصبی سری، دمی و طناب شکمی مستقر شده اند. سیستم عصبی این کرم در عمل به دو سیستم عصبی مستقل از هم تقسیم شده است: سیستم عصبی حلقی با ۲۰ نورون و سیستم عصبی حرکتی پیکری با ۲۸۲ نورون. این دو سیستم از طریق یک نورون واسط با هم در ارتباط هستند [۱]. سیستم عصبی حرکتی این کرم حاوی ۶۴۰۰ سیناپس شیمیایی و ۹۰۰ سیناپس الکتریکی بوده و این مجموعه نورونی از طریق ۱۵۰۰ اتصال عصبی-عضلانی با عضلات در ارتباط هستند. نورون‌های موجود در سیستم اعصاب این کرم بر اساس عملکرد و شکل ظاهریشان به ۱۱۸ گروه مختلف تقسیم می‌شوند که هر گروه بین ۱ تا ۱۳ نورون دارد. هر یک از نورون‌های سیستم اعصاب این کرم با ۲ تا ۳ حرف بزرگ انگلیسی نام‌گذاری می‌شوند که این حروف، حروف اول کلمات انگلیسی هستند که موقعیت استقرار این نورون‌ها را در سیستم اعصاب کرم تعیین می‌کنند، برای مثال از حروف V، D، L و R به ترتیب، برای نام‌گذاری نورون‌های واقع شده در ناحیه شکمی، پشتی، چپ و راست سیستم اعصاب این کرم استفاده می‌شود [۱۹]. این نورون‌ها از نظر عملکردی به چهار گروه: حسی (Sensory)، حرکتی (Motor)، واسط (Interneuron) و چند عملکردی (Multifunctional)

تقسیم‌بندی می‌شوند. حرکت به سمت جلو و عقب سی‌الگانس سینوسی است و این کرم به وسیله انقباض ماهیچه‌های شکمی و پشتی دیواره بدنش این حرکت را تولید می‌کند. این ماهیچه‌ها در ۲۳ الی ۲۴ ردیف در طول بدن او قرار گرفته‌اند. انقباض ماهیچه‌های پشتی و شکمی بدن این کرم، حرکتی موجی شکل را در بدن کرم ایجاد می‌کنند که سبب حرکت کرم به سمت جلو یا عقب می‌شوند. انقباض ماهیچه‌های پشتی و شکمی بدن کرم برای ایجاد این حرکات موجی باید دارای فازی متضاد با یکدیگر بوده و به هنگام انقباض ماهیچه شکمی، ماهیچه‌های پشتی باید غیر فعال باشند و برعکس. تاکنون دو مدل سازی برای این نوع حرکت در سی‌الگانس با دو پیش فرض مختلف ارائه شده است. مدل اول پیشنهاد می‌کند که شبکه نورونی کنترل‌کننده حرکت به طور مستقیم الگوی منظم لازم برای فعال کردن ماهیچه‌ها را تولید می‌کند و این شبکه عصبی دارای یک مولد الگوی مرکزی (central pattern generators) یا CPG است که این مولد، الگوی مورد نیاز را برای فعال سازی ماهیچه‌ها تولید می‌کند و مدل دوم بیان می‌کند که سیستم اعصاب حیوان سیگنال حرکتی لازم برای فعال شدن ماهیچه‌های بدن را بر اساس اطلاعات وضعیت بدن و با توجه به اطلاعات رسیده از گیرنده‌های حس وضعیت بدن تولید می‌کند [۱۰]. در این مقاله، مدل شبکه عصبی ۱۰ نورونی ارائه شده توسط سوزوکی و همکاران برای مدار ایجادکننده الگوی حرکت فقط به سمت جلو در این کرم انتخاب شد. این مدل بر اساس وجود CPG‌های مرکزی مدل سازی شده است. سوزوکی مدل خود را برای شبکه عصبی حرکتی این کرم بر اساس اطلاعات پژوهشگری به نام وایت و همکارانش [۱۹] طراحی کرده است. مدل سوزوکی در این مقاله بر اساس اطلاعات ارائه شده در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ توسط پژوهشگری بنام Bhatla [۲] مورد اصلاح واقع شده و در طی این اصلاحات اتصالات سیناپسی جدیدی برای تک تک نورون‌ها این مدار حرکتی که در کرم واقعی کشف شده‌اند به مدل شبکه عصبی حرکتی ارائه شده توسط سوزوکی افزوده شدند. فرضیه ما در این تحقیق این است که با افزودن اتصالات سیناپسی جدید به نورون‌های این شبکه و تغییر در میزان حالت درونی (Internal state) هر یک از این نورون‌ها، بر اساس تغییری که در میزان وزن ورودی هر نورون

درونی تک تک نورون ها به تنهای و یا نورون های مرتبط با هم در یک شبکه عصبی مجازی است.

