



دانشگاه تهران  
دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر

پروژه دوم درس علوم اعصاب محاسباتی  
آشنایی با عملکرد سیناپس‌ها و جمعیت‌های نورونی

محمد زمانی

شماره دانشجویی: ۶۱۰۳۹۹۱۳۵

# فهرست مطالب

۱	مقدمه
۲	سیناپس
۲	۱.۲ فضای سیناپسی
۲	۲.۲ شبیه‌سازی سیناپس با استفاده از تابع دلتای دیراک
۳	الگوهای ارتباطی
۴	full connectivity schema ۱.۳
۵	fixed coupling probability ۲.۳
۶	fixed number of presynaptic partners ۳.۳
۶	مقایسه الگوهای ارتباطی ۴.۳
۴	جمعیت نورونی مهاری و تحریکی
۷	بررسی رفتار جمعیت تحریکی و مهاری ۱.۴
۸	بررسی تاثیر پارامترها ۲.۴
۵	تصمیم‌گیری
۹	شبیه‌سازی تصمیم‌گیری با وجود دو انتخاب ۱.۵
۱۰	بررسی تاثیر پارامترها ۲.۵
۱۰	۱.۲.۵ اندازه جمعیت‌ها
۱۱	۲.۲.۵ الگوهای ارتباطی متفاوت
۶	نتیجه‌گیری
۱۱	

# ۱ مقدمه

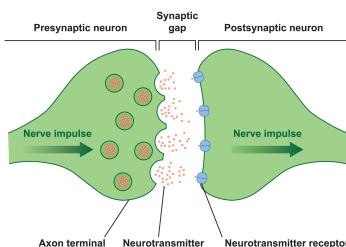
می‌دانیم که مدل‌های مختلفی برای تک نورون وجود دارد که در پروژه قبل آن‌ها را بررسی و تحلیل کردیم، اما همانطور که می‌دانیم مغز ما از میلیاردها نورون تشکیل شده است که اینها به صورت سلسله مراتبی در نواحی مختلف مغز قرار گرفته‌اند که می‌توان همه آنها را به صورت جمعیت‌های نورونی دید، بنابراین مطالعه جمعیت‌های نورونی اهمیت بسزایی دارد. در این پروژه می‌خواهیم رفتار جمعیت‌های نورونی و الگوهای ارتباطی میان آن‌ها و همچنین فرآیند تصمیم‌گیری را مورد بحث و تحلیل قرار دهیم.

## ۲ سیناپس

### ۱.۲ فضای سیناپسی

اگر که یک نورون presynaptic فعال شود این فعالیت از طریق فضایی به نام سیناپس به نورون postsynaptic منتقل می‌شود. وقتی که نورون presynaptic فعال می‌شود این فعالیت به انتهای axon می‌رسد که به آن‌ها terminal buttom می‌گویند، اینها باعث می‌شود که vesicle ها به سمت جلو حرکت کنند و برخی از آن‌ها نزدیک غشای نورونی می‌شوند و می‌چسبند به غشا و محتويات خودشان را که neurotransmitter ها است در فضای سیناپسی آزاد می‌کنند، در این فضا کانال‌های یونی وجود دارد که این neurotransmitter ها می‌چسبند به دریافت کننده‌ها و این کانال‌های یونی باز می‌شوند و با توجه به اینکه نورون ما مهاری است یا تحریکی پتانسیم یا سدیم وارد نورون می‌شود، شمای کلی این فرآیند را می‌توانید در شکل ۱ ببینید.

Synaptic Transmission

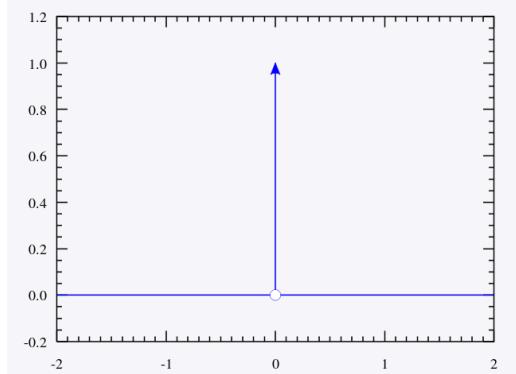


شکل ۱: انتقال سیناپسی

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید فعالیت نورون‌ها در فضای سیناپسی از طریق کانال‌های یونی منتقل می‌شود و به هر میزان تعداد این کانال‌های یونی بیشتر باشند میزان اثر گذاری نورون قبلی بر روی نورون بعدی بیشتر خواهد بود، اصولاً چیزی که ما به آن یادگیری می‌گوییم همین میزان اثر گذاری فعالیت یک نورون بر روی نورون بعدی است که میزان کم یا زیاد شدن اثر گذاری نورون presynaptic بر روی نورون postsynaptic synaptic plasticity را می‌گویند.

### ۲.۲ شبیه‌سازی سیناپس با استفاده از تابع دلتای دیراک

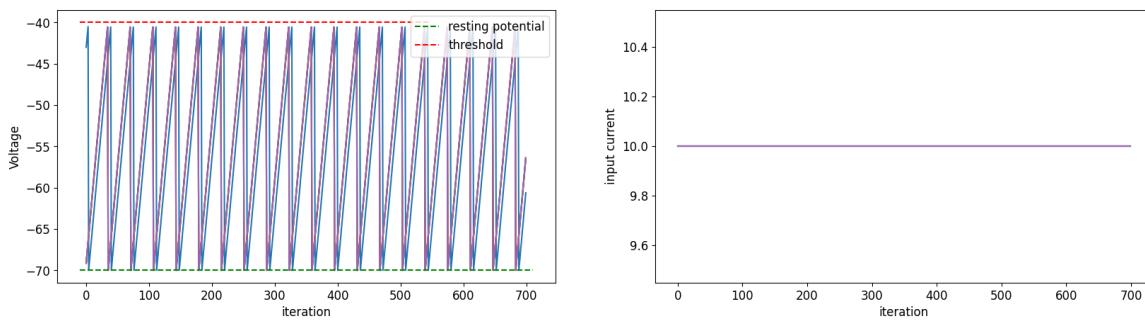
در این بخش با استفاده از این تابع می‌خواهیم سازوکار سیناپس را مدل کنیم. تابع دلتای دیراک به این صورت است که به صورت یکنواخت مقدار صفر دارد، به جز نقطه صفر، به طوری که روی کل محور اعداد حقیقی انتگرال آن برابر است با یک که می‌توان رفتار این تابع را در شکل ۲ مشاهده نمود.



