

# گزارش پروژه دوم علوم اعصاب محاسباتی

امیرحسین انتظاری

۱۴۰۳ فروردین ۱۲

# فهرست مطالب

۱	پیاده سازی و کار سیناپس . . . . .	۱۰۰
۱	بررسی رفتار درون یک جمیت نورونی . . . . .	۱۱۰
۵	بررسی رفتار دو جمیت نورونی . . . . .	۲۱۰
۱۰	الگوهای ارتباطی . . . . .	۲۰۰
۱۰	الگوی ارتباط کامل . . . . .	۱۲۰
۱۶	الگوی ارتباط تصادفی با احتمال جفت شدن ثابت . . . . .	۲۲۰
۲۱	الگوی ارتباط تصادفی با تعداد ثابت نورون پیش سیناپسی . . . . .	۳۲۰
۲۸	شبیه سازی دو جمیت نورونی . . . . .	۳۰۰
۲۸	مورد الف . . . . .	۱۳۰
۲۹	تحلیل پارامتر ها . . . . .	۲۳۰
۳۴	فرایند تصمیم گیری . . . . .	۴۰۰
۳۶	امتیازی . . . . .	۱۰۴۰

### چکیده

هدف از این پژوهه، پیاده سازی سیناپس و جمعیت نورونی، و همچنین بررسی رفتار های آن ها می باشد. در این پژوهه ابتدا ساز و کار سیناپسی را با استفاده از تابع دلتای دیراک<sup>۱</sup> پیاده سازی میکنیم، سپس سه الگوی ارتباطی بین نورون ها را پیاده سازی کرده و با انجام آزمایش های مناسب ویژگی های هر یک را بررسی میکنیم. سپس این الگو های ارتباطی را بین جمعیت های نورونی مختلف قرار داده و آن ها را بررسی میکنیم. در نهایت نیز سه جمعیت نورونی به همراه سیناپس های آن ها درست کرده و تاثیر آن ها بر یک دیگر را مشاهده می کنیم.

## ۱۰. پیاده سازی ساز و کار سیناپس

در این بخش، میخواهیم ساز و کار سیناپس را با استفاده ازتابع دلتای دیراک<sup>۲</sup> پیاده سازی کنیم. جزئیات پیاده سازی در فایل های کد آماده است و فقط در اینجا به نحوه پیاده سازی و همچنین آزمایش آن با یک و دو جمعیت نورونی می پردازیم.

طبق لینک داده شده، در تجزیه و تحلیل ریاضی، تابع دلتای دیراک (یا توزع<sup>۳</sup>)، همچنین به عنوان تکانه واحد شناخته می شود، یک تابع تعمیم یافته بر روی اعداد واقعی است که مقدار آن در همه جا صفر است به جز صفر، و انتگرال آن در کل محور حقیقی برابر یک است.<sup>۴</sup>

از این رو برای پیاده سازی آن به این صورت عمل میکنیم که ابتدا یک ماتریس به نام  $W$  به ابعاد تعداد نورون های پیش سیناپسی ( $m$ ) در تعداد نورون های پس سیناپسی ( $n$ ) ایجاد میکنیم که ماتریس وزن های سیناپس ما را تشکیل می دهد. ( $W_{m \times n}$ ) در هر تکرار<sup>۴</sup> از شبیه سازی، اندیس نورون های پیش سیناپسی که در تکرار قبلی ضربه<sup>۵</sup> زده اند را در یک متغیر مانند `pre_spike` ذخیره کرده، و از ماتریس وزن ها ( $W$ ) سطر هایی که ضربه زده اند را جدا کرده و سپس برای هر یک از نورون های پیش سیناپسی و اندیس متناظر، مجموع این وزن ها را حساب کرده و به عنوان جریان سیناپسی ورودی آن نورون در نظر میگیریم و در متغیر مانند `I_sg` ذخیره میکنیم. حال باید این جریان را به جریان نورون های پس سیناپسی اضافه کنیم، اینکار میتواند به راحتی توسط یک رفتار<sup>۶</sup> به نام دندرایت پیاده سازی شود که در هر تکرار، جریان سیناپسی را به علاوه جریان ورودی نورون می کند:

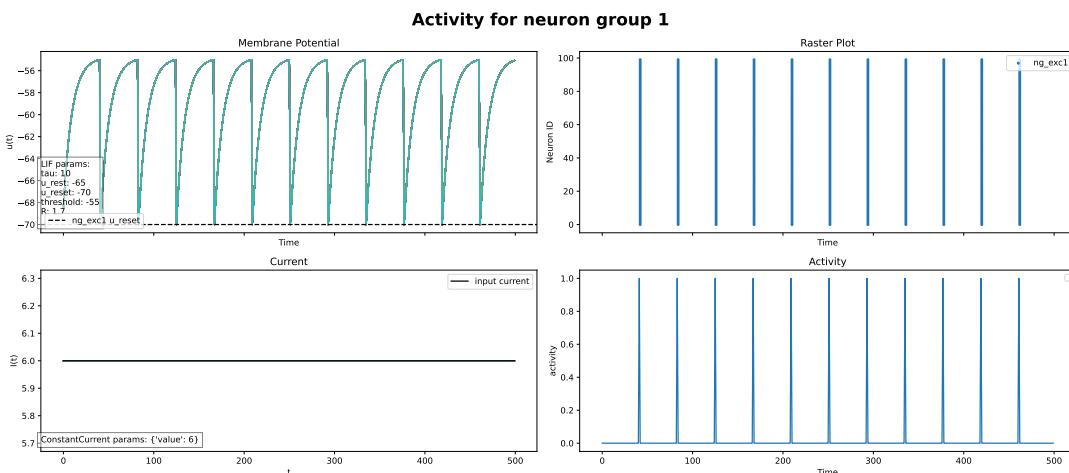
$$I_{ng}(t) = I_{sg}(t-1) + I_{sg}(t) \quad (1)$$

حال به بررسی رفتار یک یا دو جمعیت نورونی، با پارامتر های مختلف می پردازیم. در این قسمت فقط الگوی ارتباط کامل را بررسی میکنیم و بررسی دقیق تر<sup>۳</sup> الگو را به بخش دوم پروژه واگذار میکنیم.

## ۱۱.۰ بررسی رفتار درون یک جمعیت نورونی

### جمعیت نورونی بدون سیناپس

برای درک بهتر ساز و کار سیناپس ها، بهتر است ابتدا تاثیر آن را درون یک جمعیت نورونی به تنهایی بررسی کنیم. از این رو اول رفتار یک جمعیت را بدون حضور سیناپس و سپس در حضور سیناپس، بعد گذشت تکرار مشاهده میکنیم. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می کنید، هنگامی که یک جریان ثابت به یک گروه نورونی یکسان وارد می شود، زمان ضربه زدن تمامی نورون ها در یک لحظه اتفاق میفتد. دلیل این رفتار بدیهی است و بخارط این است که از آنجا که نورون ها مقادیر یکسانی در هنگام شروع دارند و همچنین جریان یکسانی دریافت می کنند، زمان ضربه زدن آن ها نیز مشابه خواهد بود.

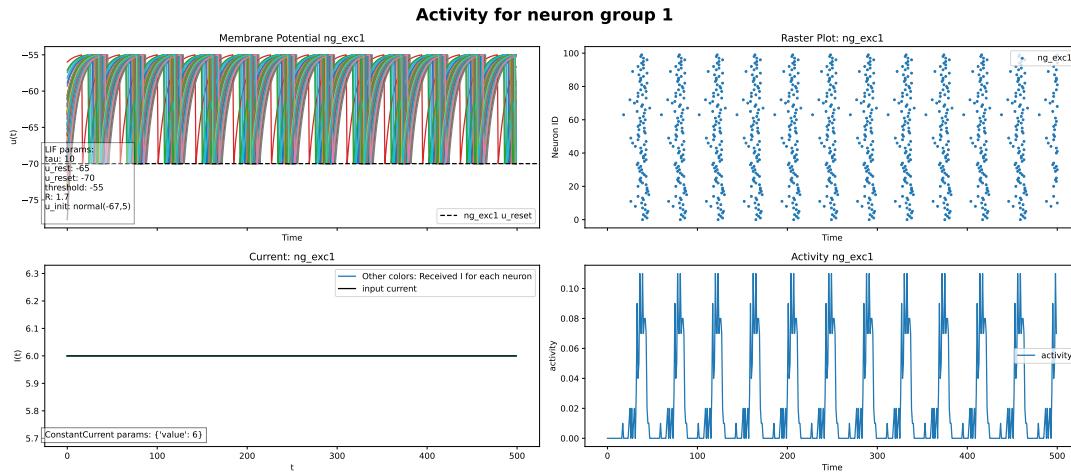


شکل ۱: جمعیت نورونی بدون سیناپس

حال باید مقادیر اولیه نورون ها مانند اختلاف پتانسیل اولیه آن ها را تغییر دهیم تا رفتار آن ها را ببینیم. برای اینکار، اختلاف پتانسیل اولیه نورون ها را در حدود بازه ۶۷ با واریانس ۲ توزیع میکنیم. همانطور که در شکل ۲ نیز مشاهده می کنیم، نورون ها در ابتدا با یک اختلاف

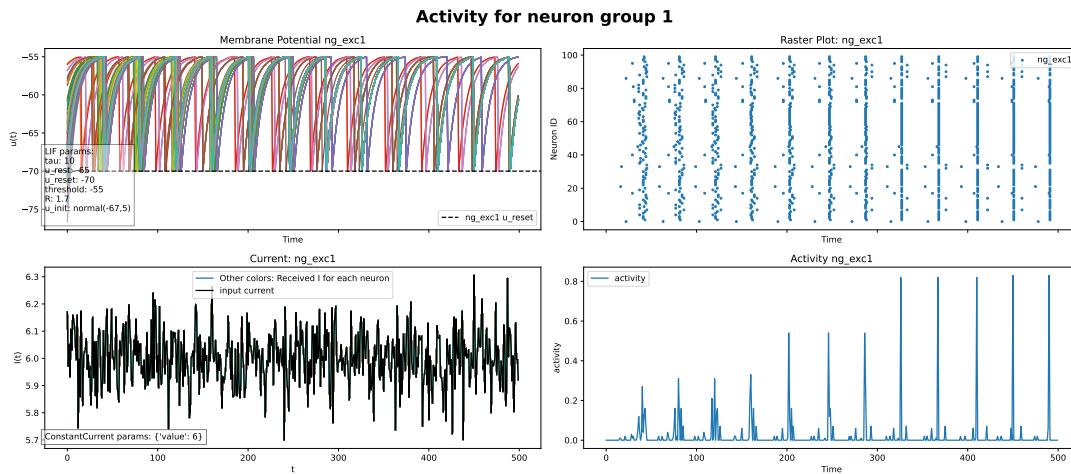
۱ Delta Dirac function<sup>۳</sup>  
۲ ویکی پدیا<sup>۴</sup>  
۳ iteration<sup>۵</sup>  
۴ spike<sup>۶</sup>  
۵ Behavior<sup>۶</sup>

پتانسیل متفاوت شروع به فعالیت میکنند و از آنجا که جریان ورودی به آن ها نیز یکسان است، فواصل ضربه زدن خود را حفظ میکنند و با همان فواصل به ضربه زدن ادامه می دهند. در نتیجه فعالیت کلی جمعیت، به صورت دوره ای تکرار خواهد شد.



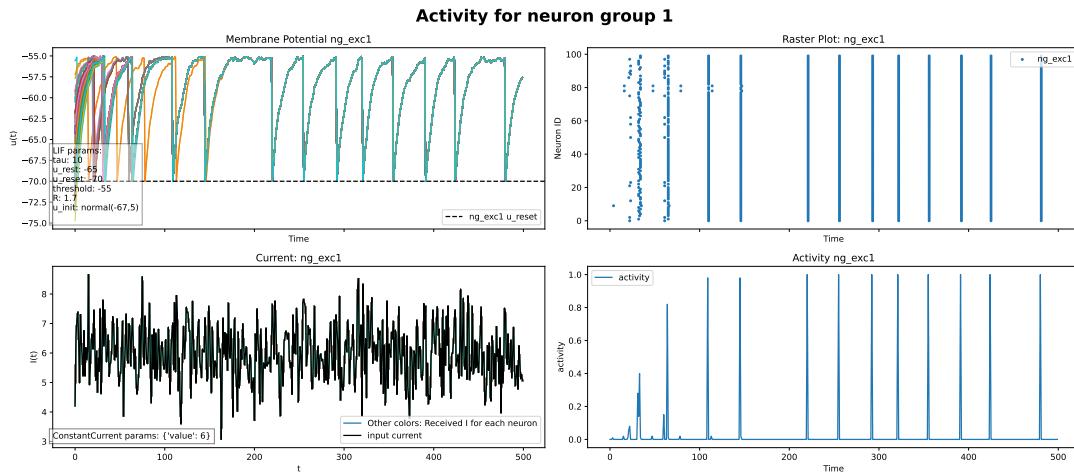
شکل ۲: جمعیت نورونی بدون سیناپس: اختلاف پتانسیل اولیه متفاوت

حال اگر به همین جمعیت یک جریان نویز دار اضافه کنیم چه اتفاقی می افتد؟ برای اینکار یک رفتار (Behavior) به نام **NoiseCurrent** تعریف میکنیم که وظیفه آن اضافه کردن نویز به جریان نورون باشد. مقدار این نویز را یک جریان رندوم با میانگین  $0^\circ$  و واریانس  $1.0^\circ$  قرار می دهیم. همانطور که در شکل ۳ مشاهده میکنیم، به دلیل اضافه شدن نویز، الگوی فعالیت نورون ها در بازه هایی که ضربه میزند رفته رفته تغییر کرده و الگوی خود را از دست می دهد. هر چند اگر میزان این نویز خیلی زیاد باشد، می تواند برآیند جریان ورودی را زیاد کرده، به نحوی که رفتار نورون ها پس از مدتی مشابه شود. (شکل ۴)

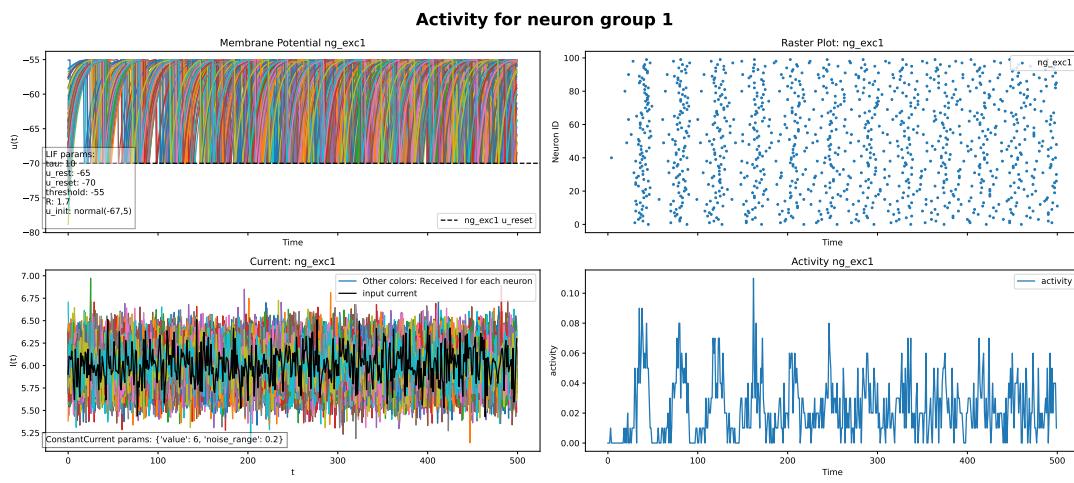


شکل ۳: جمعیت نورونی بدون سیناپس: اختلاف پتانسیل اولیه متفاوت و جریان نویزی

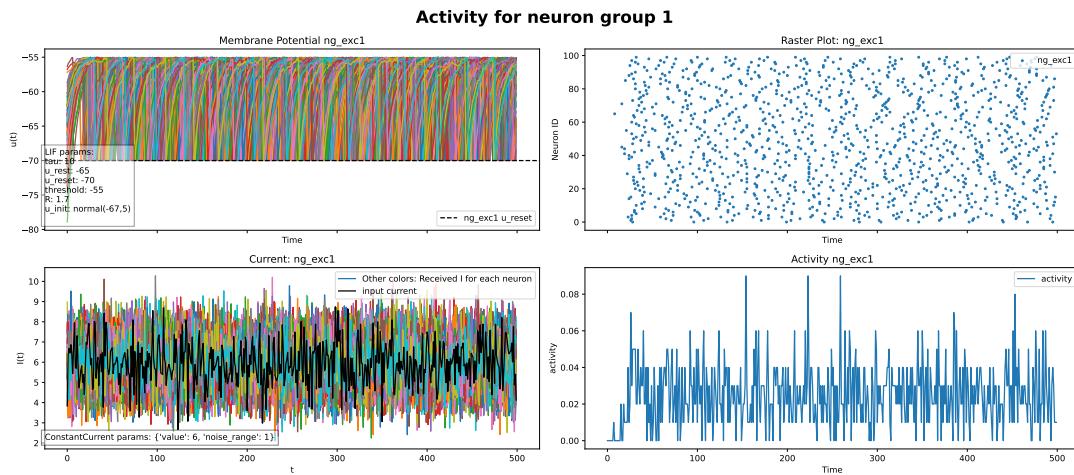
حال فعالیت جمعیت نورونی را با جریان متفاوت برای هر نورون آزمایش میکنیم تا رفتار آن ها را بر این اساس نیز مشاهده کنیم. برای اینکار، جریان ورودی به جمعیت نورونی را با واریانس  $0.2^\circ$  اضافه میکنیم. همانطور که در شکل ۵ مشاهده میکنیم، تغییر دادن جریان ورودی به ازای هر نورون، زمان ضربه زدن هر نورون را از دیگری نسبت به حالت های قبل بیشتر متفاوت می کند و در نتیجه، پراکندگی زمان فعالیت نورون ها بیشتر می شود. همچنین اضافه کردن واریانس بیشتر میتواند پراکندگی را آنقدر افزایش دهد تا تشخیص یک الگو برای زمان ضربه زدن نورون ها بسیار سخت تر شود (شکل ۶)



شكل ٤: جماعت نوروني بدون سيناپس: اختلاف پتانسييل اوليه متفاوت و جريان نويزي زياد



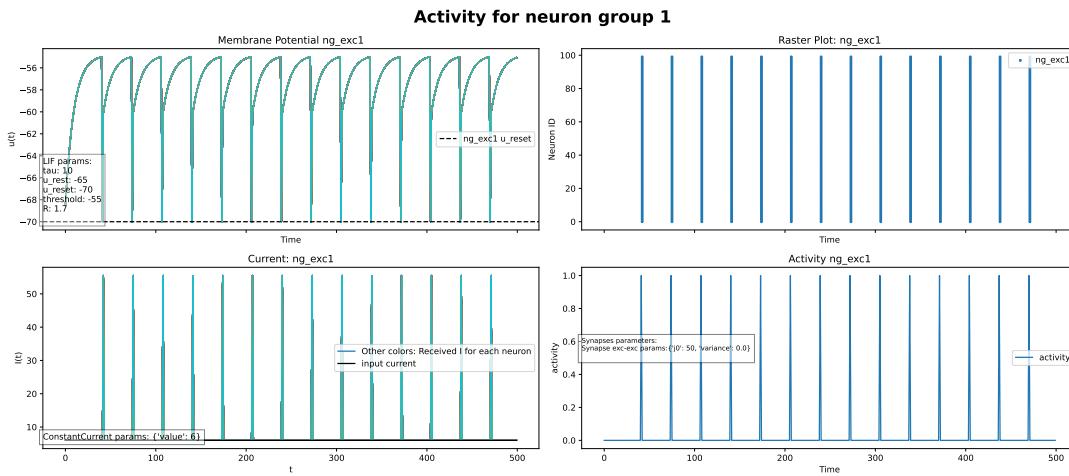
شكل ٥: جماعت نوروني بدون سيناپس: جريان ورودي متفاوت