## مواد و روش ها

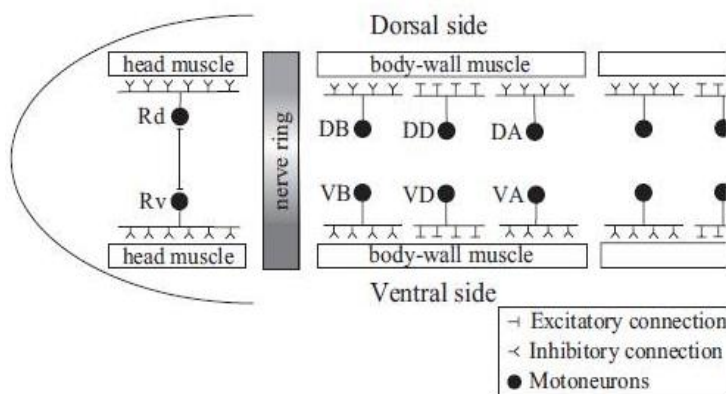
**آشنایی با مدار عصبی حرکت سینوسی بدن کرم**  
**بر اساس مدل ارائه شده توسط سوزوکی:** مدل اولیه ای مجازی که در این پژوهش تغییرات بر اساس اطلاعات کرم واقعی بر روی آن اعمال شده است، مدل ارائه شده توسط دانشمندی به نام سوزوکی و همکارانش است که در سال ۲۰۰۵ ارائه شده است [۱۷]. جزئیات این مدل مجازی بر اساس ویژگی های خاص سیستم اعصاب کرم واقعی طراحی شده و به شرح زیر می باشد. سیستم عصبی این کرم شامل یک گانگلیون سری (head ganglia)، یک گانگلیون دمی (tail ganglia) و یک طناب عصبی شکمی (ventral cord) است و نورون های این سیستم به سه گروه حسی (sensory)، حرکتی (motorneuron) و اینتر نورون (interneuron) تقسیم بندی می شوند. دو گانگلیون سری و دمی دارای هر سه نوع این نورون ها بوده و سوزوکی و همکارانش برای این بخش از شبکه عصبی توانایی مدار تولید کننده الگو (rhythmic pattern generator) را قائل شده اند، زیرا این دو گانگلیون دارای نورون های هستند که دارای ارتباط مهارتی دو طرفه با هم می باشند. این یک ویژگی اصلی برای مدارهای تولید کننده الگوی مرکزی محسوب می شود [۱۹]. بر اساس این اطلاعات در مدل سوزوکی (شکل ۱)، دو نورون بنام های

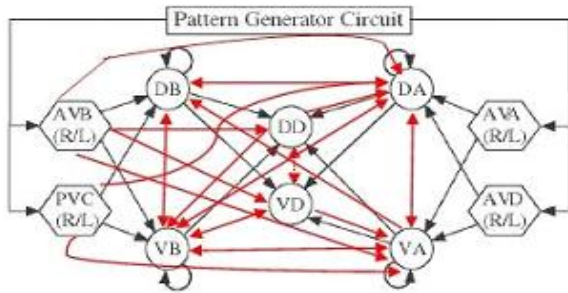
(Input weight) رخ می دهد، وزن خروجی آنها در این شبکه عصبی حرکتی تغییر کرده و شرایط جدیدی در برون ده این شبکه عصبی حاصل می شود و در کل به توان ایجاد الگوهای حرکتی شبکه قبلی قابلیت های افزوده می شود. پیش فرض ما در ارتباط با نحوه جمع بندی وزن های ورودی به هر سیناپس این است که این سیناپس ها دارای جمع بندی خطی برای تولید میزان حالت درونی نورون هستند [۶].

اما منظور از حالت درونی برای هر یک از نورون ها در این پژوهش میزان نوسانات الکتریکی پتانسیل غشاء آنها است. مفهوم حالت درونی یک مفهوم مورد استفاده رایج در مطالعات شبکه عصبی است و شرایطی مشابه با آنچه ما در اینجا و در مدل خود برای حالت درونی تعریف می کنیم قبلاً نیز توسط دانشمندی بنام فوجی ساوا و همکارانش در سال ۲۰۰۶ برای بررسی میزان خروجی شبکه عصبی نورون های مغزی مورد استفاده واقع شده است [۷] و مفهوم حالت درونی به این شکل دارای یک کاربرد عمومی در ارتباط با ارزیابی شبکه های عصبی است. نکته مهم دیگر این است که حالت درونی در نورون های مرتبط با هم در یک شبکه عصبی سبب ایجاد یک وضعیت همزمان شده (synchronize) در عملکرد همه نورون های شبکه عصبی می شود، چنین وضعیتی برای مثال در نورون های هیپوکمپ [۵]، نئوکورتکس [۹] و استریاتوم مشاهده و گزارش شده است. لازم به ذکر است که فوجی ساوا در ادامه و با استفاده از یک مدل سازی تئوری و به کمک شبیه سازی نشان داد که تعادل بین ورودی های تحریکی و مهارتی یک نورون عامل تعیین کننده ای اساسی برای حالت