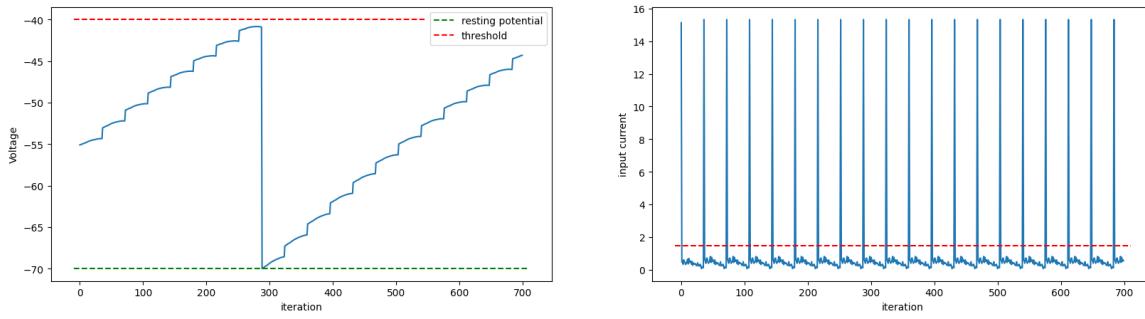
شکل ۲: نمایش شماتیک تابع دلتا دیراک

حال در مدل سازی رفتار سیناپس ها با استفاده از این تابع به این صورت عمل می کنیم که زمان هایی که نورون های پیشین<sup>۱</sup> ضربه می زند در یک لحظه بر روی نورون های بعدی اثر می گذارند که این ساده ترین مدلی است که می توان برای سیناپس ارائه داد.

به عنوان مثال ما یک جمعیت نورونی که متشکل از هزار نورون LIF است را به یک جمعیت نورونی که متشکل از یک نورون LIF است متصل می کنیم، هیچ اتصالی میان نورون های هر جمعیت وجود ندارد اما همه نورون های جمعیت اولیه به تک نورون جمعیت دوم متصل است، حال یک شبیه سازی با استفاده از سیناپس پیاده سازی شده انجام می دهیم.



شکل ۳: جریان ورودی و تغییرات پتانسیل پنج نورون تصادفی از جمعیت اول

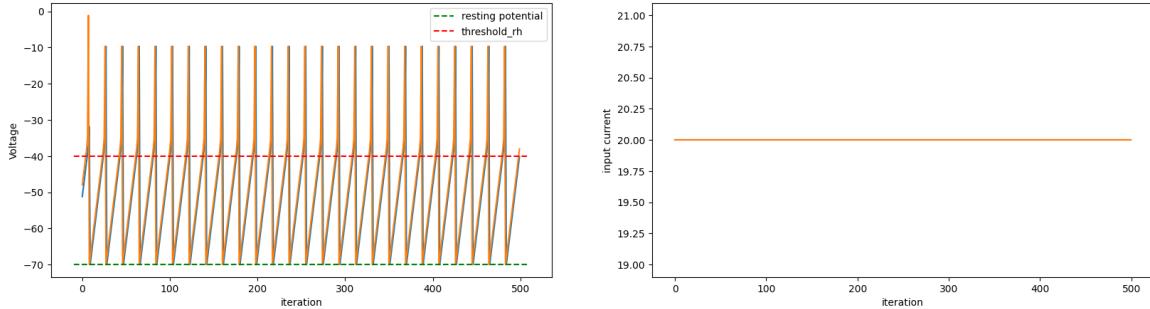


شکل ۴: جریان ورودی و تغییرات پتانسیل پنج نورون جمعیت دوم

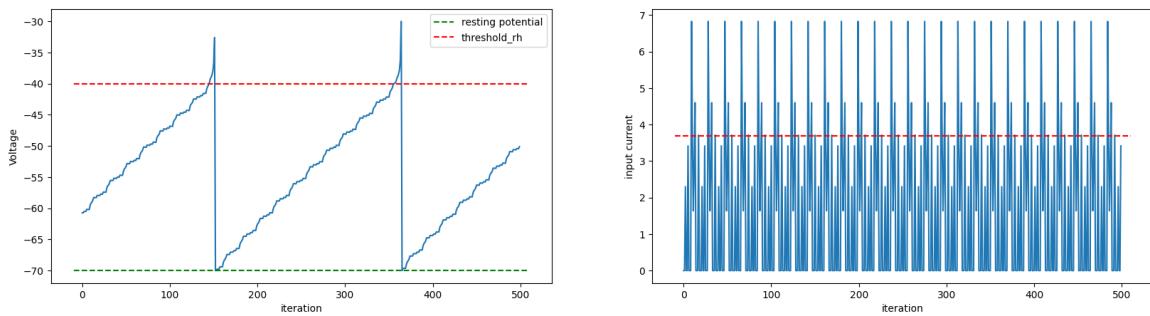
همانطور که در شکل ۳ مشاهده می کنید به همه نورون های جمعیت اول یک جریان ثابت ۱۰ آمپری وارد می شود که تغییرات اختلاف پتانسیل پنج تا از نورون ها نیز در شکل آمده است، حال به تک نورون جمعیت دوم هیچ جریان ورودی ثابتی داده نمی شود و فقط از طریق سیناپس جریان ورودی به آن منتقل می شود، همانطور که نمودار تغییرات جریان را در

<sup>1</sup>pre-synaptic neuron

شکل ۴ مشاهده می‌کنید، زمان‌هایی که نورون‌های جمعیت اول ضربه می‌زنند، جریان ورودی به تک نورودن جمعیت دوم بیشینه می‌شود اما در بقیه موارد زمان‌ها اینگونه نیست، که این رفتار مطابق آن چیزی است که ما در مدل سازی تابع دلتا دیراک ادعا کرده بودیم، تنها وقتی که نورونی ضربه می‌زنند فعالیتش به نورون پسین منتقل می‌گردد، که این انتقال فعالیت را با انتقال جریان از طریق سیناپس‌ها مدل می‌کنیم.  
حال همین آزمایشات را با استفاده از مدل نورونی ELIF نیز انجام می‌دهیم.