شكل ٦: جماعت نوروني بدون سيناپس: جريان ورودي با تفاوت زياد

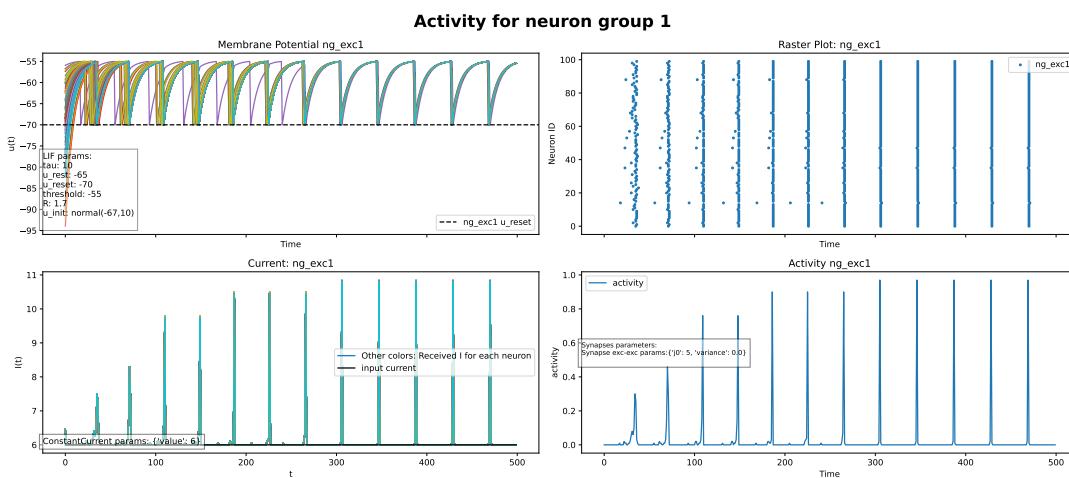
## جمعیت نورونی به همراه سیناپس

حال که تاثیر انواع متفاوت جریان را بر یک جمعیت نورونی بررسی کردیم، به سراغ اضافه کردن سیناپس به آن میرویم. برای سادگی، سیناپس را با الگوی ارتباط کامل<sup>7</sup> بررسی میکنیم و بررسی الگوهای دیگر را به بخش دوم پردازه و اگذار میکنیم. در ابتدا نیز وزن‌های سیناپسی را کامل یکسان با  $j_0 = 0$  و  $\sigma = \sigma$  در نظر میگیریم و سپس به آن واریانس اضافه میکنیم. همانطورکه در شکل ۷ ملاحظه میکنیم، در یک جمعیت نورونی به همراه سیناپس داخلی، که نورون‌ها نیز در زمان اولیه اختلاف پتانسیل یکسانی دارند، رفتار جمعیت همانند هنگامی است که سیناپس وجود نداشته باشد. این به این دلیل است که در این حالت، قبل از اولین ضربه سیناپس تاثیری ندارد و رفتار نورون همانند جمعیت بدون سیناپس با جریان ورودی ثابت است. از این رو اختلاف پتانسیل نورون‌ها به طور همزمان افزایش می‌یابد تا هنگامی که به آستانه رسیده و نورون‌ها همزمان ضربه می‌زنند. در این لحظه، بلاقلاً جریان سیناپسی نیز به جریان دریافتی نورون اضافه می‌شود و از آنجا که سیناپس ارتباط کامل است، زمان ضربه زدن نورون‌ها تغییری پیدا نمی‌کند.



شکل ۷: جمعیت نورونی با سیناپس: جریان ثابت

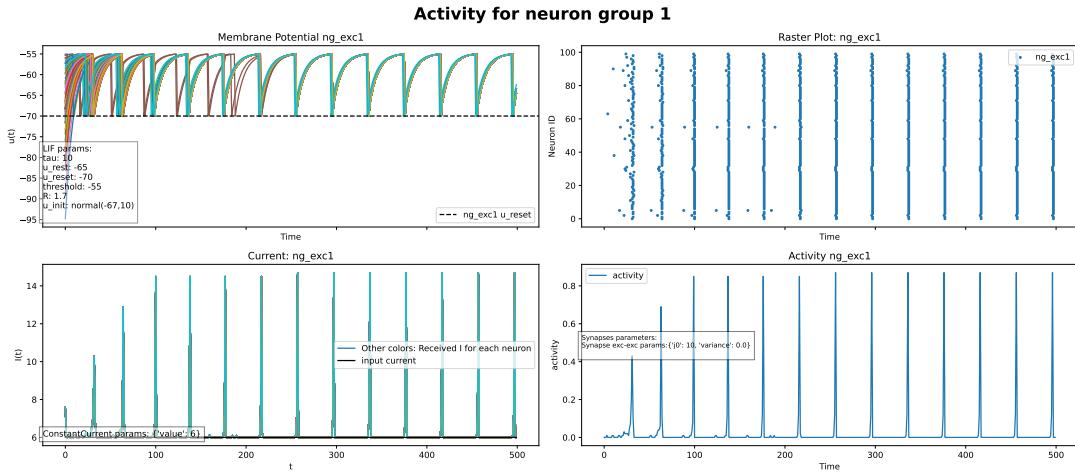
حال اگر اختلاف پتانسیل اولیه نورون‌ها را متفاوت مقدار دهی کنیم، مطابق شکل ۸ میبینیم که زمان ضربه زدن نورون‌ها متفاوت می‌شود. هر چند پس از مدتی، به دلیل اضافه شدن جریان سیناپسی به جریان ورودی نورون و درنتیجه افزایش یافتن جریان دریافتی نورون، این اختلاف زمانی ضربه‌ها نیز کمتر می‌شود. افزایش مقدار  $j_0$  به  $10^\circ$  نیز زمان این همگرایی را سریع تر می‌کند. (شکل ۹)



شکل ۸: جمعیت نورونی با سیناپس: اختلاف پتانسیل اولیه متفاوت

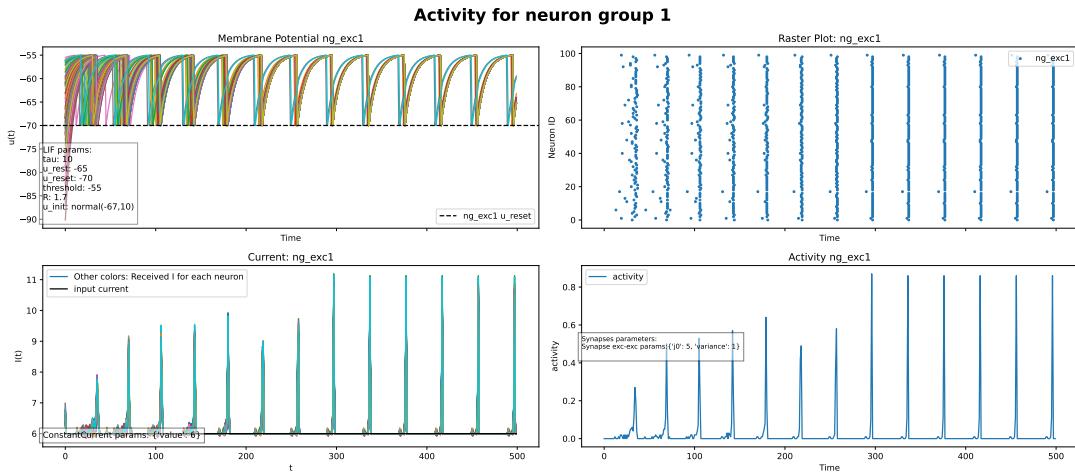
حال واریانس وزن‌های سیناپسی را از  $0^\circ$  بیشتر میکنیم، تا تاثیر این پارامتر را بر روی رفتار جمعیت ملاحظه کنیم. انتظار داریم که افزودن پراکنده‌گی به وزن‌ها باعث پراکنده‌گی زمان ضربه زدن نورون‌ها نیز بشود. شکل ۱۰ این موضوع را تایید میکند و ملاحظه می‌شود که فعالیت

full connectivity<sup>7</sup>



شکل ۹: جمعیت نورونی با سیناپس: اختلاف پتانسیل اولیه متفاوت و وزن های بیشتر

نورون ها مانند شکل قبل همگرا نشده و بالا و پایین می شود (در نهایت بین مقادیر  $60^{\circ}$  و  $80^{\circ}$  نوسان می کند). هرچند در کل تاثیر این پارامتر نسبت به پارامتر دیگر چندان زیاد نیست.



شکل ۱۰: جمعیت نورونی با سیناپس: اختلاف پتانسیل اولیه متفاوت و وزن با واریانس بیشتر

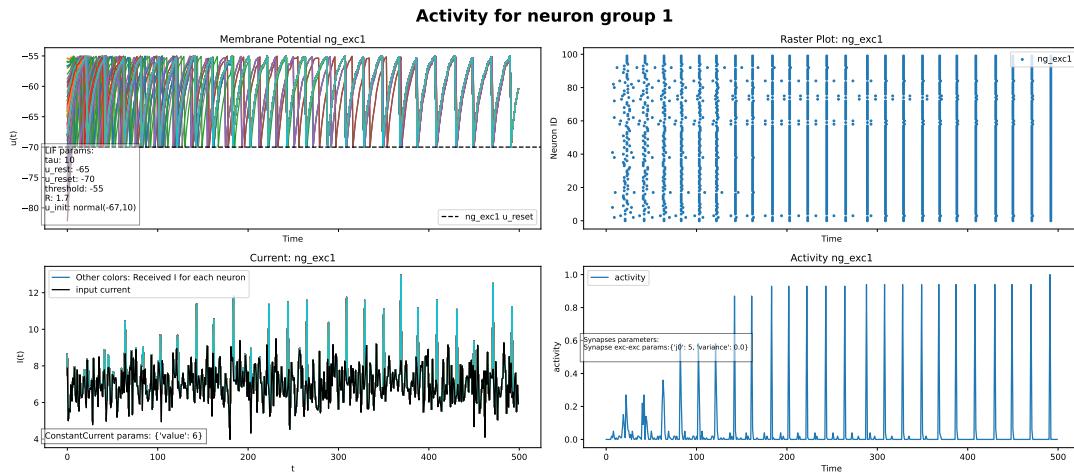
بعد از بررسی پارامتر های سیناپس، نوبت به بررسی تاثیر جریان بر روی سیناپس می رسد. مطابق زیربخش قبل، در ابتدا رفتار جمعیت را با جریان نویزی یکسان برای همه نورون ها بررسی میکنیم. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، در ابتدا، زمان ضربه زدن نورون ها با یکدیگر متفاوت است و پس از مدتی این تفاوت کاهش یافته و همگرا می شود به طور که در نهایت فعالیت مشاهده می کنیم که ابتدا فعالیت نورونی حدود  $60^{\circ}$  بوده و در نهایت به  $1^{\circ}$  می رسد.

اکنون نوبت به آزمایش رفتار جمعیت نسبت به جریان متفاوت می رسد. در این آزمایش، رفتار جمعیت را با جریان نویزی برای نورون های مختلف با دامنه نوسان  $60^{\circ}$  بررسی میکنیم. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، داشتن جریان های متفاوت سبب می شود که زمان ضربه زدن نورون ها پارکندگی بیشتر نسبت به قبل داشته باشد ولی برخلاف جمعیت بدون سیناپس که این پارکندگی کاهش نمی یافتد، در جمعیت دارای سیناپس مشاهده میکنیم که پس از مدتی، پارکندگی زمان ضربه زدن نورون ها کاهش یافته و در نتیجه فعالیت بیشتر میشود.

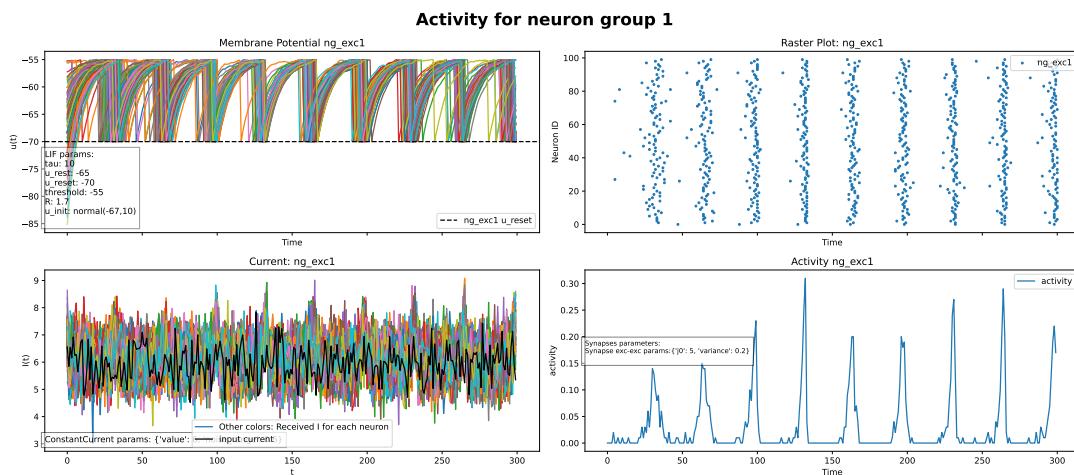
## ۲.۱۰. بررسی رفتار دو جمعیت نورونی

پس از بررسی رفتار یک جمعیت نورونی در حضور سیناپس، اکنون به سراغ بررسی رفتار دو جمعیت نورونی که از یکی به دیگری سیناپس وجود دارد می رویم. در این بخش تنها حالتی را در نظر میگیریم که یک جمعیت، نورون های پیش سیناپسی را تشکیل داده و جمعیت دیگر نورون های پس سیناپسی. بررسی حالت هایی با سیناپس های بیشتر را به بخش های بعدی واگذار میکنیم.

برای اینکار، ابتدا دو جمعیت نورونی تحریکی کاملا مشابه تشکیل میدهیم که فقط از جمعیت اول به جمعیت دوم سیناپس داریم. همچنین جریان ورودی هر دو جمعیت را نیز یکسان و ثابت میگیریم. حال اگر شبیه سازی را انجام دهیم، در شکل ۱۳ ملاحظه میکنیم که زمان ضربه زدن



شکل ۱۱: جمعیت نورونی با سیناپس: اختلاف پتانسیل اولیه متفاوت و جریان نویز دار



شکل ۱۲: جمعیت نورونی با سیناپس: اختلاف پتانسیل اولیه متفاوت و جریان نویزی غیریکسان

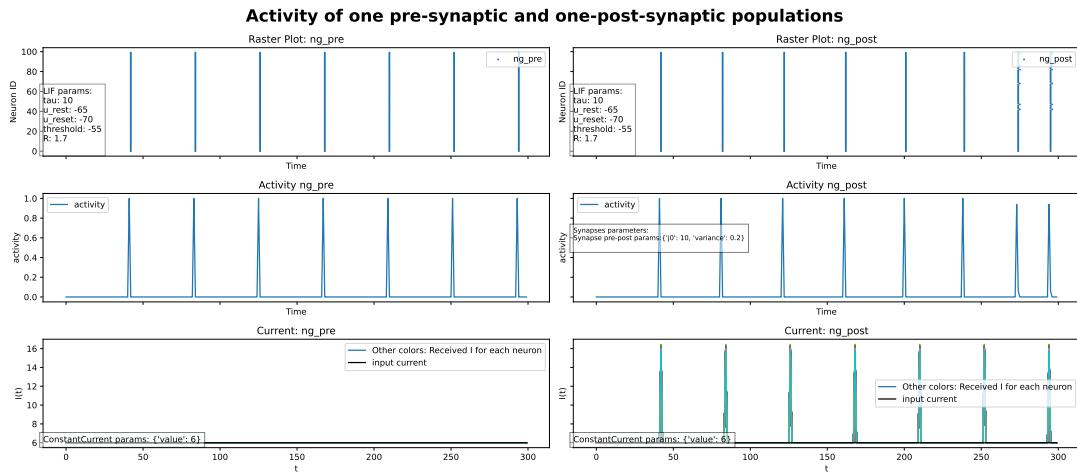
نورون های هر دو جمعیت کاملاً یکسان است که این موضوع مربوط به کاملاً یکسان بودن این دو جمعیت است. همچنین به دلیل اینکه در پیاده سازی سیناپس، طبق گفته حل تمرین مربوطه، نیازی نیست تا تاثیر سیناپس تا لحظات بعد نیز باقی بماند، علاوه از اینکه جریان ورودی به نورون های پس سیناپسی بی تاثیر می شود. اما اگر بتوان تاثیر جریان های موجود در سیناپس را حفظ نمود، ضربه های نورون پیش سیناپسی نیز روی نورون های پس سیناپسی تاثیر گذار خواهد بود (شکل ۱۴) به دلیل اینکه این نوع سیناپس هدف اصلی پروژه نمی باشد، ما بررسی های خود را بیشتر روی همان حالت گفته شده توسط دستیار آموزشی انجام می دهیم.

حال اگر به نمودار ۱۳ اختلاف پتانسیل اولیه متفاوت بیفزاییم، طبق شکل ۱۵ ملاحظه میکنیم که فواصل زمانی ضربه ها در جمعیت دوم نزدیک تر بوده و فعالیت آن نسبت به جمعیت اول بیشتر است. این به این دلیل است که در جمعیت دوم، علاوه بر جریان ورودی، جریان سیناپسی که از جمعیت اول گرفته می شود نیز وجود دارد.

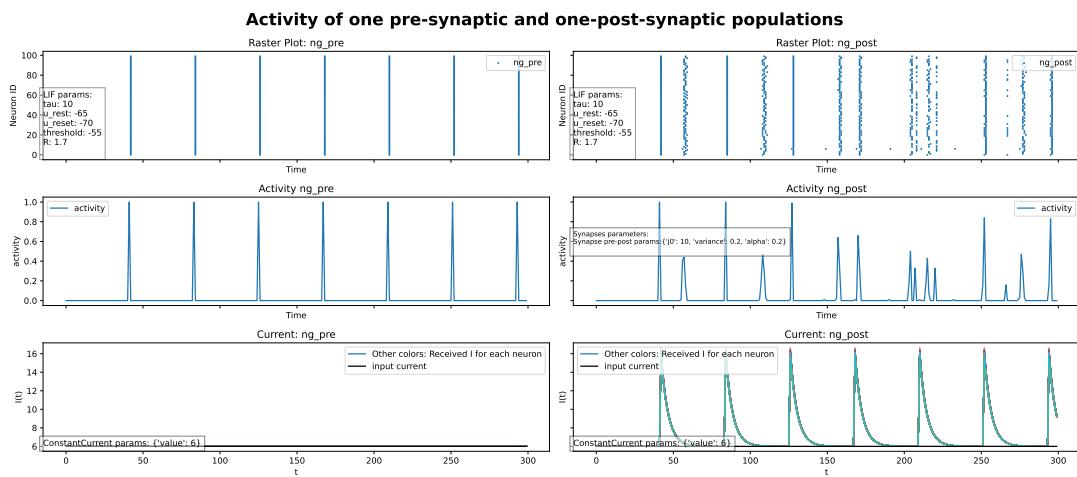
حال به جریان ورودی هر دو جمعیت، یک جریان یکسان نویز دار اضافه میکنیم. همانطور که در شکل ۱۶ ملاحظه میکنیم، با اینکه نویز اضافه شده به هر دو نمودار از توزیع یکسان (میانگین=۰ و واریانس=۱) پیروی میکند، جریان دریافتی نهایی نورون های جمعیت پس سیناپسی، به طور میانگین بیشتر از جمعیت نورونی پیش سیناپسی است و در نتیجه فعالیت جمعیت آن نیز بیشتر است. این به این دلیل است که جریانی تحت تاثیر ضربه های جمعیت پیش سیناپسی به جریان جمعیت پس سیناپسی نیز اضافه می شود.