**شکل ۱- مدار پیشنهادی سوزوکی و همکارانش که نحوه اتصال**

نورون های حرکتی (Motoneurons) به ماهیچه های دیواره بدن کرم *C. elegans* را نشان می دهد. این مدل ماهیچه های دیواره بدن کرم را به دو دسته ماهیچه های ناحیه سری (head muscle) و ماهیچه دیگر نواحی دیواره بدن (body-wall muscle) تقسیم بندی می کند، این مدل در ادامه ماهیچه های دیواره بدن را به دو گروه شکمی (Ventral) و پشتی (Dorsal) تقسیم بندی می کند. در این مدل دو نورون Rd و Rv مدار مولد الگوی مرکزی (Central pattern generator) را تشکیل می دهند و نورون های VB، VD و VA و عصب دهی ماهیچه های ناحیه شکمی بدن و نورون های DB، DD و DA عصب دهی ماهیچه های ناحیه پشتی بدن را بر عهده دارند. انواع اتصالات تحریکی (Excitatory connection) و مهارتی (Inhibitory connection) بین نورون ها و ماهیچه ها نیز در شکل نشان داده شده اند [۱۵].





**شکل ۳-** نمایشی از مدار نورونی کنترل کننده حرکت بدن در کرم سی الگانس که در آن مدار اولیه ارائه شده توسط سوزوکی بر اساس اطلاعات جدید موجود در سایت <http://wormweb.org/neurolnet> تهیه شده توسط Nikhil Bhatla نوآرایی شده است. اتصالات افزوده شده در این پژوهش با خطوط قرمز نشان داده شده‌اند و مدار اولیه ارائه شده توسط سوزوکی با خطوط مشکی نمایش داده شده‌اند [۱۵].

فعال می شوند. در ادامه براساس این مدل شبیه سازی صورت گرفته و اطلاعات حاصل از خروجی این مدل مجازی برای حرکت کرم با حرکات ثبت شده در کرم واقعی مقایسه شده و شباهت خروجی های این مدار شبیه سازی شده با حالت واقعی مورد تایید قرار گرفتند.

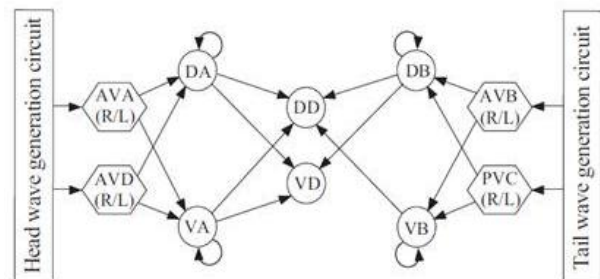
### ارائه ساختاری جدید برای مدل شبکه عصبی

**حرکت کرم سی الگانس:** دانشمندی بنام Nikhil Bhatla در سال های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ به بررسی اتصالات سیناپسی نورون های سیستم عصبی کرم سی الگانس پرداخت [۲]. ما با توجه به اطلاعات ارائه شده در این سایت و بر اساس اتصالات جدید ارائه شده توسط این دانشمند و وزن های ورودی هر یک از این نورون های واقعی و گنجاندن آنها در مدار سوزوکی، مدار جدیدی را با بازسازی مدل سوزوکی ارائه کرده ایم. این مدار جدید دارای اتصالات بیشتری نسبت به مدل سوزوکی و همکاران است و در شکل ۳ نشان داده شده است.

## یافته ها

جمع بندی وزن های ورودی براساس اطلاعات Bhatla برای هر یک از نورون ها در مدل ما با پیش فرض خطی بودن جمع بندی صورت گرفت. اتصالات نورون ها و اینترنورون ها در حیوان واقعی به دو دسته الکتریکی و شیمیایی تقسیم بندی می شوند و این نکته یکی از ویژگی ها خاصی است که در مدل ما نیز در نظر گرفته شده است. به این ترتیب با جمع وزن های ورودی هر نورون وزن خروجی آن تعیین شد (جدول ۱).

Rd و Rv در گانگلیون سری حیوان به عنوان نورون های اصلی مولد تولید الگو در نظر گرفته شده‌اند. در حقیقت، این دو نورون دارای اثرات مهارتی متقابل بر یکدیگر بوده و خروجی لازم برای یک ایجاد یک مدار سازنده الگوی مرکزی را دارا هستند. سپس معادلات درونی این نورون ها به منظور تولید نوسان های متناوب توسط آنها بر اساس Matsuoka's neural oscillator بیان شده است [۴]. در ادامه تابع حالت درونی (internal states) این نورون ها تعریف شد. متغیر های تعیین کننده حالت درونی در این مدل عبارت بودند از یک ثابت زمانی (time constants)، وزن اتصالی (connection weight) این دو نورون با یکدیگر، ثابتی ورودی (input constant) این نورون ها و یک ضریب خستگی (fatigue coefficient). در نهایت وزن خروجی نورون Rv برای عصب دهی ماهیچه های شکمی و نورون Rd برای عصب دهی ماهیچه های پشتی بدن کرم تعیین شدند. سرانجام در مدل سوزوکی رابطه بین نورون های مولد الگوی سری و دمی با نورون عصب دهی کننده ماهیچه های بدن واقع در طناب عصبی شکمی ارائه شده است (شکل ۲). بر اساس این مدل، ۶ نورون در طناب عصبی شکمی این کرم در نظر گرفته شده اند که ماهیچه های پشتی و شکمی بدن را برای تولید انقباض های منظم و حرکت سینوسی بدن تحریک می کنند. نورون های VA، VB و VD در این مدل، به ترتیب ماهیچه های شکمی بدن و نورون های DB، DA و DD ماهیچه های پشتی بدن را عصب دهی می کنند. نورون های VB و DB به هنگام حرکت به سمت جلو و نورون های VA و DA به هنگام حرکت به سمت عقب