شکل ۵: جریان ورودی و تغییرات پتانسیل دو نورون تصادفی از جمعیت اول



شکل ۶: جریان ورودی و تغییرات پتانسیل تک نورون جمعیت دوم

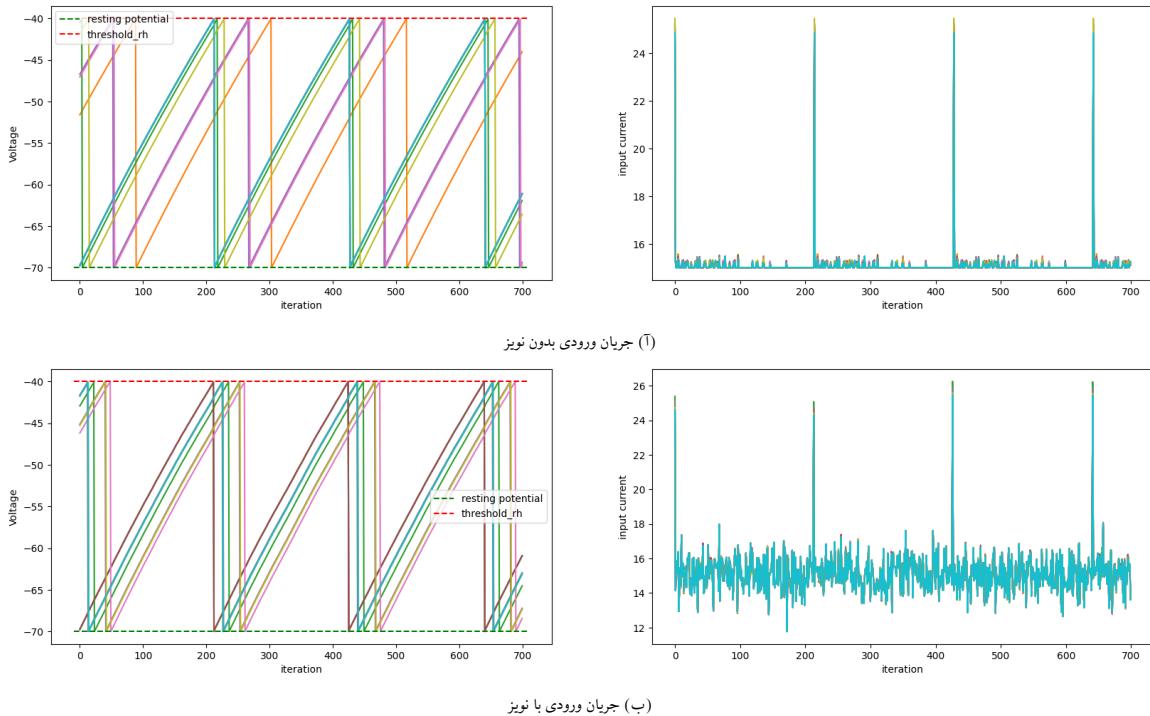
همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌کنید، در این مدل نورونی پتانسیل فعالیت باعث می‌شود که به نوعی هر ضربه در طول بازه بزرگتری رخ دهد که این در جریان ورودی تک نورون ما در جمعیت دوم خود را نشان داده است، در بقیه موارد کاملاً رفتار مشابهی هر دو مدل داشته‌اند.

### ۳ الگوهای ارتباطی

در هر کدام از بخش‌ها یک جمعیت نورونی با صد نورون LIF خواهیم داشت، که با الگوهای ارتباطی متفاوت میان نورون‌ها ارتباط برقرار می‌کنیم، سپس به هر کدام جریان بدون نویز و با نویز وارد می‌کنیم و عملکرد و فعالیت هر کدام از نورون‌ها را مقایسه می‌کنیم.

#### full connectivity schema ۱۰۳

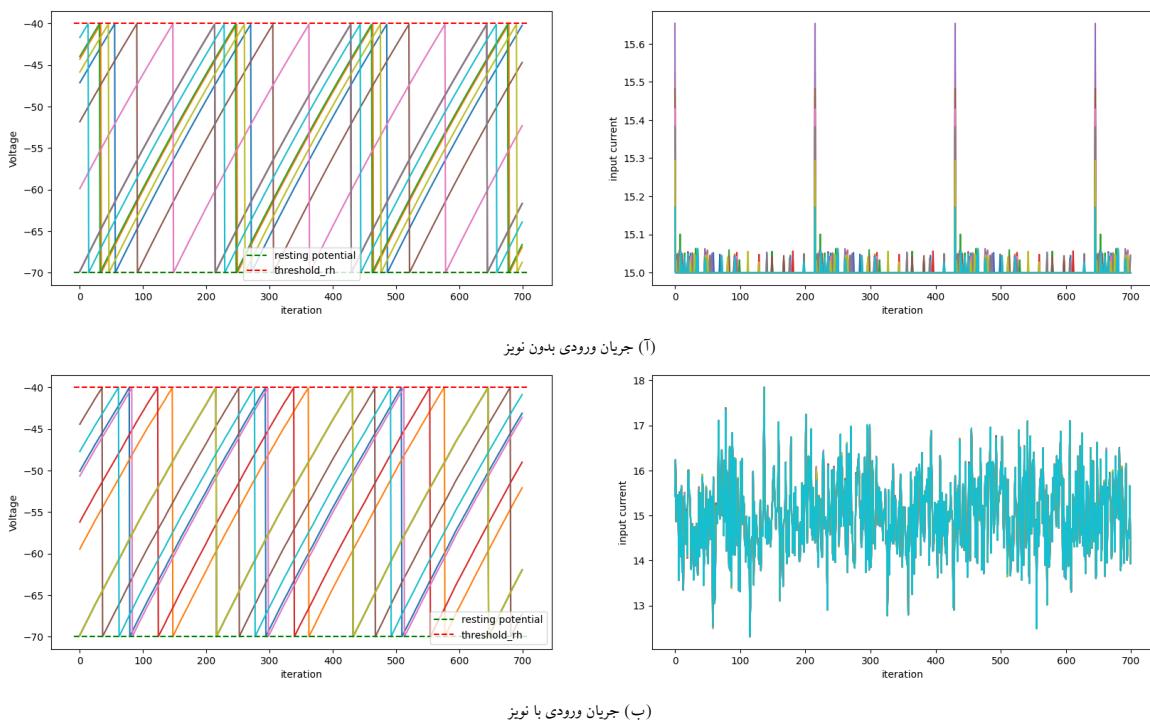
در این حالت هر دو نورونی که در جمعیت نورونی وجود دارد بهم متصل هستند و برای وزن‌دهی نیز یک وزن ثابت  $w_{ij} = \frac{j}{N}$  میان هر دو نورون در نظر می‌گیریم یا اینکه وزن‌دهی با استفاده از یک توزیع گاووسی با میانگین  $\frac{j}{N}$  و واریانس  $\frac{\phi}{N}$  انجام می‌شود.