حال رفتار جمعیت را با جریان نویزی غیریکسان آزمایش میکنیم. دامنه نوسان را ۰.۲ تنظیم میکنیم و انتظار داریم که مانند شکل های گذشته، میزان پراکندگی زمان ضربه زدن های نورون ها بیشتر شود، که از شکل ۱۷ نیز همین دریافت می شود.  
اگر دامنه نوسان جریان را تا ۰.۵ بیشتر افزایش دهیم، هرچند پراکندگی زمان ضربه زدن هر دو جمعیت بیشتر می شود، ولی هنوز بیشتر بودن فعالیت جمعیت نورونی دوم مشهود است. (شکل ۱۸)

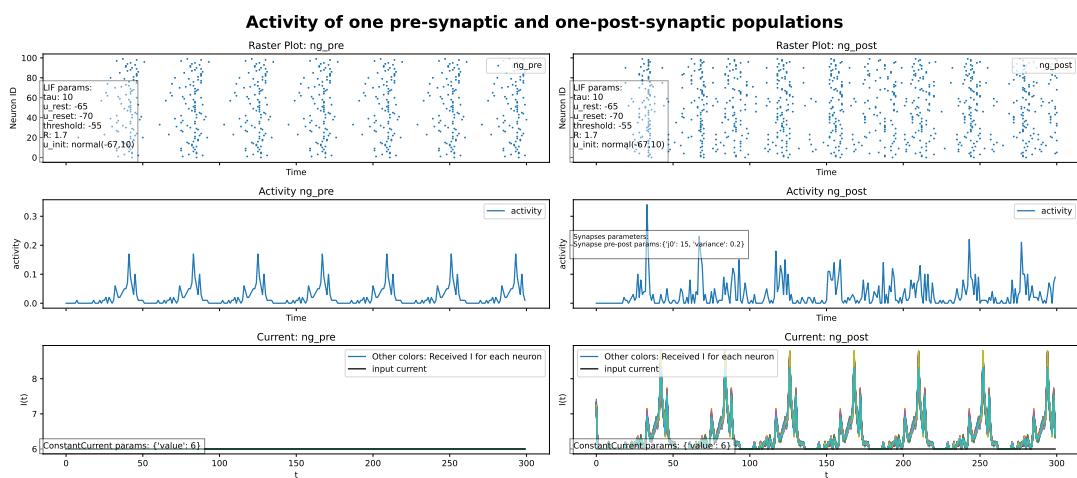
به عنوان آخرین نمودار این بخش و مقدمه ای بر بخش بعدی، افزایش مقدار  $\sigma_z$  را بررسی میکنیم. همانطور که از شکل ۱۹ بر می آید، افزایش



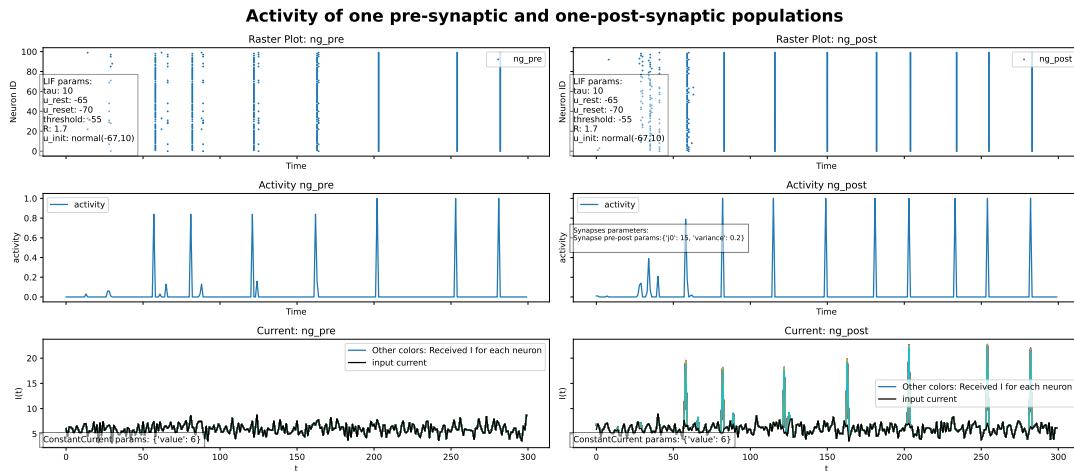
شکل ۱۳: جمعیت نورونی پیش سیناپسی و پس سیناپسی



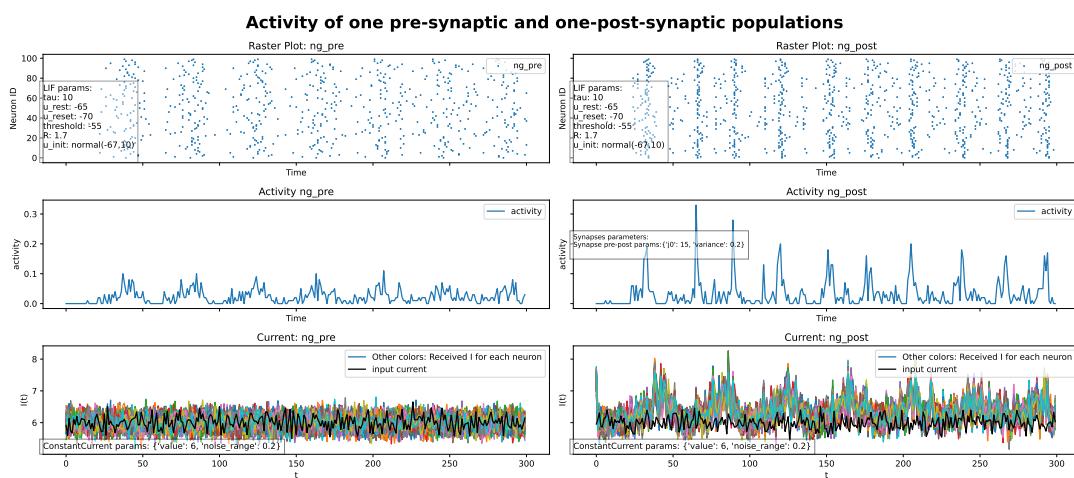
شکل ۱۴: جمعیت نورونی پیش سیناپسی و پس سیناپسی: حفظ تاثیر حریان سیناپسی تا لحظات بعد



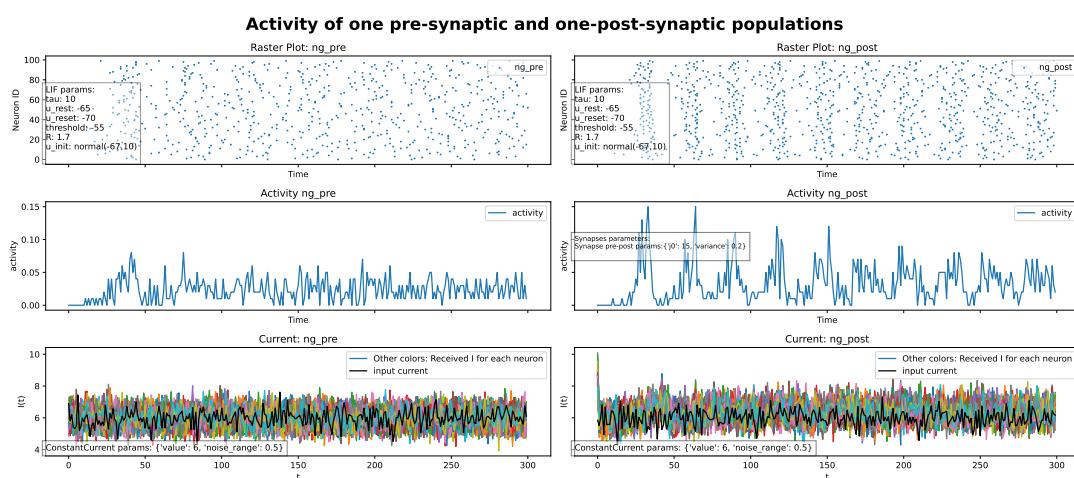
شکل ۱۵: جمعیت نورونی پیش سیناپسی و پس سیناپسی: تاثیر اختلاف پتانسیل اولیه مقاومت



شكل ١٦: جمعیت نورونی پیش سیناپسی و پس سیناپسی: تاثیر جریان نویزی

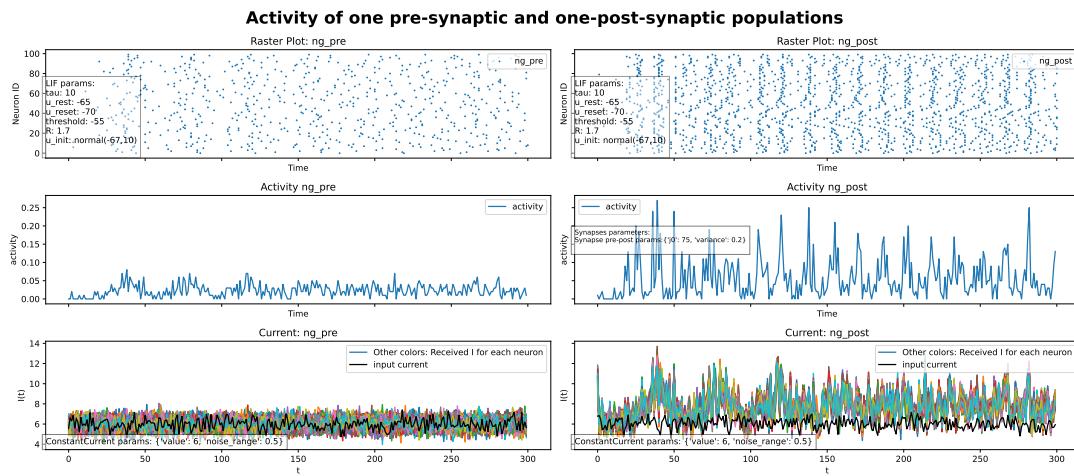


شكل ١٧: جمعیت نورومنی پیش سیناپسی و پس سیناپسی: تاثیر جریان نویزی غیریکسان



شكل ۱۸: جمعیت نورومنی پیش سیناپسی و پس سیناپسی: تاثیر جریان نویزی غیریکسان

۰۷ منجر به افزایش وزن ها و در نتیجه افزایش جریان سیناپسی ورودی به جمعیت نورونی پس سیناپسی شده و فعالیت آن را بیشتر می کند.



شکل ۱۹: جمعیت نورونی پیش سیناپسی و پس سیناپسی: تاثیر جریان نویزی غیریکسان

## ۲۰. الگو های ارتباطی

در این بخش از پژوهه، به بررسی سه الگوی ارتباطی، یعنی الگوی ارتباط کامل<sup>۸</sup>، ارتباط تصادفی با احتمال جفت شدن ثابت<sup>۹</sup> و ارتباط تصادفی با تعداد ثابت نورون پیش سیناپسی<sup>۱۰</sup> می پردازیم. در این بخش، با انجام آزمایش های مناسب، جریان حاصل و حساسیت به نویز را در هر یک از این الگوها بررسی میکنیم.

ارتباط واقعی بین نورون های قشری انواع مختلف و لایه های مختلف، یا درون گروه هایی از نورون های هم نوع و یک لایه هنوز تا حدی ناشناخته است، زیرا داده های تجربی محدود است. حداکثر، برخی برآوردهای قابل قبول از احتمالات اتصال وجود دارد. در برخی موارد احتمال اتصال به عنوان وابسته به فاصله در نظر گرفته می شود، در سایر تخمین های تجربی به عنوان یکنواخت در همسایگی محدود یک ستون (column) قشر مغز. [۴]

در شبیه سازی های ما چند طرح وجود دارد که اغلب مورد استفاده قرار می گیرند. اکثر اینها اتصال تصادفی درون و بین جمعیت ها را فرض می کنند. در ادامه این طرح ها را با تمرکز ویژه بر رفتار مقیاس بندی ناشی از هر انتخاب از طرح های جفت مورد بحث قرار می دهیم. در اینجا، رفتار مقیاس بندی به تغییر در تعداد  $N$  نورون هایی که در جمعیت شرکت می کنند اشاره دارد. [۴]

### ۱۲۰. الگوی ارتباط کامل

ساده ترین الگوی ارتباط، اتصال همه به همه در یک جمعیت است. همه اتصالات وزن یکسانی دارند. اگر بخواهیم تعداد  $N$  نورون ها را در شبیه سازی یک جمعیت تغییر دهیم، یک فرمول مقیاس بندی مناسب، فرمول  $\frac{j_0}{N} = w_{ij}$  است.

این فرمول مقیاس بندی یک انتزاع ریاضی است که ما را قادر می سازد تا به طور فرمال حد  $\lim_{N \rightarrow \infty}$  را بگیریم و در عین حال ورودی مورد انتظاری را که یک نورون از نورون های پیش سیناپسی خود در جمعیت دریافت می کند ثابت نگه داریم. در حد حد  $\lim_{N \rightarrow \infty}$ ، نوسانات ناپدید می شوند و ورودی مورد انتظار را می توان به عنوان ورودی واقعی هر یک از نورون های  $N$  در نظر گرفت. البته جمعیت های واقعی اندازه محدودی دارند، به طوری که همیشه برخی از نوسانات باقی می ماند. اما با افزایش  $N$  نوسانات کاهش می یابد. [۴] حال به شبیه سازی و بررسی این ارتباط می پردازیم. در این قسمت، یکبار برای یک جمعیت و یکبار برای دو جمعیت، آزمایش هایمان را انجام می دهیم. از آنجا که تاثیر برخی پارامتر ها را در بخش قبل انجام دادیم، در این قسمت بیشتر روی آزمایش پارامتر های خود سیناپس ها تمرکز می شویم.

#### بررسی رفتار یک جمعیت

برای بررسی رفتار روی یک جمعیت، کافی است که یک جمعیت نورونی به همراه سیناپس داخل آن تشکیل داده و آن را شبیه سازی کنیم. از آنجا که در بخش اول، تاثیر جریان نویز دار و همچنین اختلاف پتانسیل اولیه در آورده شده است، از بررسی دوباره آن ها در اینجا خودداری می شود و پارامتر های خود سیناپس مورد تحلیل قرار میگیرد. از این رو، برای شروع، یک جمعیت نورونی با مدل (Leaky-integrate-and-fire)  $LIF$  <sup>۱۱</sup> با پارامتر های  $10 = \tau$ ،  $-65 = u_{reset}$ ،  $-70 = u_{rest}$ ،  $1.7 = R$ ،  $normal(-67, 10) = u_{init}$  و  $6 = \sigma$  جریان ثابت نویزدار میسازیم.

پارامتر  $j_0$  در ابتدا تاثیر پارامتر  $j_0$  را بر روی رفتار تحلیل میکنیم. برای این منظور، سه مقدار  $5 = j_0$ ،  $25 = j_0$ ،  $75 = j_0$  را شبیه سازی میکنیم. همچنین پارامتر واریانس را  $0.25 = \sigma$  میگیریم. از آنجا که فرمول موردنیاز برای واریانس به طور کامل برای هر سه مدل شرح داده نشده بود، به طور کلی برای سه مدل، این پارامتر در مقدار میانگین نهایی (فرمول  $\frac{j_0}{N}$ ) ضرب شده و مقدار واریانس در توزیع  $normal(\mu, \sigma)$  را می سازد. همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده میکنیم، با افزایش  $j_0$  میزان نوسانات کاهش می یابد. تحلیل من از این اتفاق این است که با زیاد شدن مقدار وزن های سیناپسی در یک جمعیت نورونی، بعد از ضربه زدن نورون های یک جمعیت، مقدار جریان حاصل از سیناپس نیز افزایش یافته، و در لحظه بعدی نورون ها جریان بیشتری دریافت کرده و در نتیجه سریع تر ضربه میزند. از آنجا که سرعت ضربه زدن آن ها افزایش می یابد، تفاوت اختلاف پتانسیل متفاوتی که در مقدار دهی اولیه به آن ها داده شده بود نیز رفته کمتر شده و پس از مدتی زمان ضربه زدن نورون ها نزدیک به یکدیگر می شود. علاوه بر کم شدن پراکندگی لحظات ضربه ها، میبینیم که در نمودار سمت راست، نورون ها تعداد ضربه های بیشتری نیز در کل زده اند.

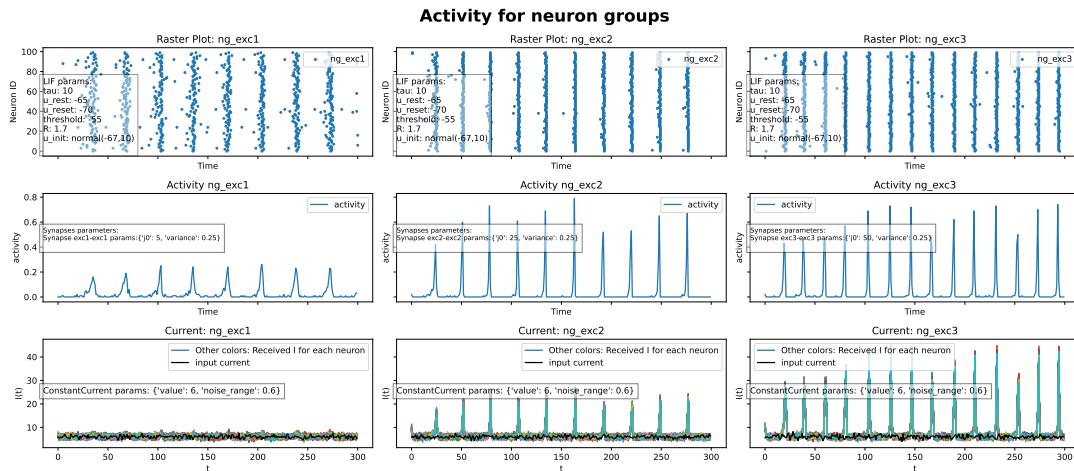
حال به جمعیت نورونی مان، یک جریان تصادفی میدهیم تا رفتار شبیه به نورون واقعی را بیشتر بررسی کنیم. مجددا در شکل ۲۱ مشاهده میکنیم که تصادفی بودن جریان، منجر به پراکندگی زمان ضربه زدن نورون ها می شود و به طور کلی فعالیت آن ها را کاهش داده است، اما با زیاد کردن وزن های سیناپسی، این نوسانات کمتر شده به طور که در نمودار سمت راست، میتوانیم زمان ضربه زدن نورون ها را در سطون هایی دسته بندی کنیم.