**شکل ۲-** تصویر ترسیمی ساده شده ای از آرایش نورون های موجود در مدار عصبی کنترل کننده حرکت در کرم C. elegans. نورون های حرکتی به شکل دایره و اینترنورون ها به شکل شش وجهی در تصویر نمایش داده شده‌اند. همچنین ارتباط این مدار با دو مدار مولد الگوی حرکت سینوسی در ناحیه سری (Head wave generation circuit) و دمی (Tail wave generation circuit) در شکل نشان داده شده است [۱۵].

سپس معادلات متناظر حالت درونی هر یک از نورون ها به شرح زیر نوشته (معادلات ۱ الی ۸) و حالت درونی کل مدار حرکتی (معادله ۹) به شرح زیر محاسبه شد.

(معادله ۱) معادله تابع حالت درونی برای نورون (AVB)

$$V_a = \begin{cases} (\sin \xi_a t + T_a) & (\text{حرکت رو به جلو}) \\ 0 & (\text{حرکت رو به عقب}) \end{cases}, (a \in \{AVB(R/L), PVC(R/L)\})$$

(معادله ۲) معادله تابع حالت درونی برای نورون (AVA)

$$V_a = \begin{cases} 0 & (\text{حرکت رو به جلو}) \\ (\sin \xi_a t + T_a) & (\text{حرکت رو به عقب}) \end{cases}, (a \in \{AVA(R/L), AVD(R/L)\})$$

و تابع های حالت درونی نورون های حرکتی (معادله ۳) به شرح زیر است:

$$\tau_k \frac{dV_k}{dt} = -V_k + \sum_m \omega_{k,m} \cdot V_m \quad (\text{معادله ۳})$$

با استفاده از جدول وزن ها و اتصالات بین آنها معادله مربوط به حالت درونی هر یک از نورون ها به صورت زیر نوشته می شود:

حالت درونی نورون حرکتی VB:

$$\tau_{VB} \frac{dV_{VB}}{dt} = -V_{VB} + 40(\sin \xi_a t + T_a) + 22(\sin \xi_a t + T_a) + 28V_{VA} + 6V_{VB} + V_{DA} + 14V_{VD} + V_{DD} \quad (\text{معادله ۴})$$

حالت درونی نورون حرکتی VA:

$$\tau_{VA} \frac{dV_{VA}}{dt} = -V_{VA} + 7(\sin \xi_a t + T_a) + 3(\sin \xi_a t + T_a) + 16V_{VB} + 5V_{DA} + 28V_{VD} \quad (\text{معادله ۵})$$

حالت درونی نورون حرکتی DB:

$$\tau_{DB} \frac{dV_{DB}}{dt} = -V_{DB} + 16(\sin \xi_a t + T_a) + 15(\sin \xi_a t + T_a) + 4V_{VA} + 6V_{VB} + 4V_{DA} \quad (\text{معادله ۶})$$

حالت درونی نورون حرکتی DA:

$$\tau_{DA} \frac{dV_{DA}}{dt} = -V_{DA} + (\sin \xi_a t + T_a) + 4(\sin \xi_a t + T_a) + 7V_{VA} + V_{VB} + 6V_{DB} + 3V_{DD} \quad (\text{معادله ۷})$$

حالت درونی نورون حرکتی VD:

$$\tau_{VD} \frac{dV_{VD}}{dt} = -V_{VD} + 2(\sin \xi_a t + T_a) + 51V_{VB} + 79V_{VA} + 132V_{DB} + 122V_{DA} + 10V_{DD} \quad (\text{معادله ۸})$$

حالت درونی نورون حرکتی DD:

$$\tau_{DD} \frac{dV_{DD}}{dt} = -V_{DD} + (\sin \xi_a t + T_a) + 134V_{VB} + 164V_{VA} + 29V_{DB} + 8V_{DA} + 10V_{VD} \quad (\text{معادله ۹})$$

**جدول ۱-** محاسبه وزن خروجی تک تک نورون های مدار حرکتی کرم سی الگانس بر اساس جمع خطی وزن های ورودی سیناپس های شیمیایی و الکتریکی هر نورون در شبکه عصبی با آرایش این مقاله و بر اساس اعداد ارائه شده برای وزن ها در سایت worm web [۲]. نام هر یک از نورون ها شبکه عصبی در زیر هر یک از جداول درج شده است.