شکل ۷: مقایسه تغییرات پتانسیل نورون با جریان ورودی نویزی و بدون نویز

## fixed coupling probability ۲۰۳

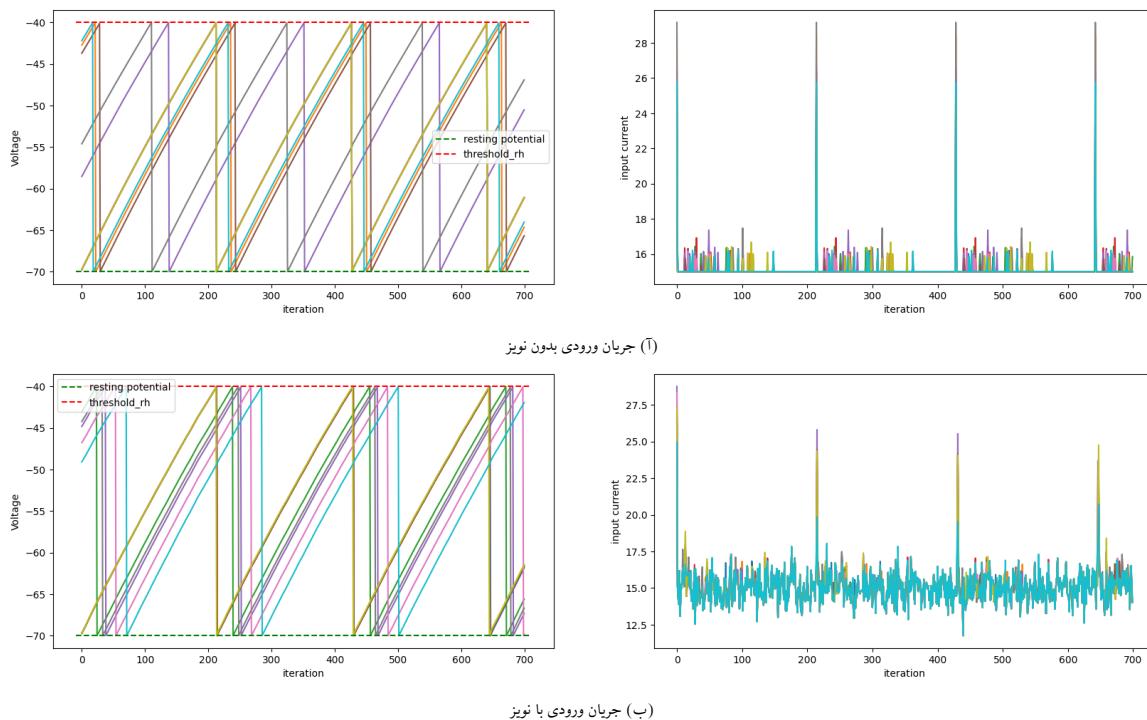
در این حالت از میان  $N^2$  حالت ممکن برای ایجاد ارتباط با احتمال ثابت  $p$  از میان آنها انتخاب انجام می‌دهیم و وزن را قرار می‌دهیم.

$$w_{ij} = \frac{j}{pN}$$


شکل ۸: مقایسه تغییرات پتانسیل نورون با جریان ورودی نویزی و بدون نویز

## fixed number of presynaptic partners ۴۰۳

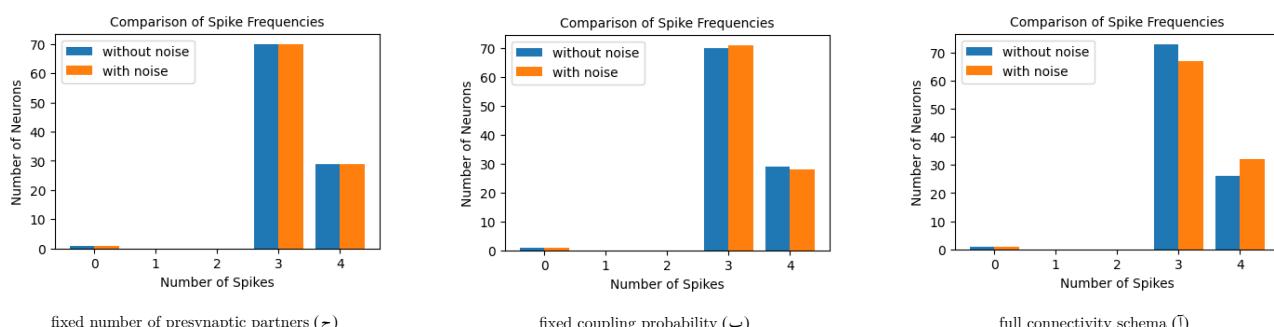
در این حالت تعداد نورون‌های متصل به یک نورون برای همه نورون‌ها مقداری ثابت خواهد بود اما اتصالات به صورت تصادفی خواهد بود همانند حالت قبل.



شکل ۹: مقایسه تغییرات پتانسیل نورون با جریان ورودی نویزی و بدون نویز

## ۴۰۳ مقایسه الگوهای ارتباطی

در نهایت تعداد ضربه‌های هر یک از نورون‌ها را در حالتی که جریان نویز دارد یا بدون نویز است شماردیم و نمودارهای آن را در شکل ۱۰ می‌توان دید.