Full connectivity<sup>۸</sup>

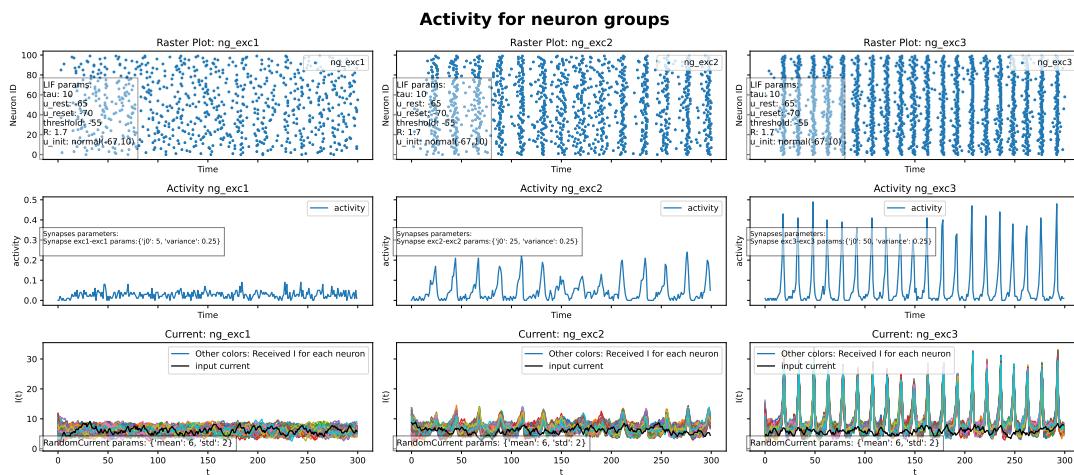
Random coupling: Fixed coupling probability<sup>۹</sup>

Random coupling: Fixed number of presynaptic partners<sup>۱۰</sup>

<sup>۱۱</sup> مدل تجمعی و آتش نشانی



شکل ۲۰: رفتار یک جماعت نورونی با مقادیر  $j_0$  مختلف و جریان ثابت نویز دار



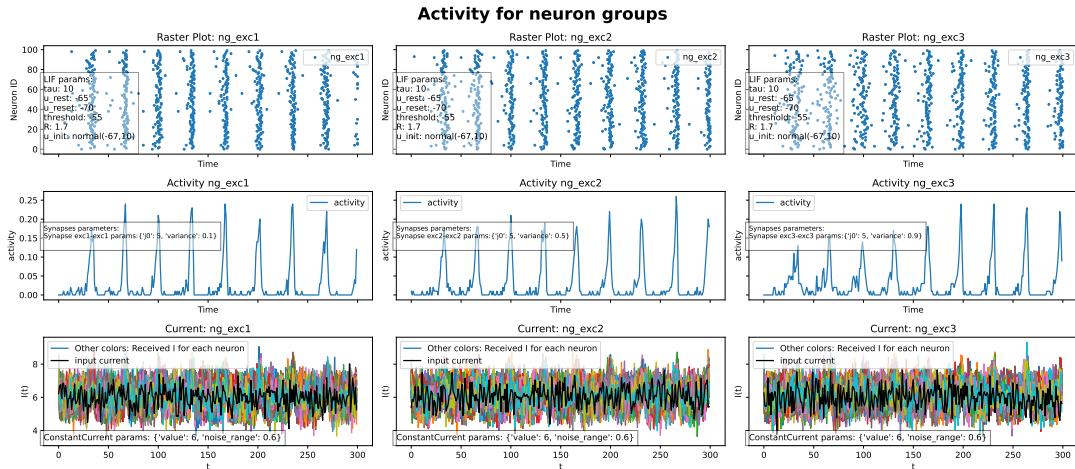
شکل ۲۱: رفتار یک جماعت نورونی با مقادیر  $j_0$  مختلف و جریان تصادفی

**پارامتر واریانس** حال رفتار جماعت را به ازای مقادیر مختلف واریانس تحلیل میکنیم. برای این قسمت نیز از همان مدل نورونی بالا استفاده میکنیم. از آنجا که الگوی ارتباطی مان کامل است، انتظار داریم که تغییر معقول واریانس تقاضوت زیادی در رفتار کلی نورون ها ایجاد نکند، چرا که هر نورون با تمام نورون های دیگر ارتباط دارد و از این رو برآیند جریان سناپسی وارد شده به نورون ها نزدیک به هم می باشد. شکل ۲۲ بیانگر همین موضوع است. هر چند تغییرات کوچکی میتواند رخ دهد. مثلا در نومادر سمت راست که واریانس برابر با خود میانگین دارد (گفته شده که به عنوان واریانس به مدل ورودی داده می شود در میانگین ضرب شده و سپس تشکیل واریانس اصلی توزیع را می دهد)، میزان فعالیت کلی نورون ها کمی از دو مدل دیگر بیشتر است.

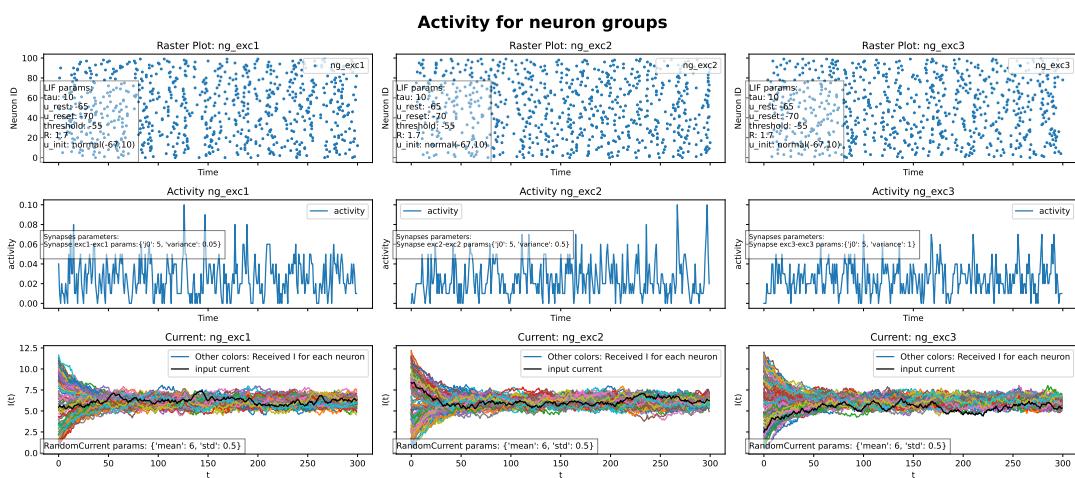
حال رفتار را با یک جریان تصادفی آزمایش می کنیم: در جریان تصادفی نیز مطابق شکل ۲۲ دریافت می شود که تغییر واریانس تاثیر چندانی بر روی رفتار جماعت ندارد. به طور کلی میتوان این نتیجه را گرفت که در الگوی ارتباط کامل با جریان غیر ثابت، به دلیل اینکه همه نورون ها با یکدیگر در ارتباط هستند، افزودن واریانس به وزن ها نمیتواند روی جریان تصادفی تاثیر بگذارد.

**اندازه جماعت** خالی از لطف نیست که تاثیر اندازه جماعت را روی رفتار آن بررسی میکنیم. برای اینکار سه جماعت نورونی به اندازه های  $50 \times 50$  و  $100 \times 100$  را بررسی میکنیم تا بینیم اندازه چه تاثیری روی رفتار جماعت دارد. طبق شکل ۲۴ مشاهده می کنیم که اگر مدل نورون ها و جریان را یکی پگیریم، برای جماعت با اندازه های متفاوت، فعالیت نورونی تغییری نکرده و مستقل از اندازه جماعت است.

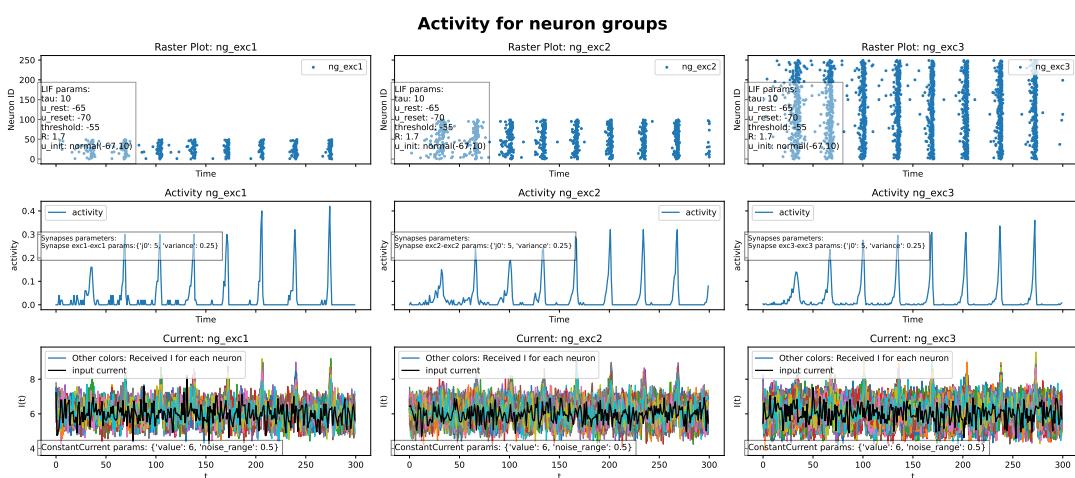
**مدل های نورونی** در نهایت نیز به سراغ بررسی تاثیر انتخاب مدل نورونی روی رفتار جماعت میرویم. همانطور که از شکل ۲۵ پیداست، رفتار مدل نورونی *LIF* و *ELIF* شبیه یکدیگر است در حالی که در مدل *AELIF* با گذر زمان، فعالیت نورونی کاهش یافته و به مقدار کمتری همگرا می شود. هر چند من خیلی هنگام پیاده سازی روی قسمت های ۲ مدل دیگر مانور ندادم و ممکن است دقیق نباشد.



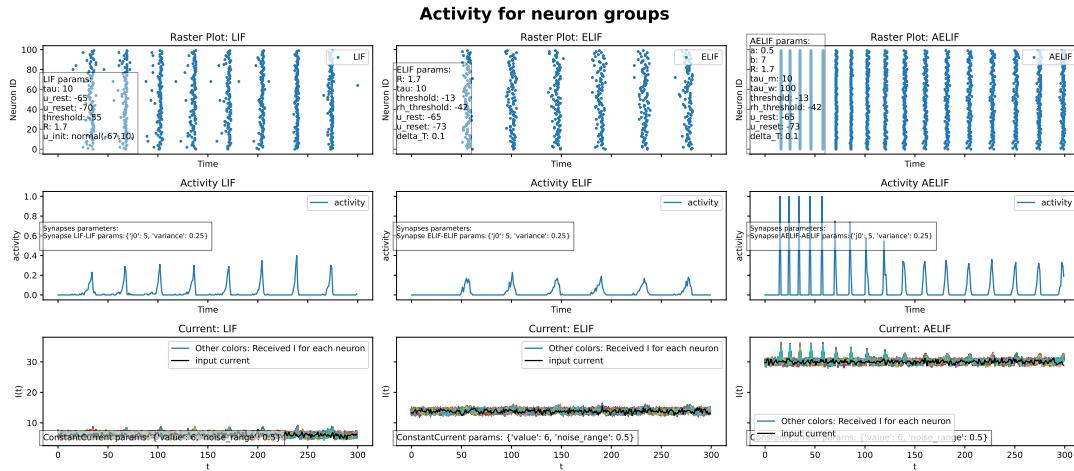
شکل ۲۲: رفتار یک جمیعت نورونی با واریانس مختلف و جریان ثابت نویزدار



شکل ۲۳: رفتار یک جمیعت نورونی با واریانس مختلف و جریان تصادفی



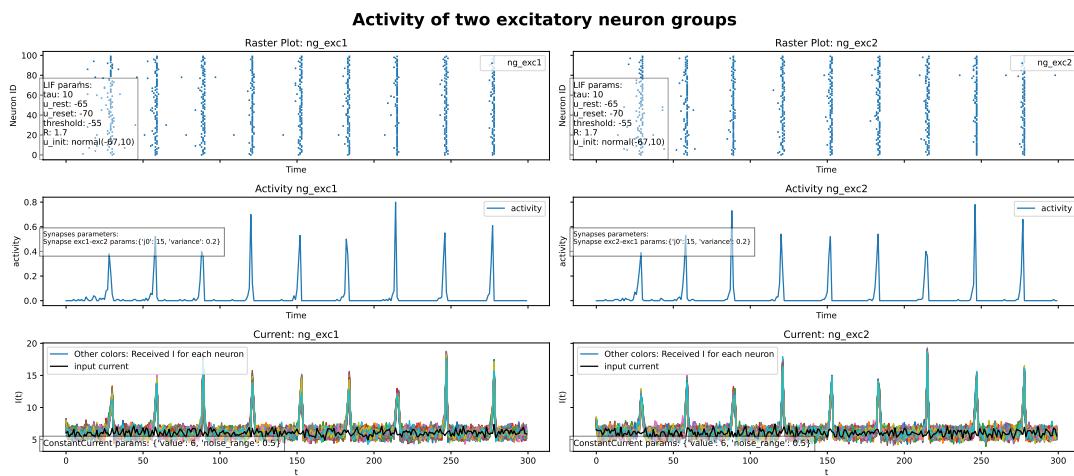
شکل ۲۴: رفتار یک جمیعت نورونی با جمیعت مختلف و جریان تصادفی



شکل ۲۵: رفتار یک جمعیت نورونی با مدل های نورونی مختلف و جریان تصادفی

### بررسی رفتار دو جمعیت

پارامتر  $\tau_f$  حال به بررسی رفتار دو جمعیت که بین آن ها سیناپس قرار دارد می پردازیم. در این بخش تاثیر دو جمعیت روی یکدیگر را بررسی میکنیم. اولین حالتی که مورد بررسی قرار می دهیم، حالتی است که دو جمعیت تحریکی هستند و فقط به یکدیگر سیناپس دارند و سیناپس داخلی بین نورون های آن ها وجود ندارد. در این حالت با نتایجی که تا الان بدست آورده ایم انتظار داریم که فعالیت دو جمعیت شبیه یک دیگر باشد که شکل ۲۶ نیز این موضوع را تایید میکند. جریان تصادفی نیز رفتار مشابهی از خود نشان می دهد. (شکل ۲۷)

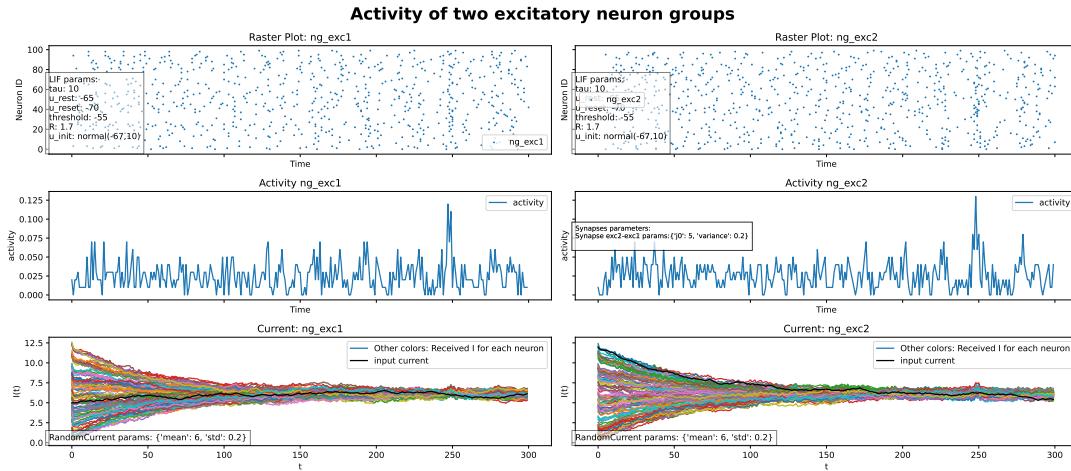


شکل ۲۶: رفتار دو جمعیت نورونی با دو سیناپس و جریان ثابت نویزی

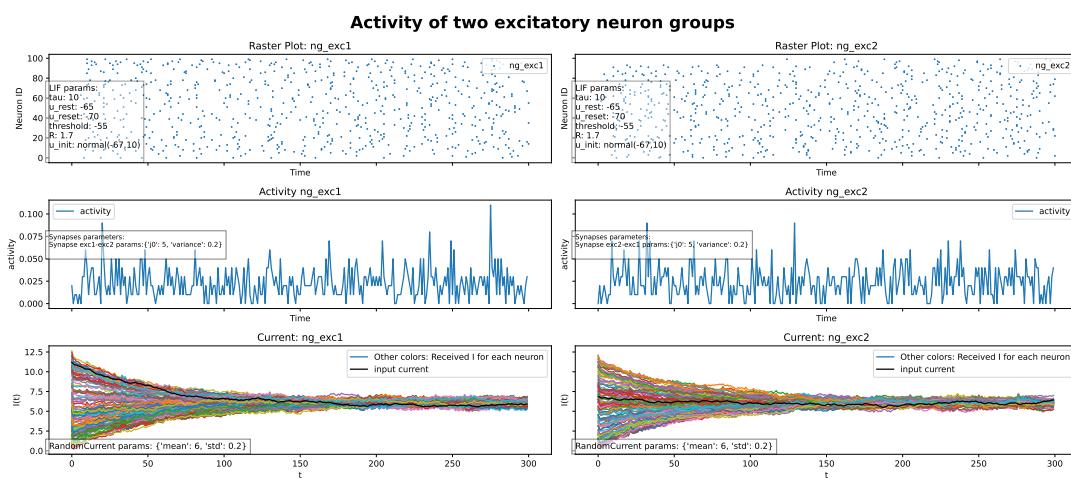
رفتار جالب دیگری که جریان تصادفی دارد، این است که در ابتدا پراکنگی زمان ضربه زدن نورون ها بسیار زیاد است و الگوی خاصی ندارد، و همچنین فعالیت نورونی کم است، اما همانطور که از نمودار پیداست، این پراکنگی رفته رفته کمتر شده و فعالیت نورونی نیز بیشتر می شود. این اتفاق تحت تاثیر این موضوع است که به دلیل وجود سیناپس بین دو جمعیت که به صورت رفت و برگشتی است، به گونه ای عمل کرده که هر نورون از تمام نورون های جمعیت دیگر جریان دریافت میکند و درنتیجه جریان دریافتی به نورون زیاد می شود و این جریان زیاد باعث شود تا پس از مدتی زمان ضربه زدن نورون ها به یکدیگر نزدیک شود.

حال اگر مقدار  $\tau_f$  را در هر ۲ سیناپس کاهش دهیم چه اتفاقی می افتد؟ شکل ۲۸ به این سوال پاسخ می دهد و بیان می کند که کاهش مقدار  $\tau_f$  باعث می شود تا جریان سیناپسی نتواند آنقدر زیاد شود که در زمان قبلی پراکنگی فعالیت نورون ها را کمتر کند و فعالیت جمعیت به صورت یک نمودار تصادفی با مقدار کم باقی می ماند. (این نکته در بخش های بعدی به کارمان می آید.)