|                                    | VD  | DD | VB | DB | VA | DA |
|------------------------------------|-----|----|----|----|----|----|
| Weight of chemical connections     | 132 | 29 | -  | -  | -  | 5  |
| Weight of gap junction connections | -   | -  | 6  | -  | -  | 1  |
| Sum                                | 132 | 29 | 6  | -  | -  | 6  |

ب- نورون DB

|                                    | VD  | DD | VB | DB | VA | DA |
|------------------------------------|-----|----|----|----|----|----|
| Weight of chemical connections     | 122 | 8  | -  | 3  | -  | -  |
| Weight of gap junction connections | -   | -  | 1  | 1  | 5  | -  |
| Sum                                | 122 | 8  | 1  | 4  | 5  | -  |

الف- نورون DA

|                                    | VD | DD  | VB | DB | VA | DA |
|------------------------------------|----|-----|----|----|----|----|
| Weight of chemical connections     | 73 | 164 | 15 | 4  | -  | 7  |
| Weight of gap junction connections | 6  | -   | 13 | -  | -  | -  |
| Sum                                | 79 | 164 | 28 | 4  | -  | 7  |

د- نورون VA

|                                    | VD | DD | VB | DB | VA | DA |
|------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| Weight of chemical connections     | 4  | -  | 1  | -  | -  | 3  |
| Weight of gap junction connections | 10 | -  | -  | -  | -  | -  |
| Sum                                | 14 | -  | 1  | -  | -  | 3  |

ج- نورون DD

|                                    | VD | DD | VB | DB | VA | DA |
|------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| Weight of chemical connections     | -  | -  | 14 | -  | 22 | -  |
| Weight of gap junction connections | -  | 10 | -  | -  | 6  | -  |
| Sum                                | -  | 10 | 14 | -  | 28 | -  |

و- نورون VD

|                                    | VD | DD  | VB | DB | VA | DA |
|------------------------------------|----|-----|----|----|----|----|
| Weight of chemical connections     | 51 | 134 | -  | -  | 2  | -  |
| Weight of gap junction connections | -  | -   | -  | 6  | 13 | 1  |
| Sum                                | 51 | 134 | -  | 6  | 15 | 1  |

ه- نورون VB

|                                    | VD | DD | VB | DB | VA | DA |
|------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| Weight of chemical connections     | -  | -  | 19 | 25 | -  | 4  |
| Weight of gap junction connections | -  | -  | 3  | -  | 3  | -  |
| Sum                                | -  | -  | 22 | 25 | 3  | 4  |

ح - نورون PVC

|                                    | VD | DD | VB | DB | VA | DA |
|------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| Weight of chemical connections     | 1  | -  | 1  | -  | 5  | 1  |
| Weight of gap junction connections | 1  | 1  | 39 | 16 | 2  | -  |
| Sum                                | 2  | 1  | 40 | 16 | 7  | 1  |

ز- نورون AVB

عمل در پایانه عصب-عضله کند. بلکه در عمل، تغییرات پتانسیل نورون های حرکتی عصب دهی کننده ماهیچه ها در این موجود مستقیماً با میزان رهایش ناقل عصبی متناسب بوده و سبب ایجاد انقباض در ماهیچه ها می شوند.

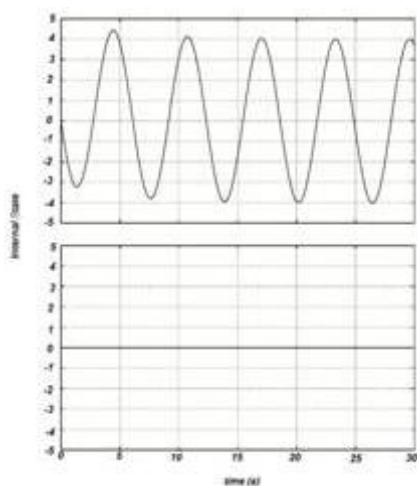
شدت این انقباض نیز با شدت این پتانسیل ها در محل عصب و عضله متناسب است و بدین ترتیب شدت انقباض با میزان حالت درونی مرتبط می گردد. به نوبه خود، شدت انقباض نیز با زاویه خمیدگی ایجاد شده در بدن کرم متناسب است که شدت و تعداد این خمیدگی های پشت سر هم در بدن کرم است که عامل ایجاد حرکت و تعیین کننده سرعت حرکت مارپیچی بدن کرم است.