شکل ۱۰: مقایسه حساسیت به نویز در الگوهای متفاوت ارتباطی

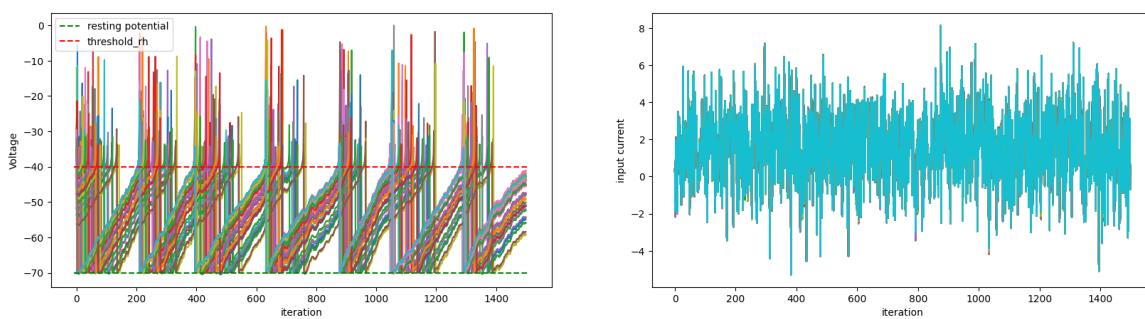
همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنید، بیشترین میزان حساسیت مربوط به الگوی کامل می‌باشد که به نسبت به نویز حساسیت بیشتری را نشان می‌دهد اما کمترین حساسیت به نویز را دارد و عملاً تغییری به طور کلی مشاهده نشده است (البته به صورت کلی اینگونه نخواهد بود که اصلاً به نویز حساسیتی نداشته باشد بلکه حساسیت کمتری دارد).

## ۴ جمعیت نورونی مهاری و تحریکی

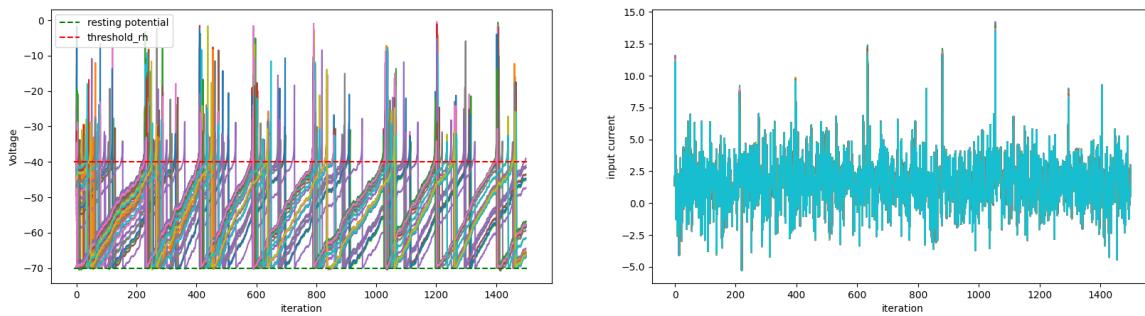
در این بخش دو جمعیت نورونی همگن خواهیم داشت که یک جمعیت نورونی ما تحریکی خواهد بود که شامل ۸۰۰ نورون ELIF است، جمعیت دیگر نیز یک جمعیت مهاری است که متشکل از ۲۰۰ نورون ELIF است.

### ۱۰.۴ بررسی رفتار جمعیت تحریکی و مهاری

همانطور که بالاتر اشاره کردیم دو جمعیت مهاری و تحریکی داریم، که از الگوی کامل برای ارتباط میان نورونی‌های این دو جمعیت استفاده کرده‌ایم و بعد از انجام شبیه سازی می‌توانیم تغییرات پتانسیل جمعیت‌های نورونی را بر اثر ورودی نویز دار در شکل ۱۱ مشاهده کنیم.



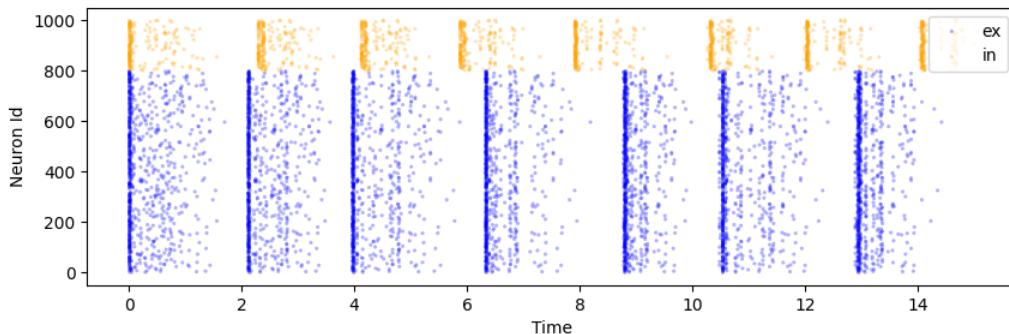
(آ) نمودار جریان ورودی نویزی و تغییرات پتانسیل در جمعیت نورونی تحریکی



(ب) نمودار جریان ورودی نویزی و تغییرات پتانسیل در جمعیت نورونی مهاری

شکل ۱۱

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌کنید زمانی که فعالیت جمعیت مهاری ما افزایش می‌یابد به مرور اندکی کاهش در فعالیت جمعیت نورونی تحریکی رخ خواهد داد.