حال مقدار وزن های سیناپس بین جمعیت ۱ به جمعیت ۲ را افزایش میدهیم تا بینینم با  $\tau_f$  متفاوت رفتار آن ها چه تغییری میکند. طبق شکل ۲۹ مشاهده میکنیم که فعالیت هر دو جمعیت بیشتر شده ولی جمعیت ۲ در کل فعالیت بیشتری دارد. مشابه این رفتار را در بخش اول دیدیم، هنگامی که تنها یک سیناپس از جمعیتی به جمعیت دیگر داشتیم و جمعیت پس سیناپسی فعالیت بیشتری داشت. در اینجا نیز گویا همین



شکل ۲۷: رفتار دو جمیعت نورونی با دو سیناپس و جریان تصادفی

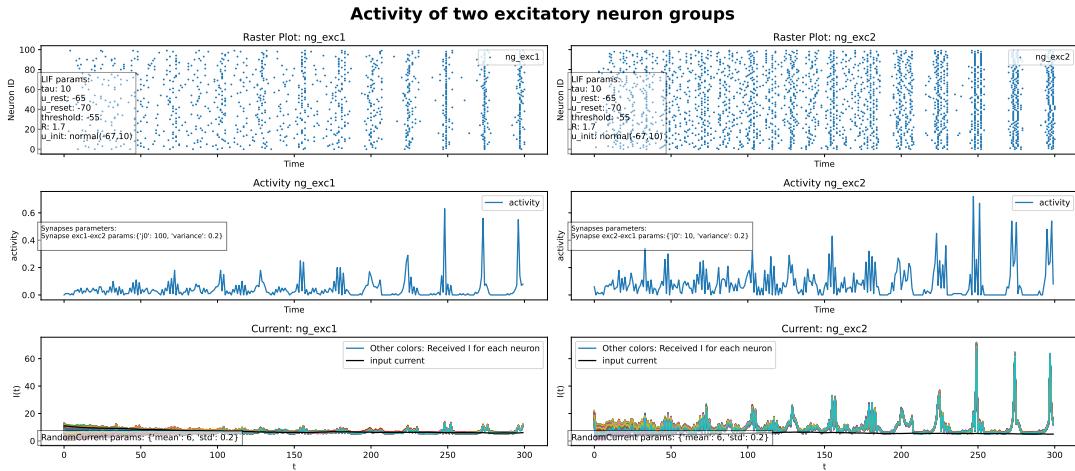


شکل ۲۸: رفتار دو جمیعت نورونی با دو سیناپس و جریان تصادفی و وزن

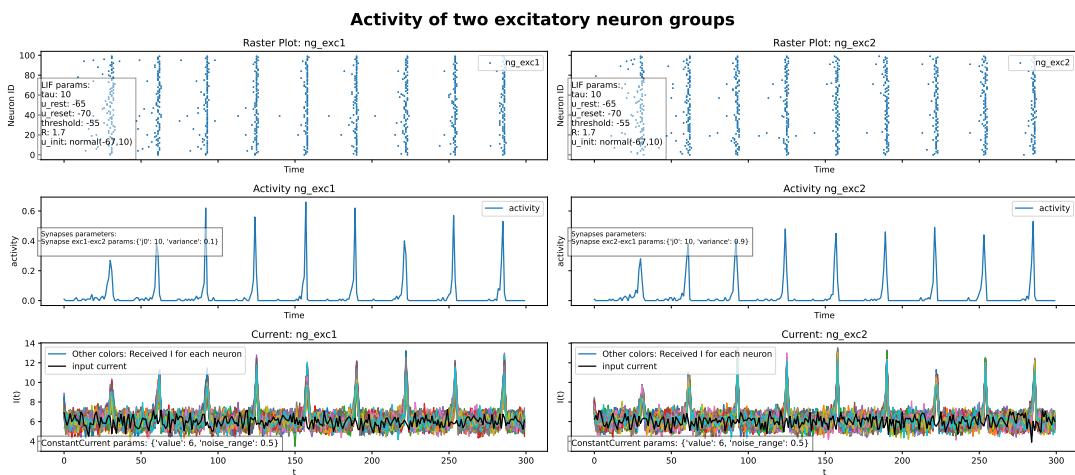
اتفاق می افتد. بیشتر شدن وزن های سیناپس ۱ به ۲ باعث می شود که جمیعت ۲ بیشتر ضربه بزند و درنتیجه فعالیت آن بیشتر شود، این بیشتر شدن فعالیت خود باعث می شود که جریان سیناپس ۲ به ۱ نیز بیشتر شده و فعالیت جمیعت ۱ نیز بیشتر شود. اما در کل از آنجا که وزن های سیناپسی جمیعت ۱ به ۲ بیشتر است، فعالیت جمیعت ۲ بیشتر از ۱ میماند.

**پارامتر واریانس** حال با وزن های برابر با شکل ۲۶ مقادیر واریانس را افزایش داده و آن را تحلیل میکیم. همانطور که در شکل ۳۰ مشاهده می شود، افزایش واریانس به علت مشابهی که قبل تر نتیجه گرفته شد، تعییر چندانی در رفتار نورون با جریان نمی کند. مجددًا مقدار واریانس ها را متفاوت در نظر میگیریم و طبق شکل ۳۱ مشاهده می شود که با واریانس متفاوت نیز تعیییری در رفتار نورون ها اتفاق نمی افتد. طبعاً نتیجه برای جریان تصادفی نیز به همین صورت است. همانطور که پیشتر گفته شد، اگر بخواهیم واریانس را به گونه ای تعییر دهیم که تاثیر قابل نمایش داشته باشد، باید مقدار آن را زیادتر، مثلاً  $100 \times 100$  بگیریم. مطابق شکل ۳۲ تاثیر این مقدار نمایان است. این به این دلیل است که با خیلی زیاد شدن واریانس، بسیاری از وزن ها نیز آنقدر زیاد می شوند که تاثیر مجموع آن ها روی نورون های پس سیناپسی مشهود می شود.

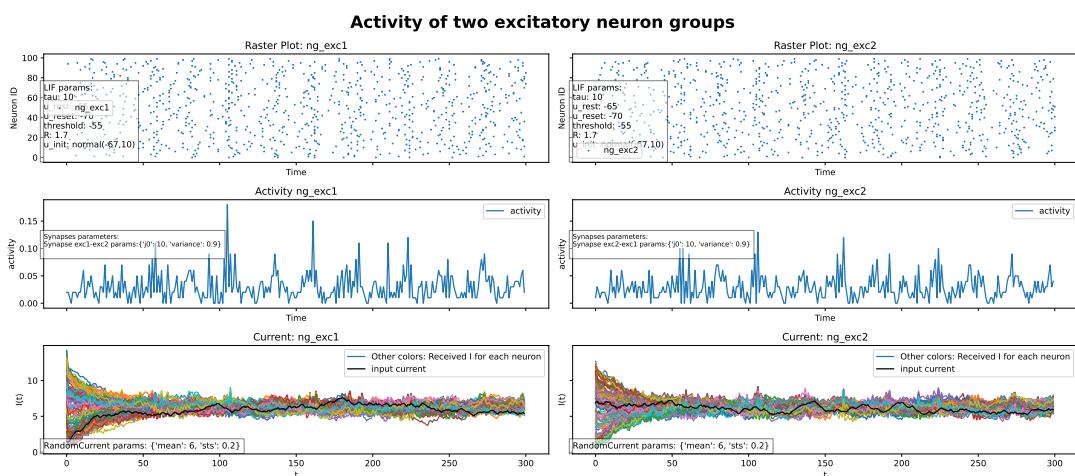
**تاثیر اندازه جمیعت** از آنجا که تنها دو جمیعت نورونی داریم، زیاد کردن هر دو جمیعت تاثیری مشابه تک جمیعت خواهد داشت، در نتیجه فقط حالتی را که یک جمیعت بزرگتر از دیگری است را آزمایش میکنیم. در این حالت نیز مشابه حالت های قبل میبینیم که فعالیت هر دو جمیعت پس از مدتی بیشتر می شود. هر چند میزان رشد جمیعت بزرگتر اندکی از جمیعت کوچکتر بیشتر است. (شکل ۳۳)



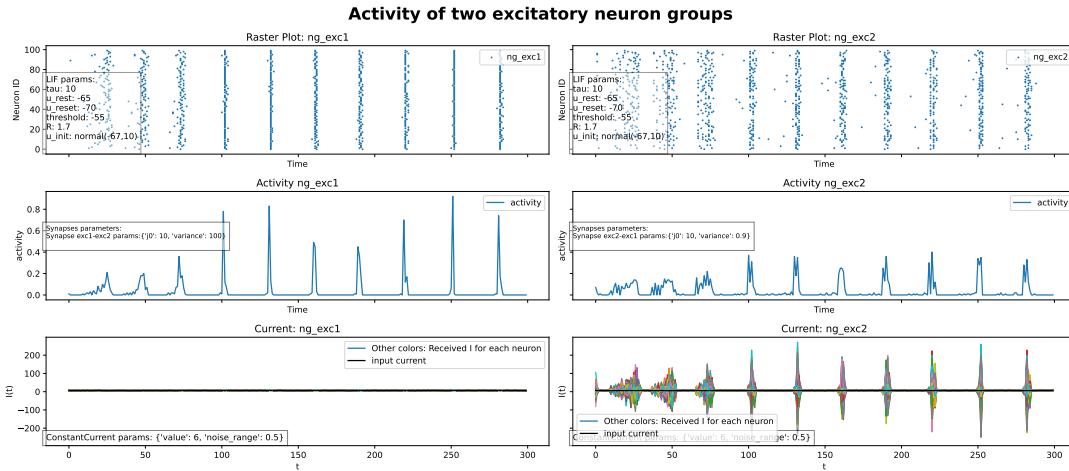
شکل ۲۹: رفتار دو جمیعت نورونی با دو سیناپس و جریان تصادفی و  $\sigma_0$  متفاوت



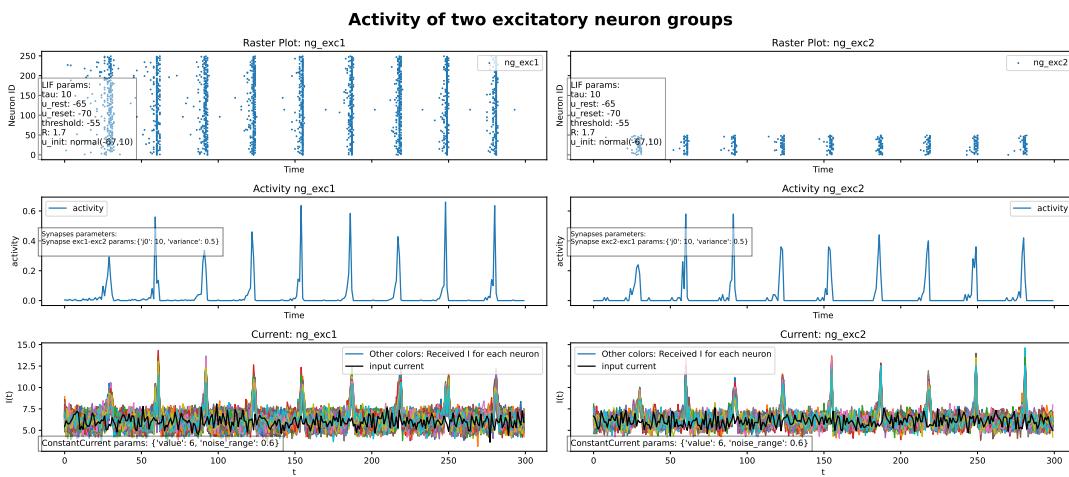
شکل ۳۰: رفتار دو جمیعت نورونی با دو سیناپس و جریان نویزی و واریانس زیاد



شکل ۳۱: رفتار دو جمیعت نورونی با دو سیناپس و جریان نویزی و واریانس متفاوت



شکل ۳۲: رفتار دو جمیعت نورونی با دو سیناپس و جریان نویزی و واریانس بسیار زیاد



شکل ۳۳: رفتار دو جمیعت نورونی با دو سیناپس و جریان نویزی و جمیعت متفاوت

## ۲.۲.۰ الگوی ارتباط تصادفی با احتمال جفت شدن ثابت

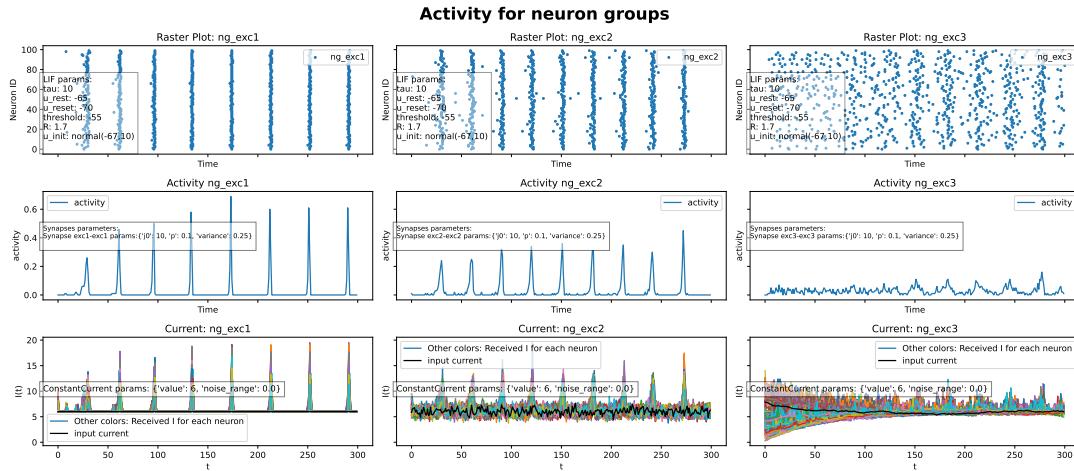
در این قسمت به بررسی رفتار الگوی ارتباط تصادفی با احتمال جفت شدن ثابت می پردازیم. از نظر تجربی، احتمال  $p$  که یک نورون در داخل یک ستون قشر مغز، یک اتصال عملکردی به نورون دیگری در همان ستون برقرار کند، در محدوده  $10 \times 10$  درصد است، هرچند این مقدار در بین لایه‌ها متفاوت است.

در شبیه‌سازی‌ها، می‌توانیم یک احتمال اتصال  $p$  را برای کنیم و اتصالات را به طور تصادفی با احتمال  $p$  از بین تمام اتصالات  $N^2$  ممکن انتخاب کنیم. در این مورد، تعداد اتصال‌های ورودی پیش سیناپسی  $C_j$  به یک نورون پس سیناپسی  $j$  دارای مقدار میانگین  $\langle C_j \rangle = pN$  ممکن است، اما بین یک نورون و نورون بعدی با واریانس  $N(p(1-p))$  در نوسان است.

تا اینجا کار تاثیر بسیاری از پارامترهایی که بررسی کردم شبیه تاثیر پارامترهای مشابه این الگو است. از این رو در این بخش تمرکزمان را روی پارامترهایی میگذاریم که تاثیر متفاوت تری نسبت به حالت قبل دارند. در اینجا نیز مدل نورونی را مانند مدل‌های قبل در نظر میگیریم.

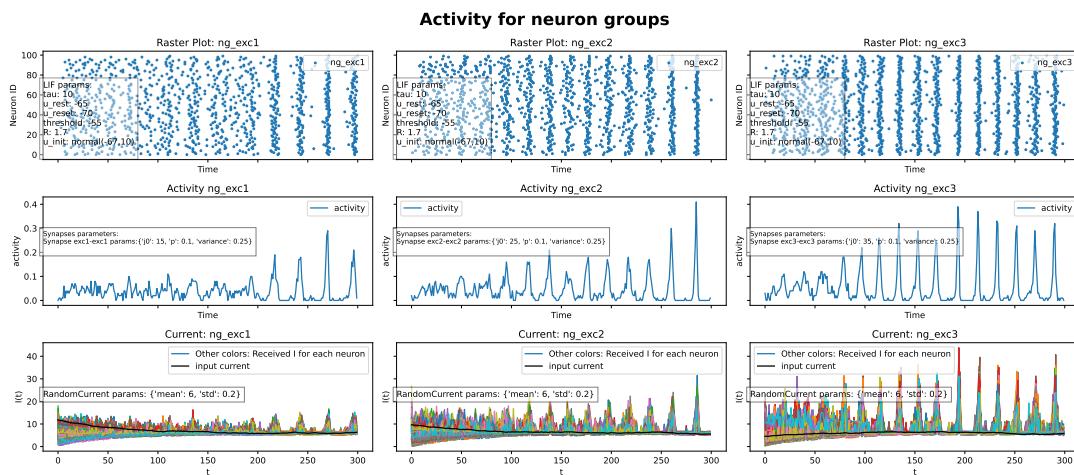
### بررسی رفتار یک جمیعت

برای شروع کار، باید رفتار یک جمیعت را با جریان ثابت، نویزی و تصادفی بررسی کنیم. همانطور که از شکل ۳۴ بر می‌آید، رفتار نورون همانند الگوی ارتباط قبلی بوده و پس از مدتی، پراکنده‌ی زمان ضربه زدن نورون‌ها کمتر شده و فعالیت رفته بیشتر می‌شود و این بیشتر شدن به ترتیب نمودارها از سمت چپ به راست سرعت کمتری دارد. دلیل این امر نیز مشابه الگوهای قبل، زیاد شدن جریان سیناپسی است. حال به سراغ آزمایش پارامترها میرویم. پارامتر  $z$  تاثیری مشابه الگوی قبلی دارد و خیلی روی آن تمرکز نمیکنیم



شکل ۳۴: رفتار تک جمعیت های نورونی با سیناپس داخلی و جریان ثابت، نویزی و تصادفی

پارامتر  $j$  همانطور که در شکل ۳۵ مشاهده می شود، افزایش مقدار  $j$  باعث کاهش پراکندگی زمان ضربه زدن نورون ها و افزایش فعالیت جمعیت می شود. همانطور که از شکل نیز بر می آید، دلیل این امر مانند الگوی گذشته، افزایش جریان سیناپسی و درنتیجه افزایش فعالیت جمعیت است.

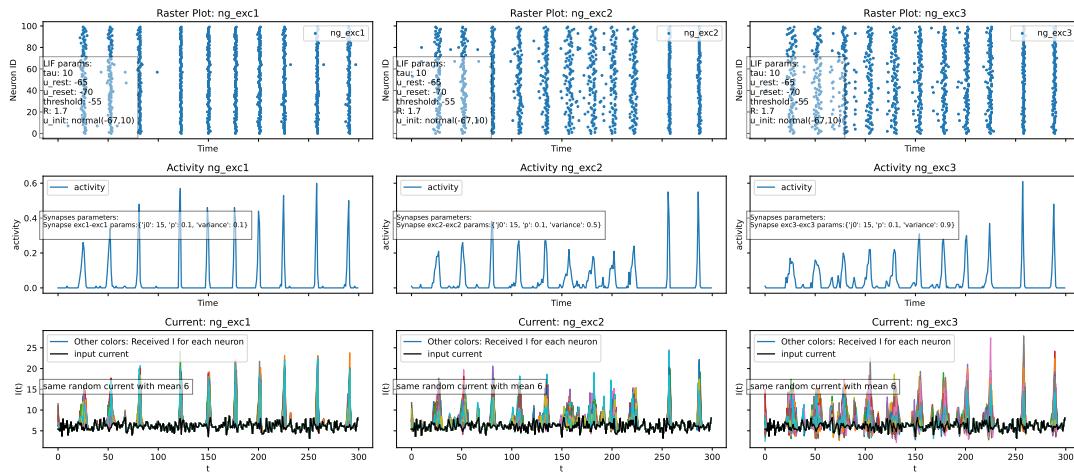


شکل ۳۵: رفتار تک جمعیت های نورونی با سیناپس داخلی و جریان تصادفی  $j$  متفاوت

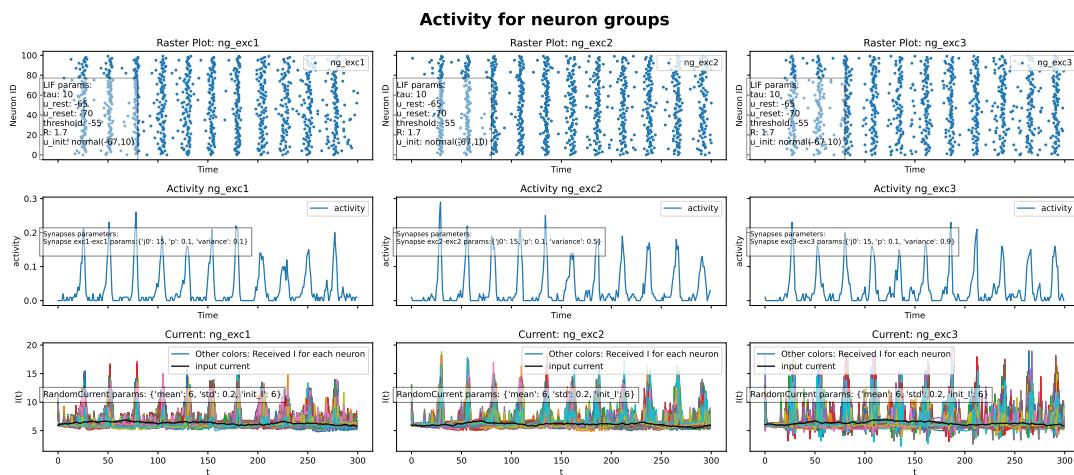
پارامتر واریانس برای درک بهتر تاثیر این پارامتر، ابتدا یک جریان تصادفی ولی یکسان برای همه نورون ها به جمعیت میدهیم. در این الگو طبق شکل ۳۶ ملاحظه میکنیم که تغییر در واریانس میتواند مقدار رفتار جمعیت را تغییر دهد. بدین صورت که با افزایش واریانس از ۰.۲ تا ۰.۶ وزن های اولیه، باعث می شود فعالیت جمعیت کاهش یابد. اگر آزمایش را با همین پارامتر ها ولی با جریان تصادفی غیر یکسان اجرا کنیم، میبینیم که تاثیر واریانس کمترگ تر می شود. (شکل ۳۷)