## بحث

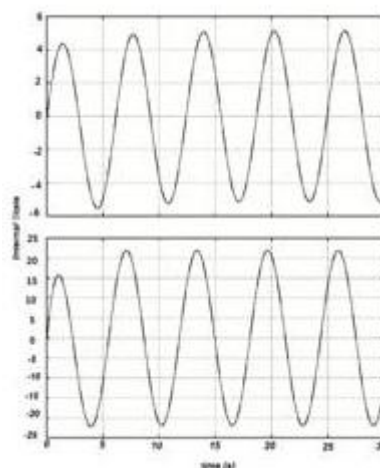
یافته های ما در این مقاله ضمن شباهت به نتایج حاصل از پژوهش سوزوکی، شبیه سازی بسیاری نزدیکی تری به واقعیت برای حرکت این کرم را فراهم می آورد. سوزوکی و همکارانش در مدل خود نشان داده بودند که مدل آنها قادر به تولید

جهت جلوگیری از ارائه معادلات پیچیده ریاضی در اینجا فقط به همین میزان به معادلات ریاضی بکار گرفته شده در این پژوهش بیشتر اشاره نمی شود و خوانندگان محترم می توانند جهت هر گونه توضیحات تکمیلی در ارتباط با این معادله ها با نویسندگان این مقاله مکاتبه فرمایند. در نهایت شبیه سازی حرکت بر اساس مدل ما توسط نرم افزار (Simulink) در محیط MATLAB صورت گرفت و با موارد شبیه سازی شده سوزوکی مقایسه شد (شکل ۴).

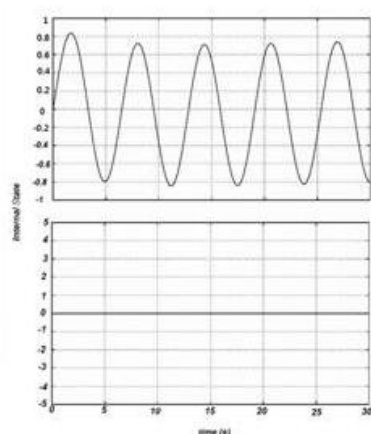
محور عمودی در این تصاویر نشان دهنده میزان حالت درونی هر یک از نورون ها است که البته این کمیت فاقد واحد است و در حقیقت همانطور که در مقدمه توضیح داده شد در این مدل سازی میزان تغییرات ولتاژ درون هر نورون با این کمیت نشان داده می شود. مقدار حالت درونی خود با مقدار شدت پتانسیل الکتریکی تولید شده در هر نورون رابطه مستقیمی دارد و در حقیقت این پتانسیل الکتریکی، برخلاف آنچه که در سیناپس های عصب و عضله پستانداران رخ می دهد برای ایجاد انقباض در ماهیچه ها نباید به یک حد آستانه خاص برسد تا ناقل های عصبی آزاد و ایجاد پتانسیل



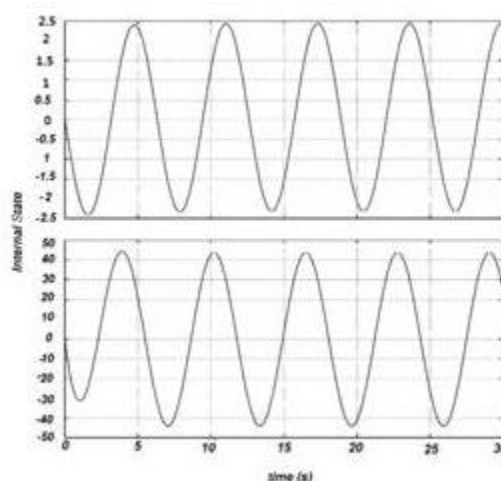
نرون DA



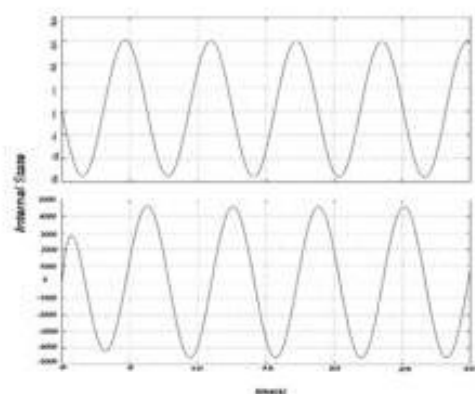
نرون DB



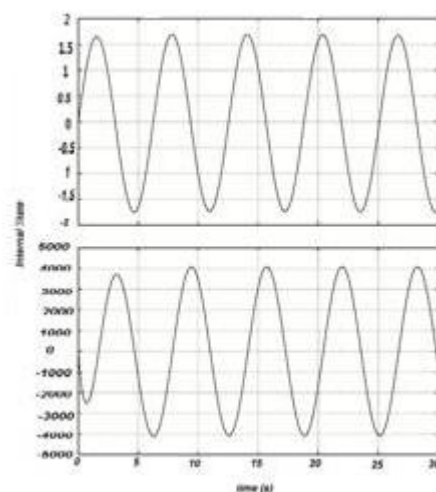
نرون VA



نرون VB



نرون DD



نرون VD

شکل ۴- نتایج حاصل از شبیه سازی کامپیوتری تابع حالت هر یک از نرون های مدار حرکتی در کرم سی الگانس شبیه سازی شده به کمک نرم افزار (Simulink) در محیط MATLAB. منحنی های بالایی در هر قسمت نشان دهنده شبیه سازی بر اساس نتایج حاصل از مدل ارائه شده در این پژوهش است و منحنی های پایینی در هر قسمت نشان دهنده شبیه سازی بر اساس مدل سوزوکی است. نام هر یک از نرون های شبکه عصبی در زیر آنها قید شده است. محور عمودی در تمام منحنی ها نشان دهنده میزان حالت درونی است و این میزان است که تعیین کننده وزن خروجی هر نرون است و بدون واحد می باشد و محور افقی نشان دهنده زمان بر اساس واحد ثانیه است.