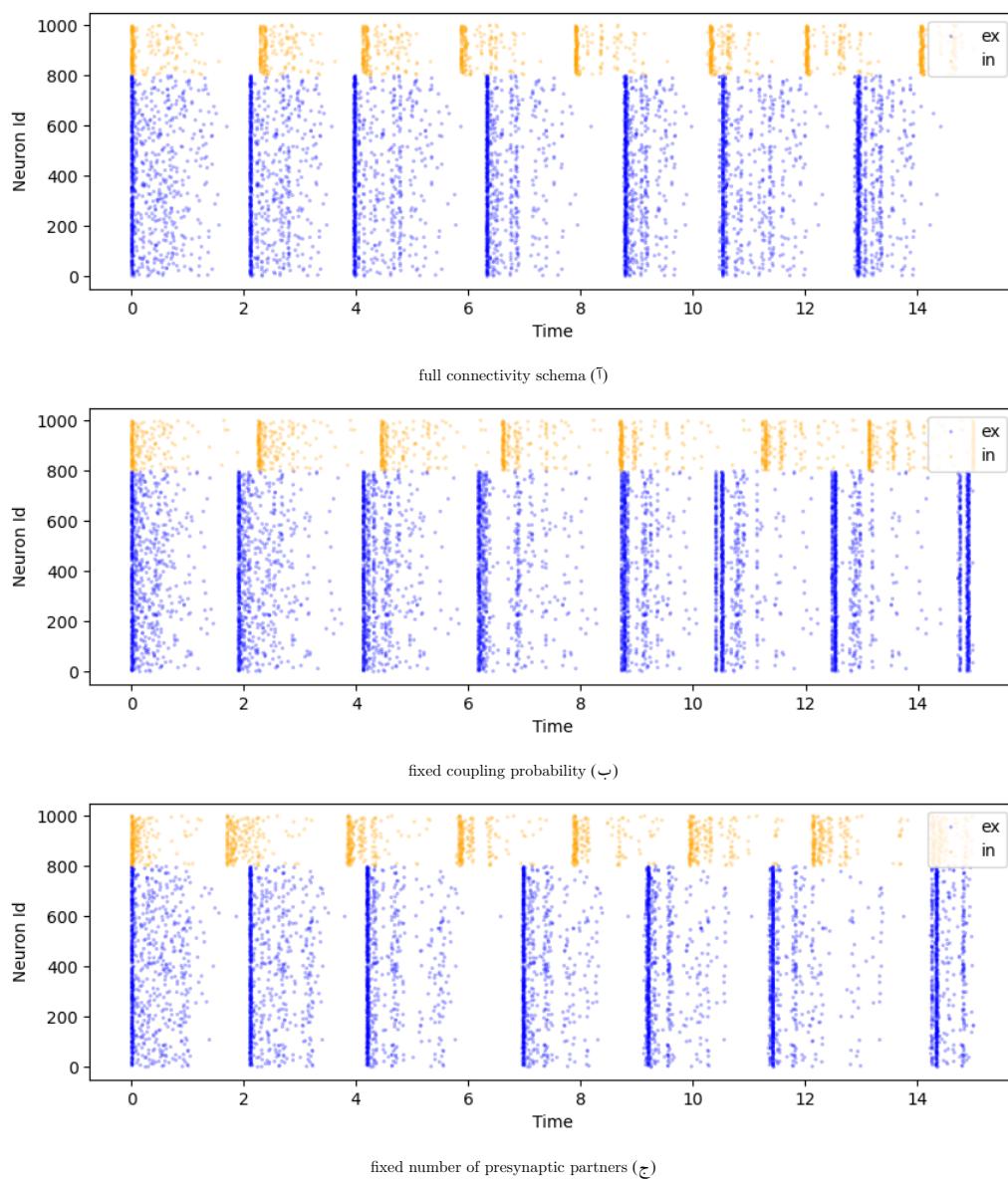


شکل ۱۲: Raster plot برای هر دو جمعیت مهاری و تحریکی

با توجه به شکل ۱۲ که Raster plot را برای دو جمعیت نورونی مهاری و تحریکی نشان می‌دهد، که بعد از فعالیت در جمعیت‌های نورونی تحریکی به مرور فعالیت نورون‌های مهاری بیشتر می‌شود و با افزایش فعالیت نورون‌های مهاری فعالیت جمعیت نورونی تحریکی کمتر می‌شود.

## ۲۰۴ بررسی تاثیر پارامترها

مانند قسمت قبل جمعیت‌های نورونی مهاری و تحریکی را با همان مشخصات و تعداد ایجاد می‌کنیم و میان آن‌ها از الگوهای متفاوت برای برقراری ارتباط استفاده می‌کنیم و Raster Plot را برای هر کدام از آن‌ها رسم می‌کنیم.



شکل ۱۳

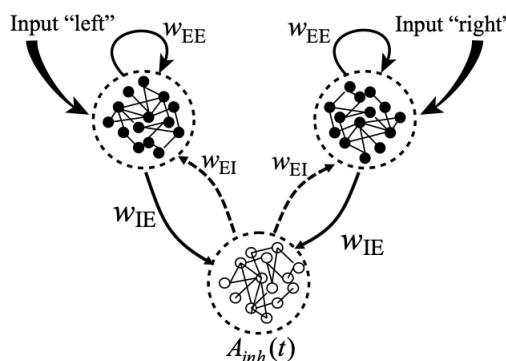
همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌کنید، زمانی که از الگوی ارتباطی کامل استفاده می‌کنیم بیشترین تراکم را در قسمت‌هایی که ضربه زده می‌شود داریم اما در حالتی که از حالت تعداد نورون‌های پیشین ثابت استفاده کردۀایم کمترین تراکم را داشته‌ایم و پراکندگی بیشتری مشاهده می‌شود، همچنین زمانی که از الگوی ارتباطی fixed number of presynaptic partners می‌باشد، همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌کنید، زمانی که از الگوی ارتباطی کامل استفاده می‌کنیم بیشترین تراکم را در قسمت‌هایی که ضربه زده می‌شود داریم اما در حالتی که از حالت تعداد نورون‌های پیشین ثابت استفاده کردۀایم کمترین تراکم را داشته‌ایم و پراکندگی بیشتری مشاهده می‌شود، همچنین زمانی که از الگوی ارتباطی fixed number of presynaptic partners می‌باشد،

استفاده کرده‌ایم تاثیر نورون‌های مهاری بر روی نورون‌های تحریکی به بیشینه مقدار خود رسیده که به وضوح کاهش ضربه و افزایش بازه میان ضربه‌ها در تصویر دیده می‌شود.

## ۵ تصمیم‌گیری

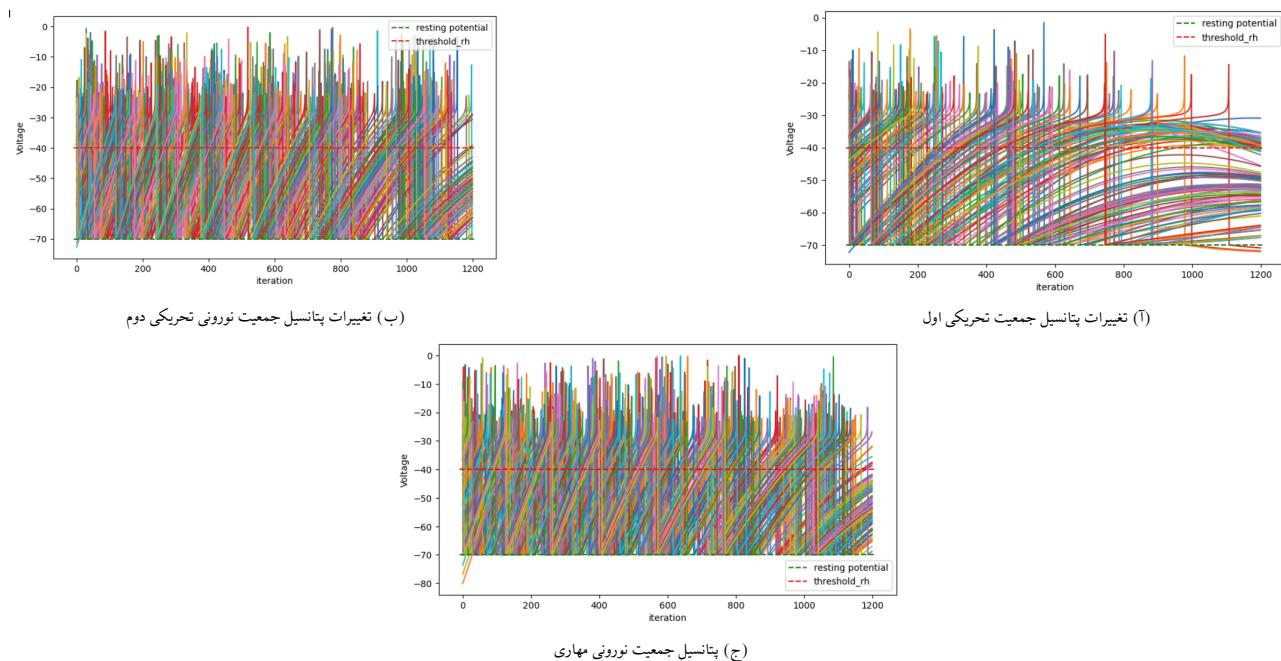
### ۱۰.۵ شبیه‌سازی تصمیم‌گیری با وجود دو انتخاب