پارامتر  $p$  حال نوبت به پارامتر جدید این الگو می رسد. این پارامتر بیان می دارد که هر نورون با چه احتمالی با نورون های دیگر در ارتباط باشد. در آزمایش اول نیز همانند قبل، ابتدا جمعیت را با جریان تصادفی یکسان آزمایش میکنیم. طبق شکل ۳۸ مشاهده می شود که با افزایش  $p$  فعالیت جمعیت نیز افزایش می یابد، این به این دلیل می تواند باشد که افزایش  $p$  سبب افزایش ارتباطات و درنتیجه افزایش جریان سیناپسی و در نهایت افزایش فعالیت نورونی شود. تکرار آزمایش ثابت نویزی نیز نتیجه ای مشابه به ما میدهد. (شکل ۳۹)

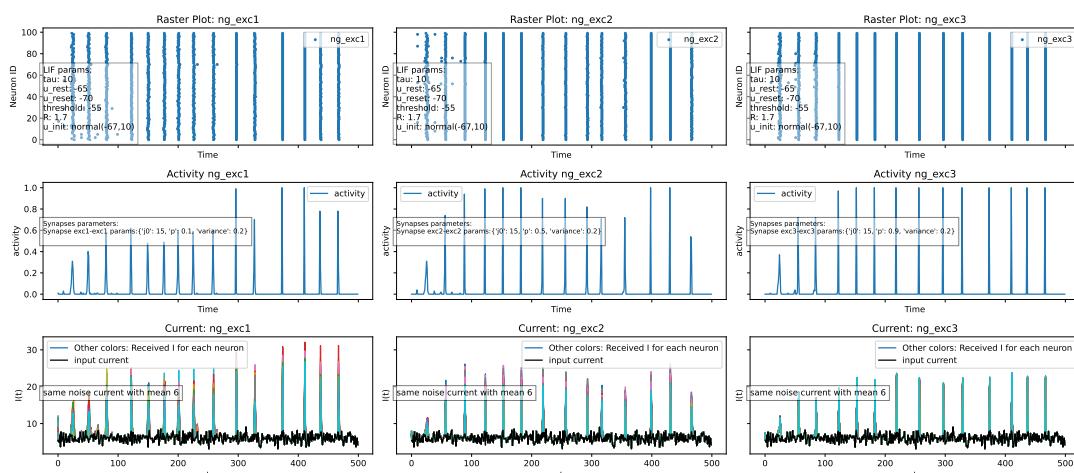
اگر جریان ورودی تصادفی غیر یکسان را در نظر بگیریم، مشاهده میکنیم که هر چند تاثیر این تفاوت کمترگ تر می شود ولی هنوز می توان افزایش کلی فعالیت جمعیت در طول شبیه سازی را مشاهده کرد. (شکل ۴۰)



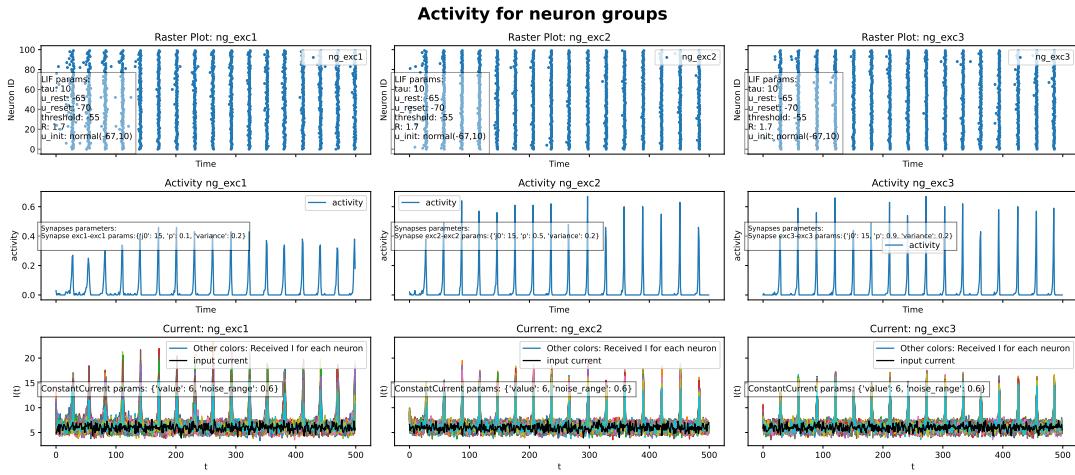
شکل ۳۶: رفتار تک جمیعت های نورونی با سیناپس داخلی و جریان تصادفی یکسان و واریانس متفاوت



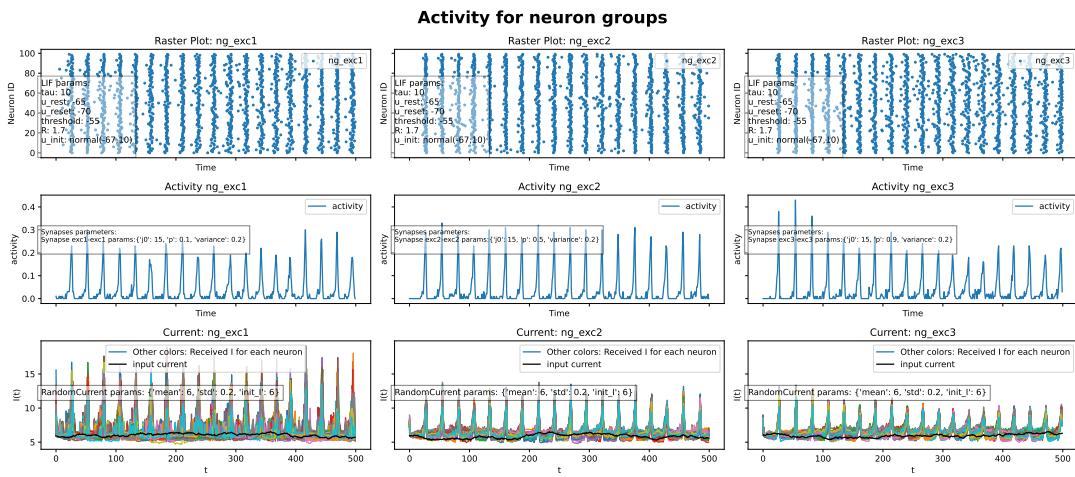
شکل ۳۷: رفتار تک جمیعت های نورونی با سیناپس داخلی و جریان تصادفی و واریانس متفاوت



شکل ۳۸: رفتار تک جمیعت های نورونی با سیناپس داخلی و جریان نویزی یکسان و  $p$  متفاوت



شکل ۳۹: رفتار تک جمیعت های نورونی با سیناپس داخلی و جریان نویزی غیر یکسان و  $p$  متفاوت



شکل ۴۰: رفتار تک جمیعت های نورونی با سیناپس داخلی و جریان تصادفی و  $p$  متفاوت

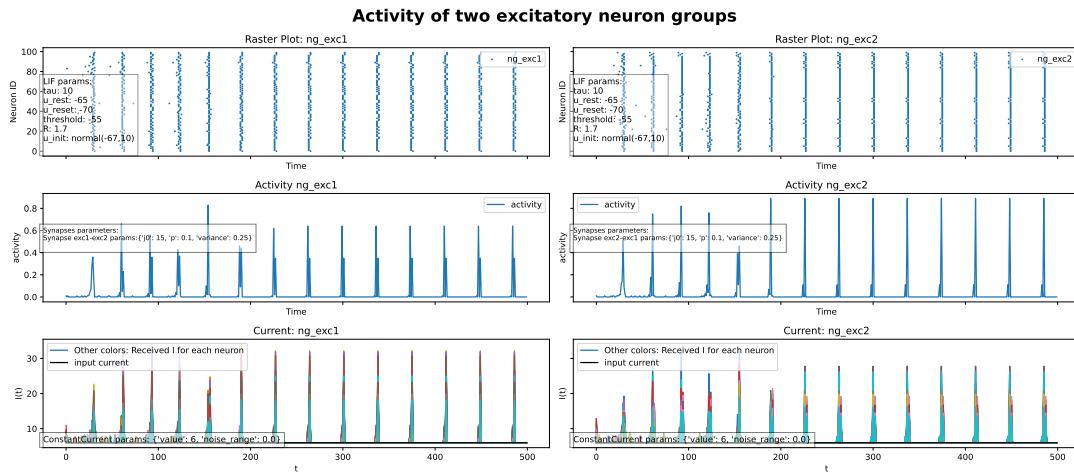
### بررسی رفتار دو جمیعت

حال نوبت به بررسی رفتار دو جمیعت نورونی با این الگوی رسد. برای شروع، ابتدا دو جمیعت نورونی ایجاد کرده و به یکدیگر سیناپس میزنیم و برای هر دو یک جریان ثابت در نظر میگیریم. اضافه کردن سیناپس داخلی برای هر یک را، به بخش سوم می سپاریم. رفتار جمیعت ها مشابه شکل ۴۱ می شود که در آن نکته جدیدی مشاهده نمیکنیم. جریان ثابت باعث ضربه زدن نورون ها می شود و در لحظه هایی که همه نورون ها در یک جمیعت ضربه می زندن، فعالیت نورونی نیز افزایش می یابد. به دلیل اینکه تاثیر سیناپس ها در یک لحظه است، این افزایش ناگهانی تاثیر چندانی روی نورون های مقصد نمیگذارد. تکرار آزمایش با جریان تصادفی نیز الگوی خاصی ندارد. (شکل ۴۲) پس به سراغ آزمایش پارامتر های مختلف می رویم.

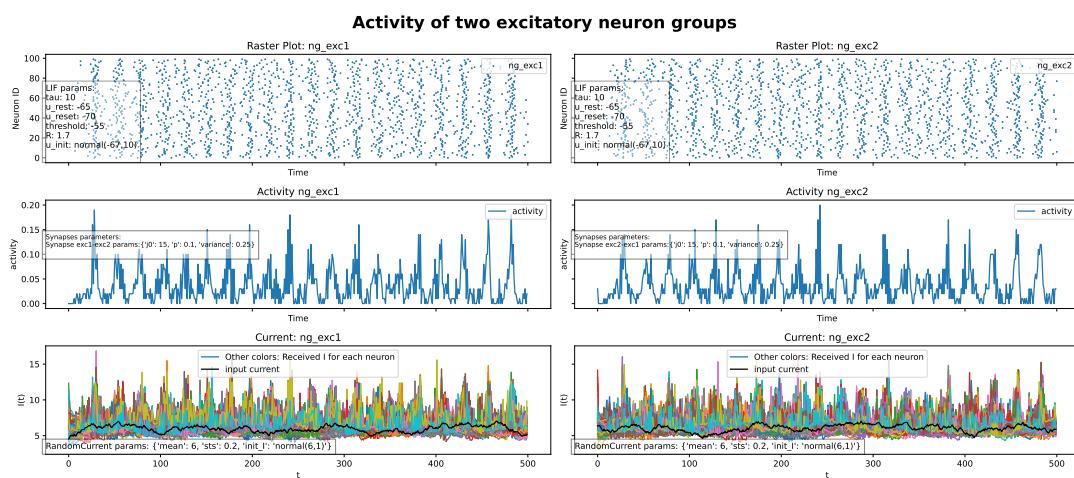
پارامتر  $z_j$  حال دو جمیعت بالا را انتخاب کرده، و تاثیر افزایش  $z_j$  را روی آن ها میبینیم. در شکل ۴۳ مشاهده میکنیم که با افزایش  $z_j$  نسبت به شکل ۴۲ فعالیت نورون ها افزایش می یابد. دلیل این امر، افزایش جریان سیناپسی و درنتیجه افزایش جریان ورودی به نورون ها است.

حال اگر وزن های سیناپسی از جمیعت ۱ به ۲ نسبت به دیگری بیشتر باشد چه اتفاقی می افتد؟ طبق شکل ۴۴ ملاحظه می شود که فعالیت هر دو جمیعت نسبت به نمودار ۴۲ افزایش می یابد و فعالیت دوم بیشتر از جمیعت اول می شود.

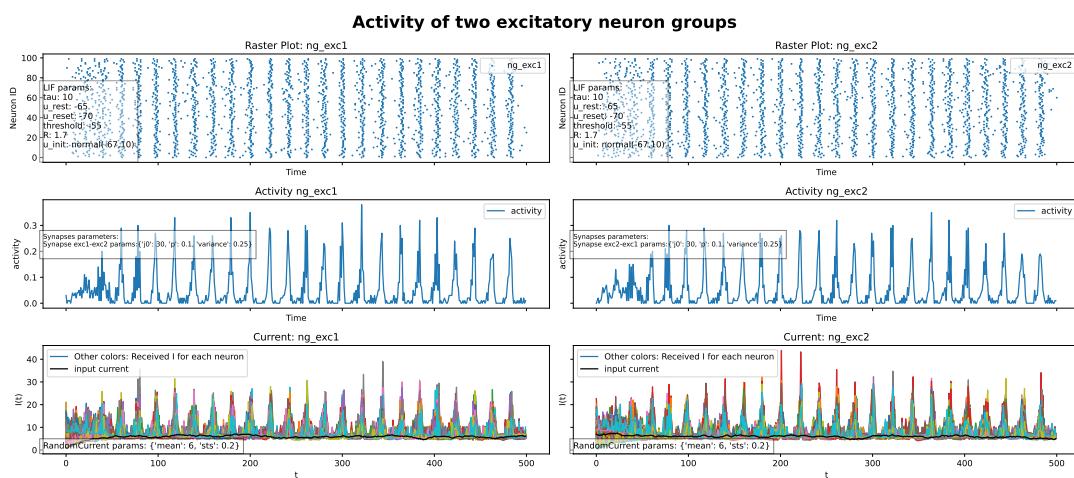
از آنجا که انتخاب جریان تصادفی یکسان نیز تاثیری مشابه دارد، از آوردن نمودار آن خودداری می شود. به طور کلی افزایش  $z_j$  باعث افزایش فعالیت جمیعت مقصد می شود. حال انتخاب جریان ثابت، نویزی، تصادفی صرفا به ترتیب میزان پراکندگی و تصادفی بودن زمان ضربه زدن نورون ها را بیشتر می کند. همچنین غیریکسان بودن جریان نورون ها نسبت به یکسان بودن نیز تاثیر مشابهی دارد.



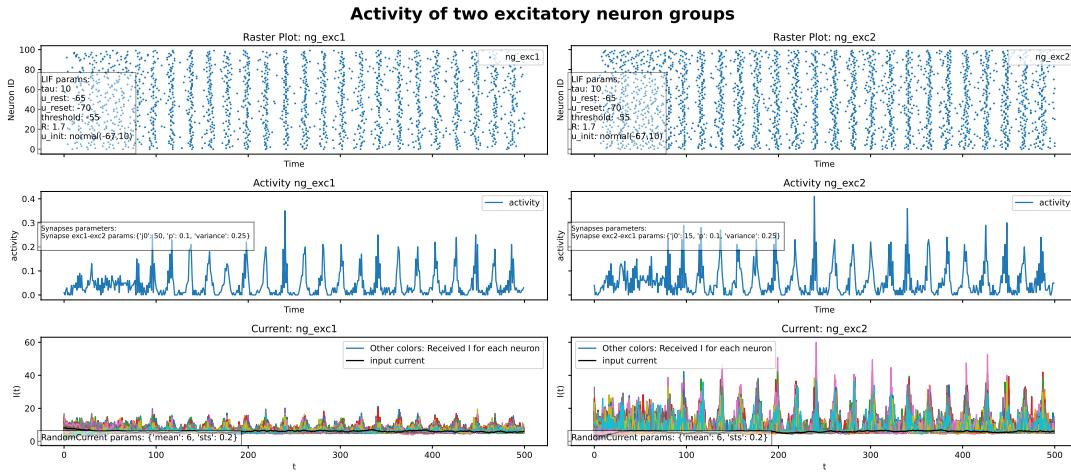
شکل ۴۱: رفتار دو جمیعت نورونی با سیناپس و جریان ثابت



شکل ۴۲: رفتار دو جمیعت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی

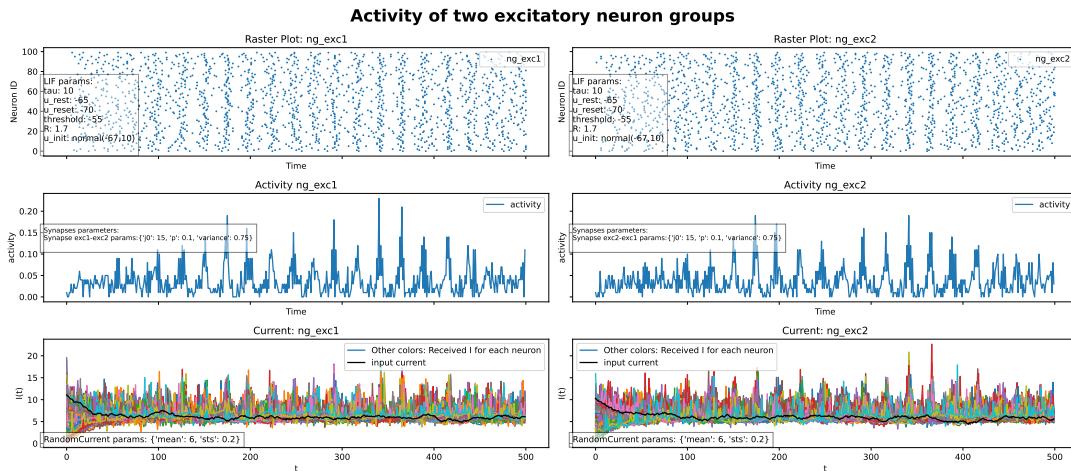


شکل ۴۳: رفتار دو جمیعت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی در اثر افزایش  $j_0$



شکل ۴۴: رفتار دو جمعیت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی در اثر تفاوت  $j_0$

**پارامتر واریانس** با افزایش واریانس هر دو سیناپس شروع می کنیم. همانطور که از شکل ۴۵ نیز بر می آید، افزایش واریانس همانند قبل، نسبت به نمودار ۴۲ تاثیر بسزایی روی رفتار کلی جمعیت ها نمیگذارد و فقط اندکی فعالیت ان ها را کاهش می دهد. این موضوع برای تفاوت



شکل ۴۵: رفتار دو جمعیت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی در اثر افزایش واریانس

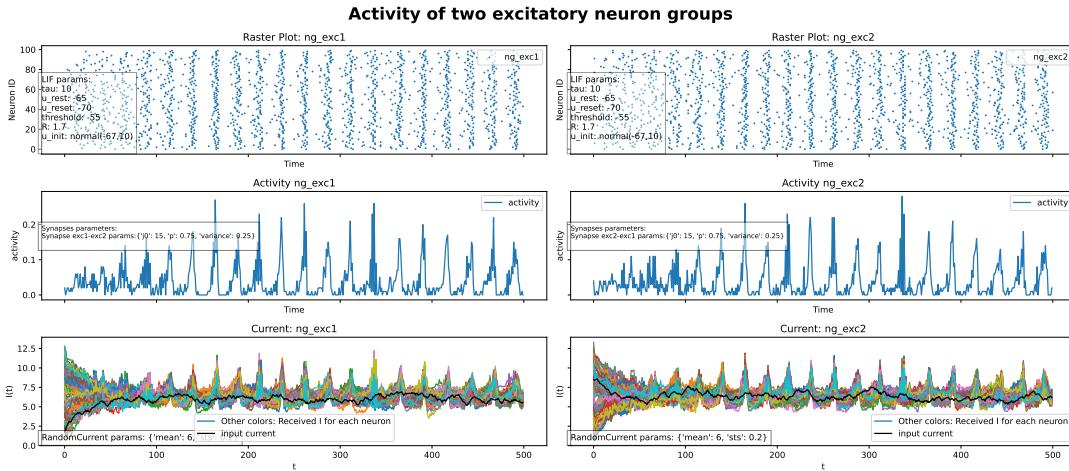
واریانس دو سیناپس نیز صدق می کند.