نوسانات سینوسی است که به ماهیچه‌های بدن ارسال و باعث انقباض آنها می‌شوند و چون فاز این امواج سینوسی ارسال شده برای ماهیچه‌های پشتی و شکمی یکی نیست، حالتی مناسب برای ایجاد حرکت مارپیچی در بدن کرم به سمت جلو فراهم می‌شود.

بنظر می‌رسد اضافه شدن سیناپس‌ها جدید به شبکه عصبی سوزوکی بر اساس واقعیت این توانمندی را به این مدل مجازی می‌بخشد که بتواند بسته به نیاز شدت، فاز و فرکانس نوسانات حالت درونی مدار کنترل کننده حرکت خود را تغییر داده و از این طریق سبب تغییر در حرکت سینوسی کرم شود. همچنین نتایج مدل قبلی (شکل ۴ قسمت پایین هر بخش) نشان می‌دادند که نورون‌های دسته A (نورون‌های DA و VA) تنها در حرکت رو به عقب نقش داشته و لذا در ایجاد حرکت به سمت جلو در این کرم نقشی ندارند.

اما نتایج ما بعد از افزوده شدن این سیناپس‌ها به مدار بر توجه به یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی نوسانات حالت درونی محاسبه شده برای نورون‌های A گویای این نکته هستند که این دسته از نورون‌ها در طی حرکت به سمت جلوی حیوان نیز فعال بوده و در حقیقت یک حالت ترمز درونی داشته و با حرکت به سمت جلو مخالفت می‌کنند. گرچه در مجموع، اثر فعالیت آنها بر حرکت نهایی حاصل به سمت جلو مشهود نیست. اما زمانی که حیوان تصمیم به تغییر جهت حرکت خود می‌گیرد و فعالیت نورون‌های تولید کننده الگوی حرکت به سمت جلو را متوقف می‌کند، به سرعت بر فعالیت آنها افزوده شده و امکان تغییر جهت حرکت سریع مشابه آنچه در طبیعت دیده می‌شود برای کرم فراهم می‌شود. دانشمندی بنام Piggott و همکارانش در سال ۲۰۱۱ نیز به چنین توانایی در مدار عصبی این کرم اشاره کرده بودند [۱۴].

لازم به ذکر است بررسی حرکت این کرم دارای ارزش کاربردی بوده و به تازگی نحوه حرکت این کرم مورد توجه بسیاری از پژوهشگران برای ساخت روبات‌ها قرار گرفته است [۳]. لذا یافته‌های این پژوهش می‌تواند کمک خوبی به این پژوهشگران در طراحی یک روبات کارآمدتر بکند.

همچنین، علارغم تنوع مختلف حرکات این حیوان که به غلظت محیطی که کرم در آن حرکت می‌کند نیز بستگی دارد، بنظر می‌رسد که در شرایط واقعی نیز فقط یک مدار نورونی

واحد کنترل انواع حرکات این حیوان را تحت کنترل دارد [۴]. لذا یافته‌های ما با نشان دادن این نکته که امکان اعمال تغییرات بر برون ده این شبکه حرکتی منفرد فقط با افزودن چند سیناپس به آن امکان پذیر است، می‌تواند گویای این نکته باشد که کرم بسته به نوع حرکت مورد نیازش می‌تواند با فعال یا غیر فعال کردن برخی از اتصالات این مدار حرکتی به سادگی با تغییر دادن خروجی مدار کنترل حرکتش، حرکتی جدید را به اجرا بگذارد.

ویژگی دیگر که در ارتباط با سیستم حرکتی این کرم وجود دارد و می‌تواند توجیه کننده این نکته باشد که استفاده از کمیتی بنام حالت درونی می‌تواند یک مدل سازی نزدیک به واقعیت را در این کرم فراهم آورد، این است که در محل عصب-عضله این حیوان بر خلاف پستانداران بسته به میزان دپولاریزه شدن پایانه عصب-عضله و بدون نیاز به تولید پتانسیل عمل رهاش ناقل عصبی بصورت تدریجی (graded manner) و متناسب با شدت دپولاریزاسیون صورت گرفته و میزان ناقل عصبی رها شده از این پایانه‌ها بصورت خطی با شدت دپولاریزه شدن این پایانه‌ها متناسب است [۱۱].

لذا پیش فرض بکار گرفته شده در این پژوهش که در آن میزان حالت درونی نورون‌های حرکتی متناسب با شدت تحریر پایانه عصب-عضله و شدت انقباض ماهیچه در نظر گرفته شده است، بنظر پیش فرضی صحیح و منطبق با واقعیت می‌آید.