در این بخش دو جمعیت نورونی تحریکی متشكل از ۸۰۰ نورون AELIF و یک جمعیت نورونی مهاری متشكل از ۲۰۰ نورون AELIF تشکیل می‌دهیم، که ارتباط میان آن‌ها را با استفاده از الگوی کامل برقرار می‌کنیم، شماتیک آن را می‌توانید در شکل ۱۴ مشاهده کنید.



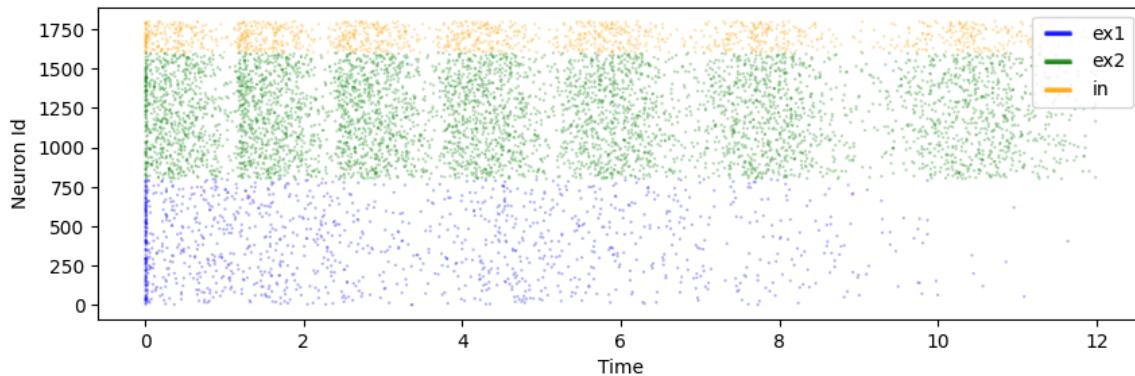
شکل ۱۴: شماتیک کلی جمعیت‌های نورونی ایجاد شده و ارتباطات میان آن‌ها

حال یک ورودی قوی‌تر را به جمعیت تحریکی دوم می‌دهیم تا در تصمیم‌گیری آن انتخاب شود، می‌توان نمودار تغییرات پتانسیل هر سه جمعیت را در شکل ۱۵ مشاهده کرد، این نمودار نشان می‌دهد بعد از مدتی جمعیت نورونی تحریکی اول که ورودی کوچکتری دارد فعالیتش کمتر می‌شود و توسط جمعیت نورونی مهاری مهار می‌شود به نوعی، اما جمعیت نورونی تحریکی دوم به فعالیت خود ادامه می‌دهد و تقویت هم می‌شود.



شکل ۱۵: تغییرات پتانسیل جمعیت‌های نورونی متفاوت

البته به این نکته باید توجه داشت که وقتی ما از مدل نورونی AELIF استفاده کردیم فعالیت جمعیت ما لزوماً بعد از مدتی به افزایش خود ادامه نخواهد داد و با توجه به خاصیت تطبیق پذیری که در نورون‌های ما وجود دارد فعالیت جمعیت کمتر می‌شود اما خوب نسبت به جمعیت دیگر که در رقابت با آن پیروز شده است این اتفاق دیرتر رخ خواهد داد. حال به صورت یکجا برای فعالیت هر سه جمعیت نورونی Raster plot را رسم می‌کنیم شکل ۱۶، که مطابق انتظار جمعیت دوم با توجه به اینکه ورودی بزرگتری به آن وارد می‌شود به فعالیت خود ادامه می‌دهد اما جمعیت اول بازنشه این رقابت می‌شود و از فعالیتش به مرور زمان کم می‌شود.