**پارامتر  $p$**  مجدداً به بررسی پارامتر جدید این الگو میرسیم. ابتدا آزمایش میکنیم که با افزایش این پارامتر، چه تغییری در رفتار دو جمعیت ایجاد خواهد شد. همانطور که از شکل ۴۶ بر می آید، افزایش  $p$  نسبت به شکل ۴۲ از ۰.۱ به ۰.۷۵ باعث افزایش فعالیت نسبی جمعیت ها می شود که مشابه حالت های قبل، دلیل آن افزایش جریان سیناپسی و سپس جریان دریافتی به نورون است. حال اگر مقدار پارامتر  $p$  در سیناپس جمعیت ۱ به ۰.۲ را نیز افزایش دهیم، مطابق شکل ۴۷ مشاهده میکنیم که فعالیت کلی جمعیت ها کمی افزایش یافته و فعالیت جمعیت ۲ نیز کمی بیشتر از جمعیت ۱ می شود.

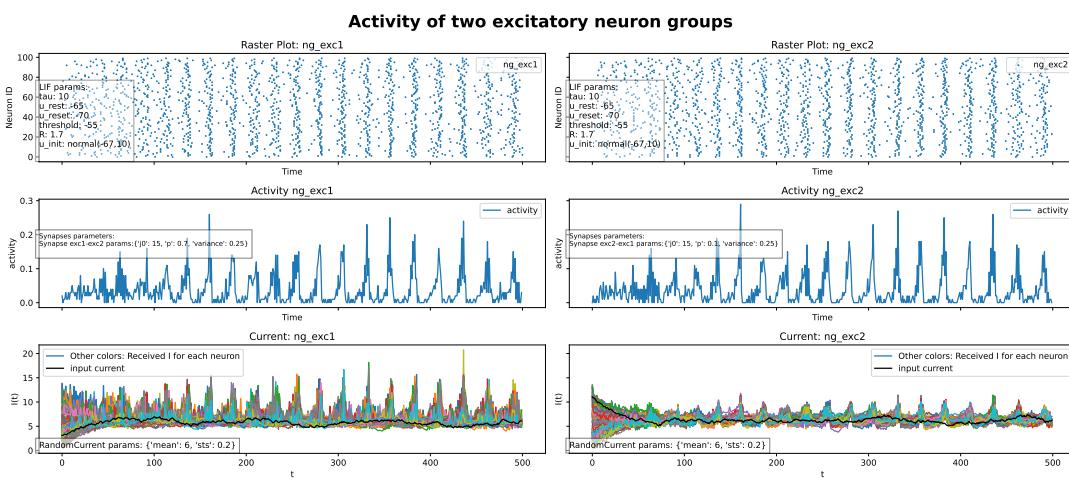
## ۳.۲۰ الگوی ارتباط تصادفی با تعداد ثابت نورون پیش سیناپسی

نوبت به آخرین الگوی ارتباطی از این بخش می رسد. در این قسمت به آزمایش ارتباط تصادفی با تعداد ثابت نورون پیش سیناپسی بین جمعیت های نورونی می پردازیم. از آنجا که این الگو شاهد با الگوی قبل دارد، تاثیر بعضی پارامتر ها مشابه یکدیگر است. در نتیجه از آوردن نمودار های تکواری جلوگیری می شود.

تعداد سیناپس ها بر روی دندریت های یک نورون هرمی منفرد در محدوده چند هزار تخمین زده می شود. بنابراین، وقتی شبکه های صد هزار نورون یا میلیون ها نورون را شبیه سازی می کنیم، رویکرد مدل سازی مبتنی بر احتمال اتصال ثابت در محدوده  $1^{\circ}$  درصد نمی تواند درست باشد.



شکل ۴۶: رفتار دو جمعیت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی در اثر افزایش  $p$



شکل ۴۷: رفتار دو جمعیت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی در اثر تقویت  $p$

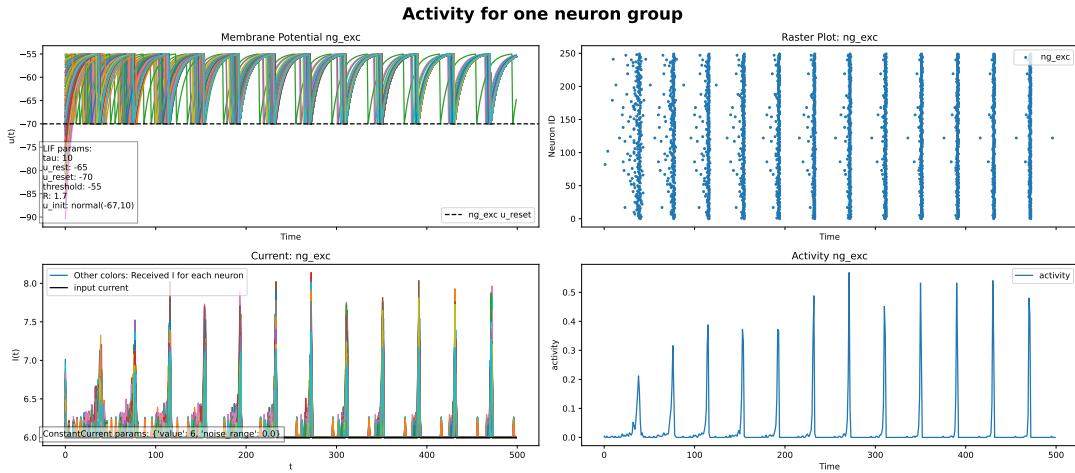
علاوه بر این، در حیوانی که در یک آزمایش شرکت می‌کند، همه نورون‌ها به طور همزمان فعال نخواهند بود. بلکه فقط چند زیرگروه فعال خواهد بود که ترکیب آنها به شرایط تحییک و وظیفه بستگی دارد. به عبارت دیگر، تعداد ورودی‌هایی که به یک نورون منفرد همگرا می‌شوند ممکن است بسیار کوچکتر از هزار باشد.

با روش زیر می‌توانیم یک شبکه تصادفی با تعداد ورودی ثابت بسازیم. ما یک نورون  $N = j$  را پس از دیگری انتخاب می‌کنیم و به طور تصادفی جفت‌های پیش سیناپسی آن را انتخاب می‌کنیم. روزمان که اندازه شبکه  $N$  بسیار بزرگتر از  $C$  باشد، ورودی‌های یک نورون معین را می‌توان به عنوان نمونه‌های تصادفی از فعالیت شبکه فعلی در نظر گرفت. بدون مقایسه بندی اتصالات با اندازه جمعیت  $N$  لازم نیست. [۴]

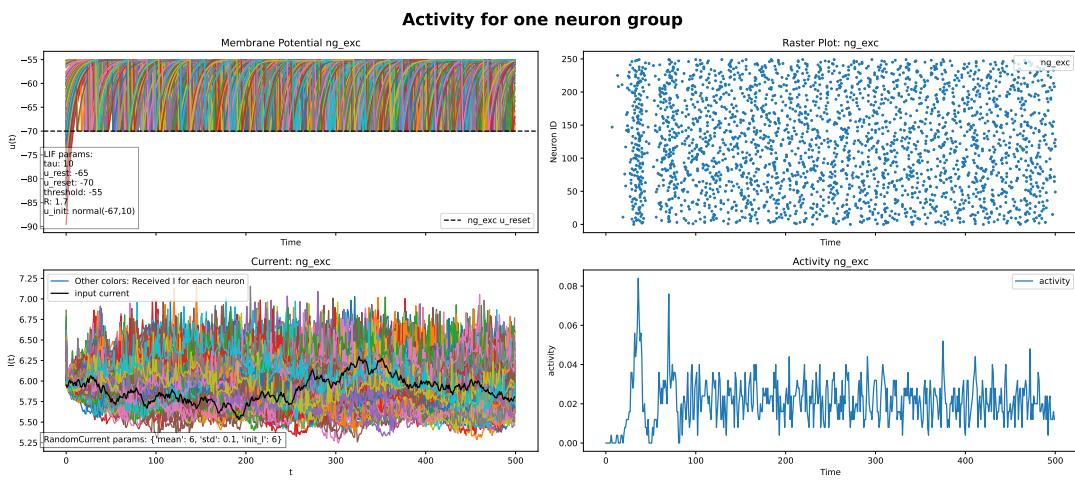
### بررسی رفتار یک جمعیت

مثل همیشه، ابتدا با یک جمعیت ساده با جریان ثابت و سیناپس داخل شروع میکنیم و سپس آزمایش‌های بعدی را با آن مقایسه می‌کنیم: (شکل ۴۸) ملاحظه میکنیم که مانند گذشته، فعالیت جمعیت به دلیل افزایش جریان سیناپسی، رفته رفته بیشتر می‌شود. نمودار با جریان تصادفی نیز در شکل ۴۹ آمده است که میبینیم پراکندگی زمان ضربه زدن نورون‌ها را حتی با نویز کم خیلی افزایش داده است.

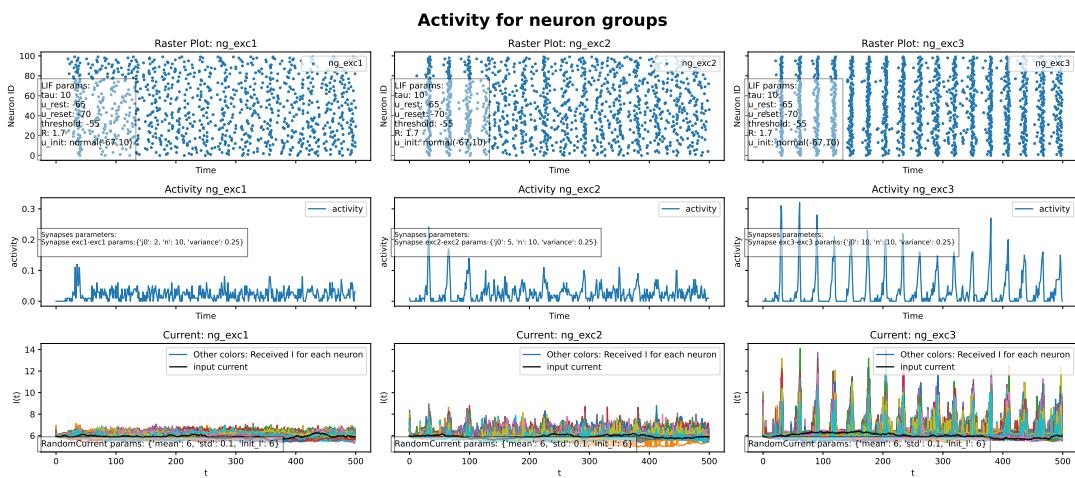
پارامتر  $j_z$  ابتدا، رفتار جمعیت را با یک جریان نویزی به ازای مقادیر مختلف  $j_z$  آزمایش میکنیم. همانطور که از شکل ۵۰ نیز برمی‌آید، افزایش  $j_z$  تاثیر زیادی روی فعالیت جمعیت گذاشته و آن را زیاد می‌کند. مجدداً دلیل این اتفاق افزایش جریان سیناپسی است. برای محاسبه افزایش این جریان، کافی است طبق فرمول داده شده، ابتدا  $j_z$  را تقسیم بر  $n$  کنیم تا وزن اولیه هر سیناپس به دست آید، که در اینجا به ترتیب  $0.2, 0.5, 1$  می‌شود. سپس هر بار تعداد نورون‌های پیش سیناپسی یک نورون که ضربه بزند، را در این مقادیر ضرب کرده



شکل ٤٨: رفتار تک جمیعت نورونی با سیناپس و جریان ثابت



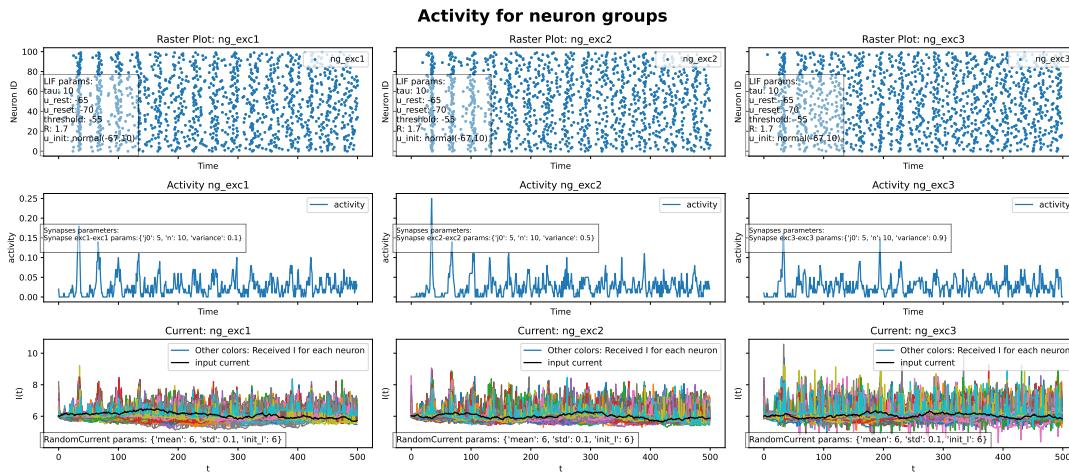
شکل ٤٩: رفتار تک جمیعت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی



شکل ٥٠: رفتار تک جمیعت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی و  $j$  متفاوت

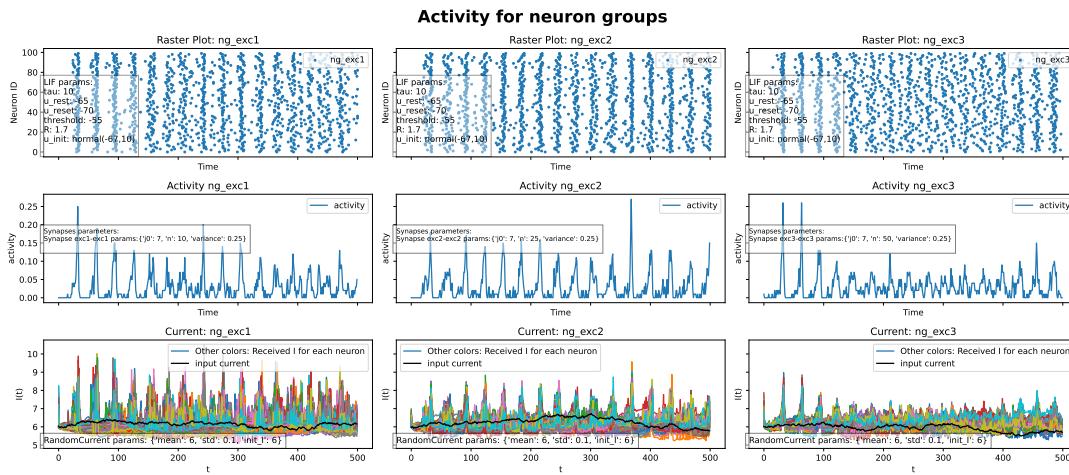
تا جریان سیناپسی حاصل را بدست آوریم. ملاحظه میکنیم که هر بار این تعداد ضربه های نورون های پیش سیناپسی زیاد بوده است، جریان دریافتی به نورون نیز زیاد شده و در نمودار به صورت قله هایی مشهود است، که این قله ها حداقل تا  $5\text{ ms}$  بالا رفته اند.

**پارامتر واریانس** همانند الگوهای گذشته، در شکل ۵۱ نیز مشاهده میکنیم که تغییر واریانس، تاثیر قابل توجهی روی رفتار جمعیت نمیگذارد و تاثیر آن مشابه قبل است.



شکل ۵۱: رفتار تک جمعیت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی و واریانس متفاوت

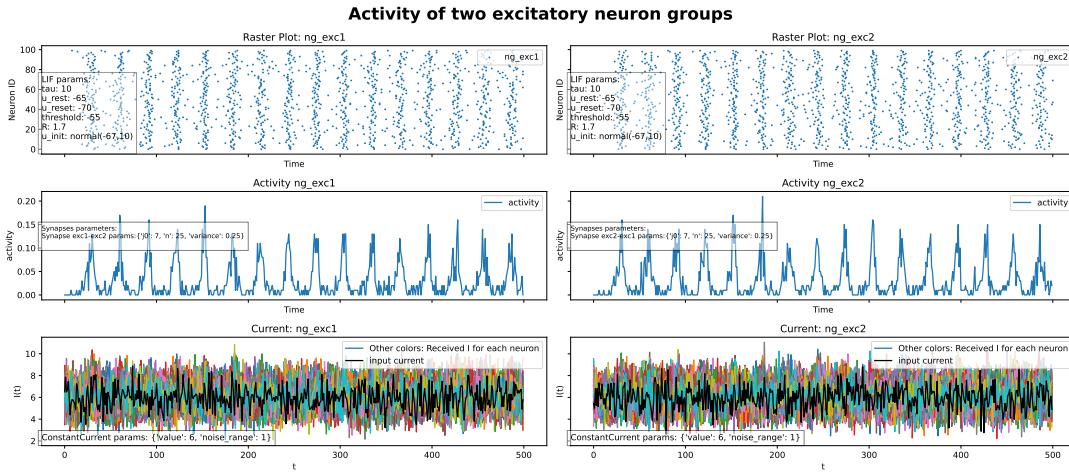
پارامتر  $n$  حال نوبت به پارامتر مخصوص این الگو می‌رسد. هرچند از انجا که این پارامتر نیز مانند پارامتر  $p$  در الگوی قبل تعیین کننده تعداد اتصالات نورونی است، انتظار داریم که تاثیر مشابهی نیز داشته باشد. شکل ۵۲ نیز این موضوع را تایید میکند. همانطور که از شکل نیز مشخص است، با افزایش  $n$  تعداد ارتباطات سیناپسی افزایش یافته، ولی جریان سیناپسی افزایش نمی‌یابد چراکه طبق فرمول گفته شده، مقدار  $5\text{ ms}$  بر  $n$  تقسیم شده و کاهش می‌یابد. از این رو یا بد تعداد نورون های بیشتری همزمان ضربه بزنند تا جریان سیناپسی زیاد شود. همچنین همانطور که استاد گفتند، بعد از مدتی زمان ضربه زدن نورون ها تقریبا مشابه یکدیگر می‌شود.



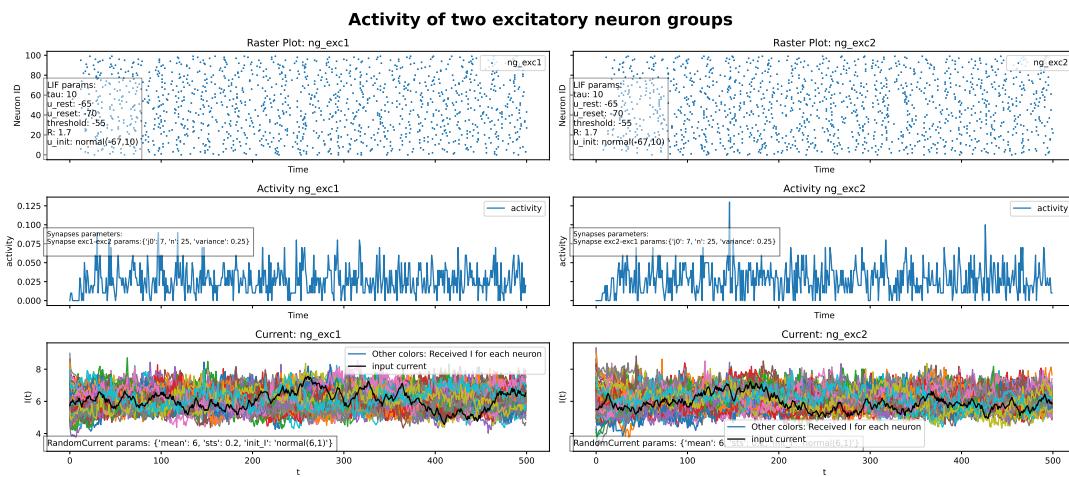
شکل ۵۲: رفتار تک جمعیت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی و  $n$  متفاوت

### بررسی رفتار دو جمعیت

به عنوان آخرین قسمت از این بخش، به بررسی رفتار دو جمعیت نورونی که به یکدیگر سیناپس دارند می‌پردازیم. مجدداً همانطور که پیش تر گفته شد، رفتار دو جمعیت هنگامی که سیناپس داخلی نیز دارند در بخش های بعدی بررسی می‌شود. مطابق همیشه، ابتدا رفتار دو جمعیت با جریان نویزی (شکل ۵۳) و جریان تصادفی (شکل ۵۴) را به عنوان مرجع مشاهده میکنیم.