در عمل ما توانستیم شبیه‌سازی متناسب با واقعیت و در عین حال مطابق با مدل مجازی سوزوکی ارائه دهیم. ما در این پژوهش مستقیماً میزان حالت درونی حاصل از جمع خطی وزن‌های ورودی را ملاکی برای شبیه‌سازی قرار دادیم. گرچه استفاده از چنین شرایطی برای استفاده از حالت درونی در محاسبات شبکه عصبی می‌تواند با اهداف دیگری نیز بکار گرفته شود [۸].

اما لازم به ذکر است که در همه این پژوهش‌ها همیشه میزان حالت درونی برای شبیه‌سازی بدون واحد بوده است. این مدل همچنین با توجه به اینکه نسبت به مدل قبلی سیناپس-های بیشتری را در مدار خود بر اساس واقعیت در نظر گرفته است و با توجه به اینکه مدل سازی صورت گرفته با حداقل سیناپس‌ها در مدل سوزوکی در ارتباط با خروجی حرکتی در

## سپاسگزاری

هزینه تحقیق حاضر از محل اعتبارات پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شاهد پرداخت شده است. بدینوسیله از تمامی افرادی که در اجرای این کار پژوهشی با ما همکاری داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌کنیم.

مدل مجازی موفقیت آمیز بوده است، می‌تواند به نوعی یک شبیه سازی از شکل پذیری نورونی نیز به نمایش بگذارد که در طی آن تعداد اتصالات سیناپسی بین نورون های یک مدار افزایش یافته و به این ترتیب ضمن حفظ کارایی اصلی و اولیه مدار، کارایی های جدیدی به آن افزوده شده است.

## References

- [1] Altun ZF and Hall DH, Nervous system, general description worm atlas. 2011, Available from: URL: <http://wormatlas.org/hermaphrodite/nervous/neuroframe.set.htm>.
- [2] Bhatla N, C. *elegans* Neural Network details, 2011, Available from: URL : <http://wormweb.org/neuralnet>
- [3] Beer RD, Chiel HJ, Quinn RD, Ritzmann RE, Biorobotic approaches to the study of motor systems. *Curr Opin Neurobiol* 8 (1998) 777-82.
- [4] Berri S, Boyle JH, Tassieri M, Hope IA, Cohen N, Forward locomotion of the nematode *C. elegans* is achieved through modulation of a single gait. *HFSP J* 3 (2009) 186-93.
- [5] Buzsaki G, Theta oscillations in the hippocampus. *Neuron* 33 (2002) 325-340.
- [6] Cash, S & Yuste, R, Linear summation of excitatory inputs by CA1 pyramidal neurons. *Neuron* 22 (1999) 383-394.
- [7] Fujisawa S, Matsuki N and Ikegaya Y, Single neurons can induce phase transitions of cortical recurrent networks with multiple internal states. *Cerebral Cortex* 16 (2006) 639-654.
- [8] Hu X, Wu FX, Mining and state-space modeling and verification of sub-networks from large-scale biomolecular networks. *BMC Bioinformatics* 8 (2007) 324-342.
- [9] Ikegaya Y, Aaron G, Cossart R, Aronov D, Lampl I, Ferster D, Yuste R, Synfire chains and cortical songs: temporal modules of cortical activity. *Science* 304 (2004) 559-564.
- [10] Karbowski J, Schindelman G, Cronin CJ, Seah A, Sternberg PW, Systems level circuit model of *C. elegans* undulatory locomotion: mathematical modeling and molecular genetics. *J Comput Neurosci* 24 (2008) 253-76.
- [11] Liu Q, Hollopeter G, Jorgensen EM, Graded synaptic transmission at the *Caenorhabditis elegans* neuromuscular junction. *Proc Natl Acad Sci U S A* 106 (2009) 10823-8.
- [12] Matsuoka K, Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators. *Biol Cybern* 56 (1987) 345-53.
- [13] Niebur E, Erdos P, Theory of the locomotion of nematodes: Control of the somatic motor neurons by interneurons. *Math Biosci* 118 (1993) 51-82.
- [14] Piggott BJ, Liu J, Feng Z, Wescott SA, Xu XZ, The neural circuits and synaptic mechanisms underlying motor initiation in *C. elegans*. *Cell* 147 (2011) 922-33.
- [15] Suzuki M., Goto T, Tsuji T, Ohtake H, A dynamic body model of the nematode *C. elegans* with neural oscillators. *JRM* 17 (2005a) 318-326.
- [16] Suzuki M, Tsuji T, Ohtake H, A model of motor control of the nematode *C.elegans* with neuronal circuits. *Artif Intell Med* 35 (2005b) 75-86.
- [17] Suzuki M., Goto T, Tsuji T, Ohtake H, A motor control model of the nematode *C. elegans*. *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, May 2004, Shenyang, China, P 299-304.
- [18] Yuk H, Shin JH and Jo S, Crawling robot design mimicking *C. elegans*, proceeding of the 7th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2010) Busan, South Korea.
- [19] White JG, Southgate E, Thomson JN, Brenner S, The Structure of the Nervous System of Nematode *Caenorhabditis elegans*, *Phil. Trans. Royal Soc. London* 314 (1986) 1-340.