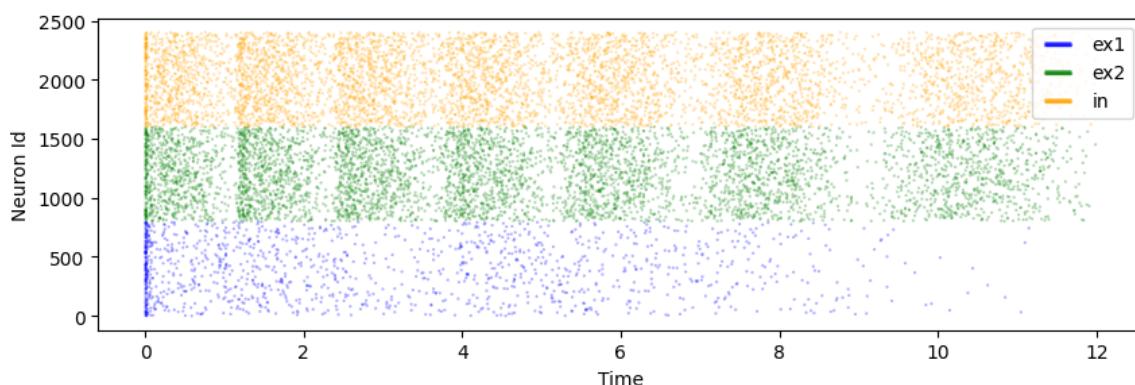


شکل ۱۶: برای دو جمعیت نورونی تحریکی و یک جمعیت مهاری

## ۲۰۵ بررسی تاثیر پارامترها

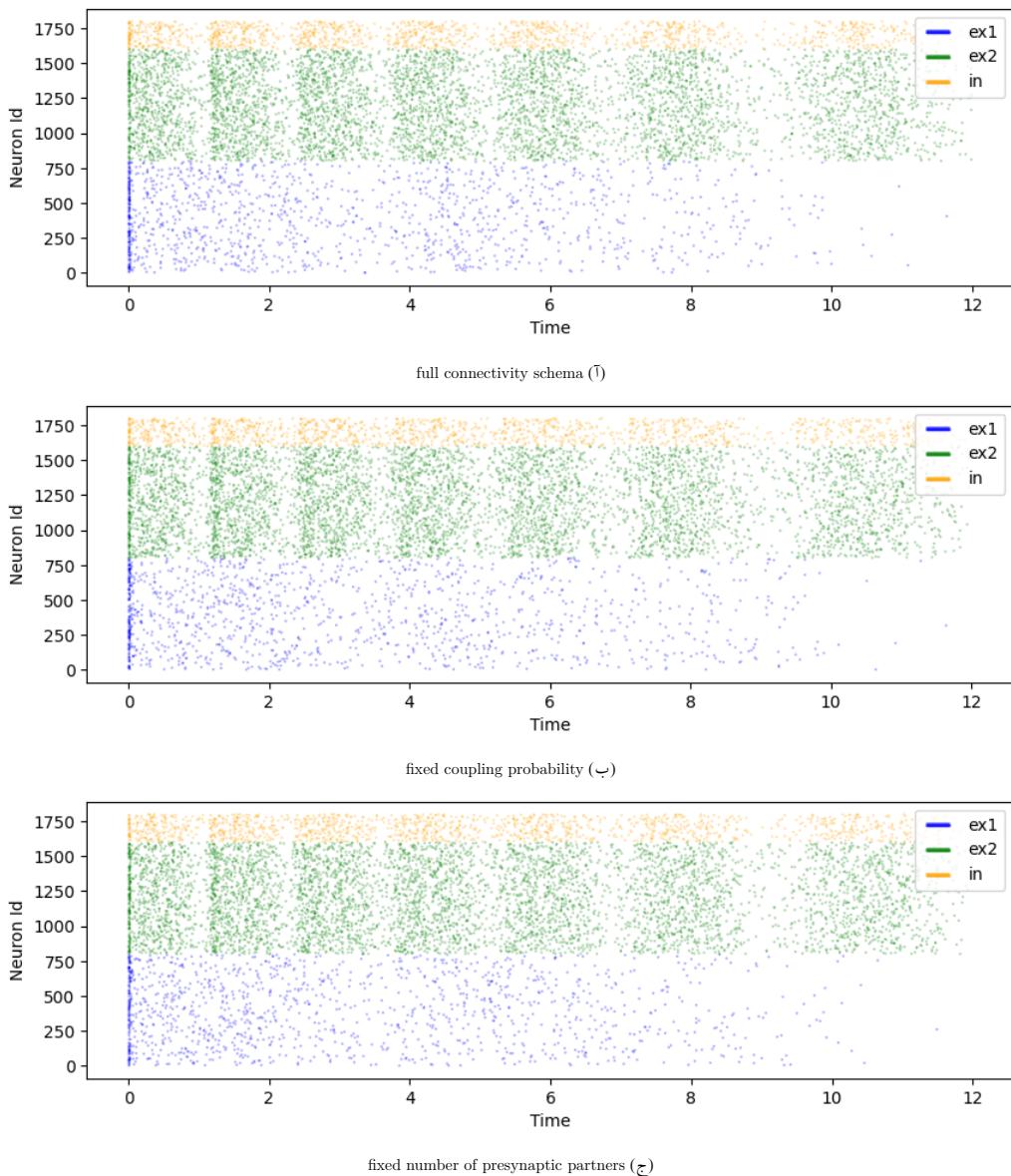
### ۱۰۲.۵ اندازه جمعیت‌ها

در این بخش آزمایش قبلی را با افزایش جمعیت نورونی مهاری تکرار می‌کنیم، همچنان دو جمعیت نورونی تحریکی با ۸۰۰ نورون خواهیم داشت اما یک جمعیت مهاری با ۸۰۰ نورون خواهیم داشت.



شکل ۱۷: برای دو جمعیت نورونی تحریکی و یک جمعیت مهاری با ۸۰۰ نورون

همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌کنید، اینبار زمانی که ما تعداد نورون مهاری را بیشتر می‌کنیم سریع‌تر نورون‌های تحریکی جمعیت اول به نسبت فعالیتشان کاهش می‌یابد و از طرفی به طور کلی الگویی که میان فاصله هر دو اسپایک وجود داشت کاهش می‌یابد، زیرا تعداد نورون‌های مهاری ما افزایش داشته و تاثیر منفی خواهند داشت در نتیجه بازه زمانی میان ضربه‌ها افزایش داشته است.



شکل ۱۸

در این بخش ما با استفاده از سه الگوی متفاوت میان جمعیت‌های نورونی اتصال ایجاد کردیم و نتیجه هر سه مدل در شرایط مشابه در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، نکته‌ای که وجود دارد این است که به صورت کلی در رفتاری که ما در این بخش برای تصمیم‌گیری داریم تغییری ایجاد نمی‌شود چون آن جمعیتی که ورودی بزرگتری دارد در نهایت برنده این رقابت خواهد بود اگر اندازه وزن‌ها برابر باشد، بنابراین مطابق انتظار این مورد در رفتار نورون‌ها تغییری نداشته اما مثلاً در جمعیت‌هایی که به صورت fixed coupling probability هستند چون تعداد اتصالات کمتر بوده میزان فعالیت جمعیت‌ها نیز کمتر بوده است.

## ۶ نتیجه‌گیری

همانطور که در این پژوهه انتظار داشتیم جمعیت‌های نورونی را ساختیم و انواع الگوهای ارتباطی میان آن‌ها را مورد بحث و تحلیل قرار دادیم، در نهایت نیز فرآیند تصمیم‌گیری در زمانی که دو انتخاب داشتیم را مورد بررسی قرار دادیم.