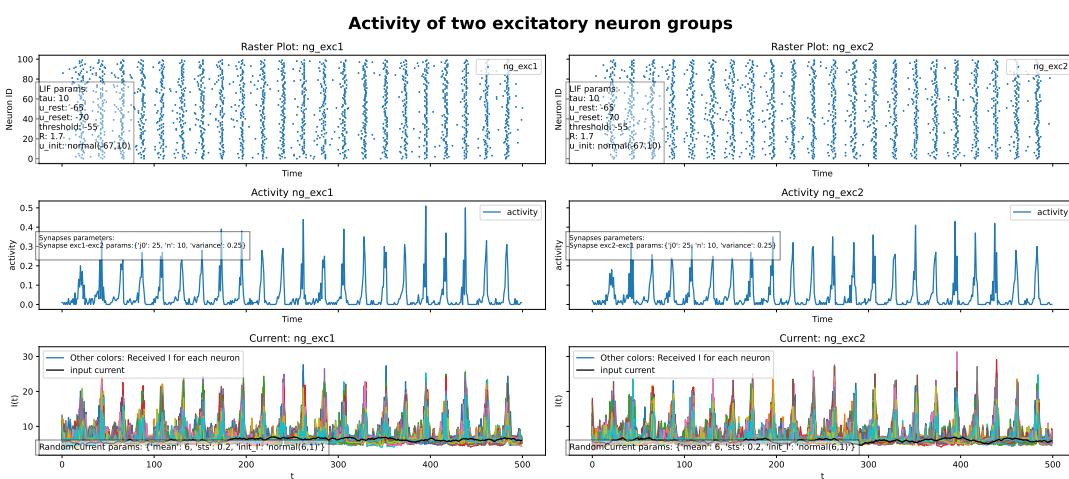


شکل ۵۳: رفتار دو جمیعت نورونی با سیناپس و جریان نویزی



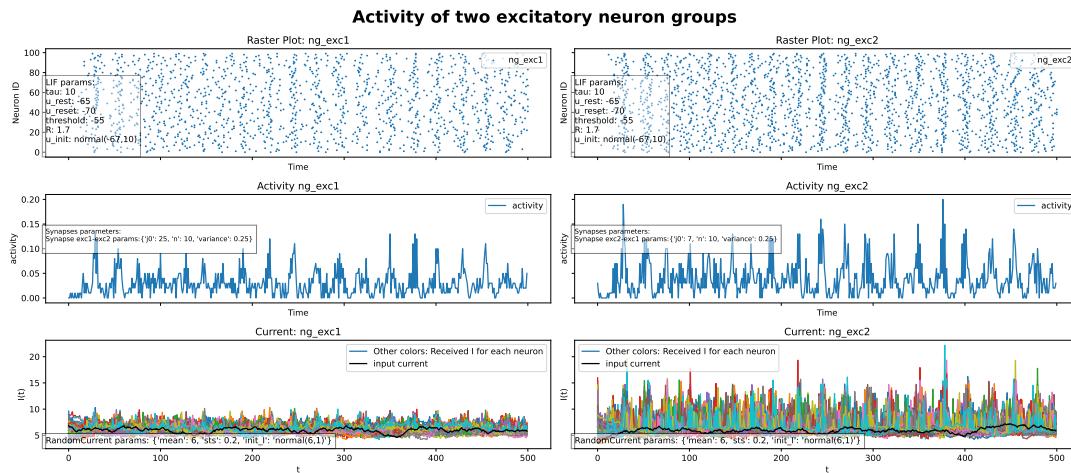
شکل ۵۴: رفتار دو جمیعت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی

پارامتر  $j_r$  افزایش این پارامتر دقیقاً تاثیر مشابهی با الگوهای قبلی دارد، یعنی فعالیت کلی هر دو جمیعت را افزایش میدهد. (شکل ۵۵)



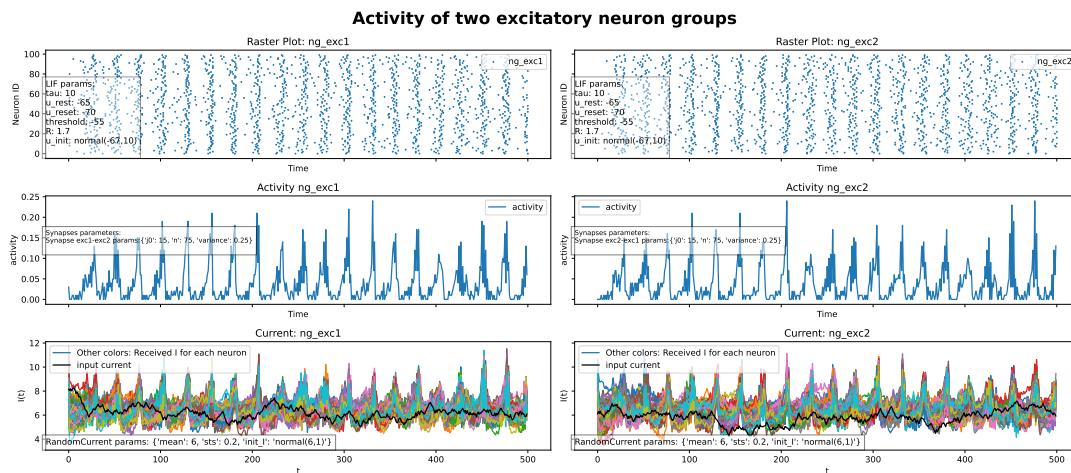
شکل ۵۵: رفتار دو جمیعت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی: افزایش  $j_r$

مجدداً افزایش یکی از سیناپس‌ها، مثلاً سیناپس ۱ به ۲، منجر به افزایش کلی فعالیت جمعیت‌ها و افزایش بیشتر جمعیت ۲ می‌شود. (شکل ۵۶)



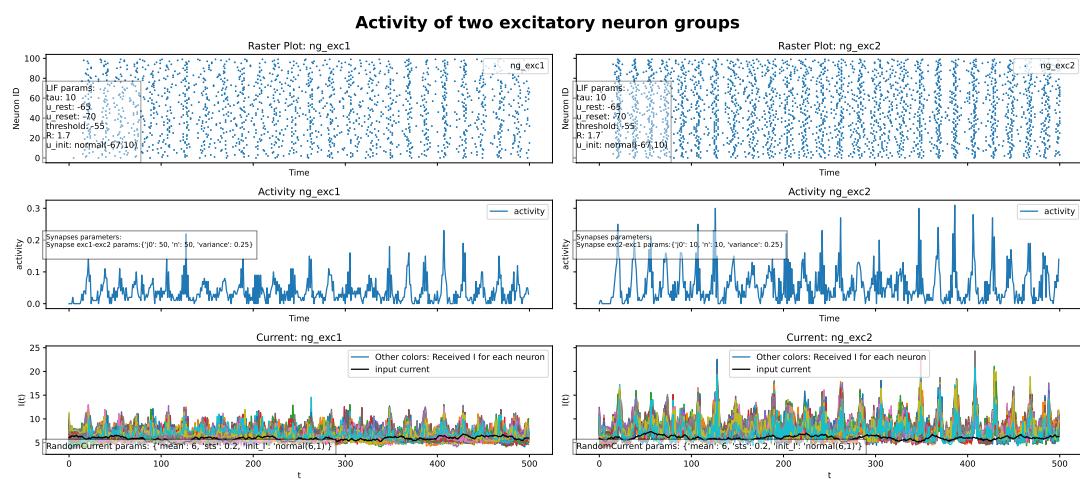
شکل ۵۶: رفتار دو جمعیت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی: افزایش  $j$

پارامتر  $n$  نوبت به پارامتر اصلی این الگو می‌رسد. اگر برای هر دو جمعیت مقدار یکسانی  $n$  انتخاب کنیم، شاهد تغییر چندانی نخواهیم بود چرا که به دلیلی که پیش تر گفته شد، افزایش  $n$  صرفاً تعداد اتصالات را زیاد می‌کند و تأثیری در وزن‌های ورودی ندارد درنتیجه افزایش یکسان آن در هر دو نورون خنثی خواهد شد. (مثلاً در شکل ۵۷ با افزایش ۵ برابری  $n$  به تنها تفاوتی در نمودارها با شکل ۵۴ نمی‌بینیم چرا که پراکنگی زیاد است).



شکل ۵۷: رفتار دو جمعیت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی: افزایش  $n$  به تنها

همچنین افزایش  $n$  و  $j$  یکی از سیناپس‌ها، مثلاً ۱ به ۲، مشابه افزایش  $j$  خواهد بود. (شکل ۵۸)



شکل ۵۸: رفتار دو جمعیت نورونی با سیناپس و جریان تصادفی: افزایش  $n$  به همراه  $j$  در یک سیناپس

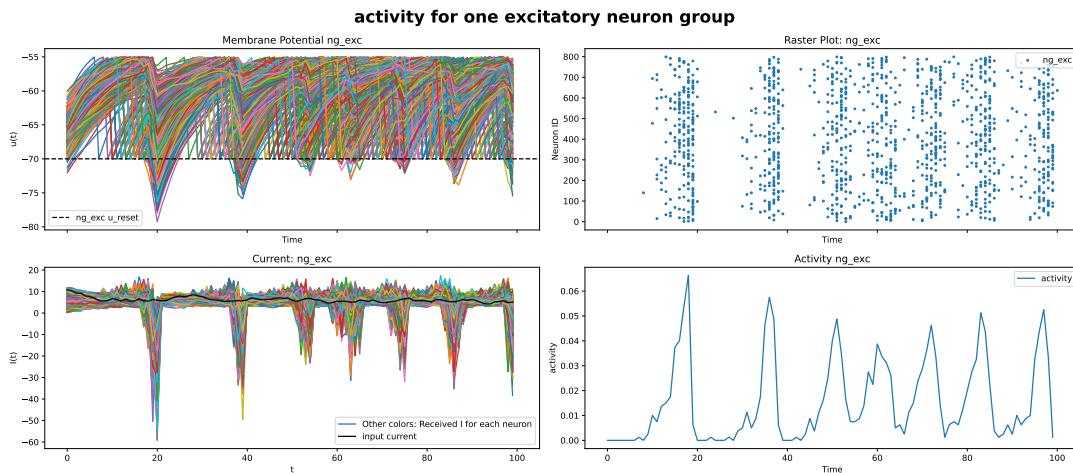
## ۳۰ شبیه سازی دو جمعیت نورونی

### ۱.۳۰ مورد الف

در این بخش، طبق خواسته پژوهه با استفاده از یکی از مدل های نورونی که در پژوهه قبل پیاده سازی کردیم، یکی از دو مدل گفته شده در فایل پژوهه را انتخاب کرده و با استفاده از یک جریان ورودی تصادفی به عنوان ورودی نورون ها، فعالیت نورون ها را در گذر زمان بررسی میکنیم: سپس این آزمایش را برای مجموعه پارامتر های مختلف و الگو های ارتباطی متفاوت بین نورون ها انجام میدهیم و نتایج بدست آمده را تحلیل میکنیم. من از بین دو مدل گفته شده مدل اول را برای آزمایش انتخاب میکنم.

در این مدل، دو جمعیت همگن از نورون ها را در نظر میگیریم که یکی شامل  $N \times 0.8$  نورون تحریکی و دیگری شامل  $N \times 0.2$  نورون مهاری باشد.

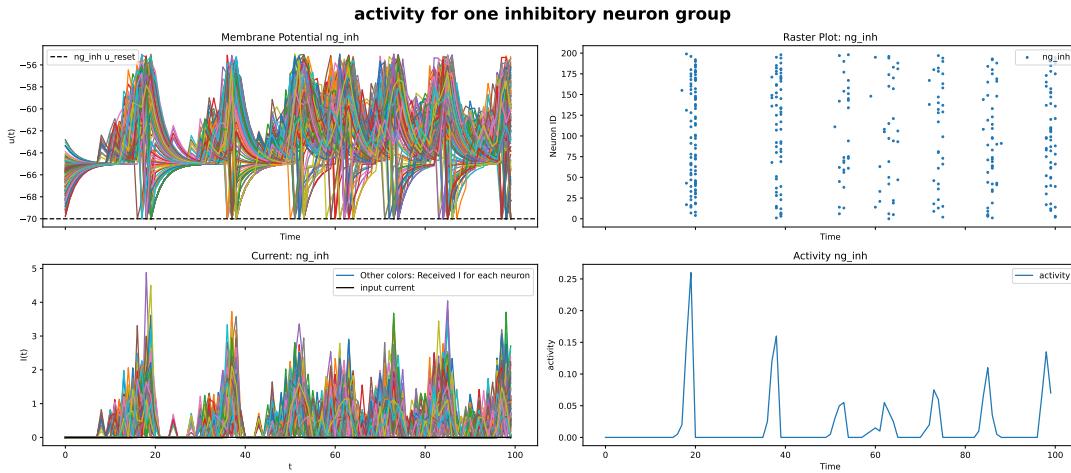
برای شروع، من ابتدا مدلی که پس از امتحان کردن پارامتر های متفاوت به آن رسیدم را بررسی میکنم، سپس حالت های مختلف با پارامتر های مختلف را آزمایش و تحلیل میکنم. این مدل، به طور کلی از ۱۰۰۰ نورون تشکیل شده که یک جمعیت آن دارای ۸۰٪ نورون تحریکی و جمعیت دیگر دارای ۲۰٪ نورون مهاری است. نورون های تحریکی از همان پارامتر های بخش قبل قبیل استفاده میکنند، اما نورون ها مهاری دارای کمی تغییر هستند. چرا که طبق گفته استاد در کلاس، نورون های تحریکی باید ترخ ضربه زدن سریع تری داشته باشند. از این رو، در این مدل،  $R$  را تا ۱۰ افزایش داده و همچنین ۷ را تا ۳ کاهش میدهیم. برای سیناپس در نظر میگیریم که یک سیناپس مربوط به سیناپس داخلی برای جمعیت تحریکی است و دو سیناپس دیگر به صورت رفت و برگشتی بین دو جمعیت هستند. همچنین هر سه سیناپس را نیز از نوع سوم، یعنی ارتباط تصادفی با تعداد ثابت نورون پیش سیناپسی انتخاب کردم. نکته دیگر قابل توجه این است که وزن هایی که از جمعیت تحریکی به جمعیت مهاری وجود دارد را نیز باید به نسبت بیشتر انتخاب کنیم، چرا که جمعیت مهاری جریان ورودی ندارد و جریان دریافتی آن را فقط جریان سیناپسی تشکیل میدهد. پس از شبیه سازی، نتیجه کلی مطابق شکل ۶۱ است. همچنین به عنوان اولین نمونه مثال، اختلاف پتانسیل را برای جمعیت تحریکی و مهاری نیز نمایش میدهیم ولی از انجا که این نمونه اطلاعات زیادی در اختیار ما قرار نمیدهد از آوردن آن در ادامه اجتناب میکنیم و صرفا برای شهود بیشتر در اینجا می آوریم. (شکل ۵۹ و شکل ۶۰)



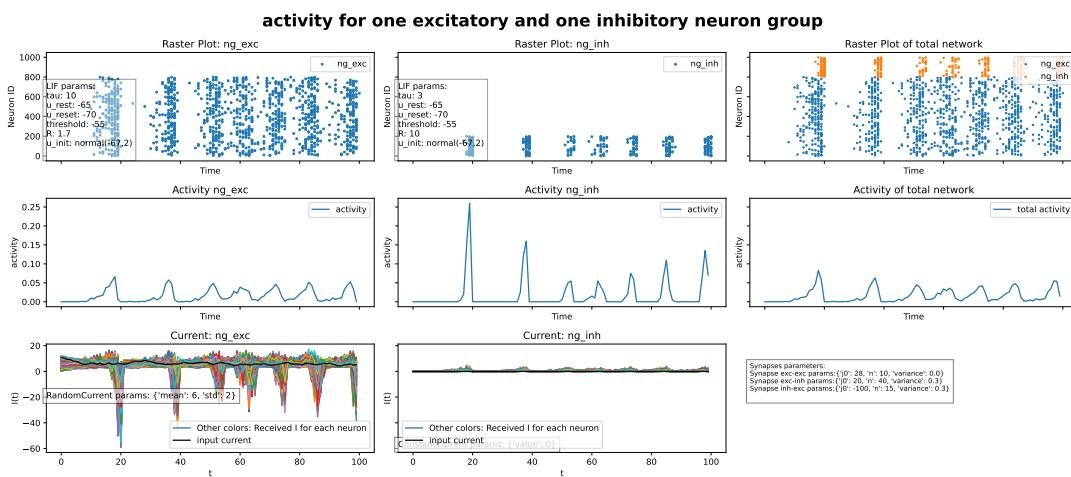
شکل ۵۹: رفتار جمعیت تحریکی و سیناپس نوع سوم به همراه جریان تصادفی

تحلیل همانطور که از شکل ۶۱ نیز مشخص است، در ابتدا جمعیت تحریکی مقداری جریان دریافت می کند و اختلاف پتانسیل آن بالا میرود، پس از آنکه اولین ضربه ها توسط نورون های تحریکی زده می شود، مشاده میکنیم که جمعیت مهاری نیز جریان دریافت میکند و هنگامی که فعالیت جمعیت تحریکی زیاد می شود، جمعیت مهاری نیز از سیناپس های خود جریان دریافت کرده و فعالیت آن ها نیز زیاد می شود. زیاد شدن فعالیت جمعیت مهاری، منجر می شود جریان سیناپ منفی سی که از این جمعیت به جمعیت تحریکی و وجود دارزدیاد شود و فعالیت جمعیت تحریکی را کاهش دهد. از این رو مشاده میکنیم که بعد از لحظاتی از هر بار فعالیت زیاد جمعیت تحریکی، فعالیت جمعیت مهاری نیز زیاد شده و شاهد افت جریان زیاد در جمعیت تحریکی هستیم. (دره های نمونه جریان) و هر بار که فعالیت جمعیت تحریکی متوقف میشود، جریان ورودی به جمعیت مهاری نیز کم یا قطع شده که منجر می شود جمعیت تحریکی بتواند دوباره به فعالیت خود ادامه دهد و این روند تا پایان شبیه سازی ادامه یافته است.

به طور خلاصه، پس از فعالیت جمعیت تحریکی شاهد افزایش فعالیت جمعیت مهاری، پس از افزایش فعالیت جمعیت مهاری شاهد کاهش جمعیت تحریکی و پس از کاهش فعالیت جمعیت تحریکی شاهد کاهش فعالیت مهاری هستیم.



شکل ۶۰: رفتار جمعیت مهاری و سیناپس نوع سوم به همراه جریان تصادفی



شکل ۶۱: رفتار جمعیت تحریکی و مهاری با نسبت ۲۰۰ به ۸۰۰ و سیناپس نوع سوم به همراه جریان تصادفی

دو مدل سیناپسی دیگر به طور کلی رفتار دو مدل سیناپسی دیگر نیز مشابه مدل بررسی شده است و تفاوت در جزئیات آن ها است. برای مثال، با حفظ نیست های پارامتر های سیناپس ها در شکل ۶۱ میتوانیم این دو جمعیت را با سیناپس های دیگر نیز بسازیم و نتیجه مشابه را دریافت کنیم. (شکل ۶۲ و شکل ۶۳)

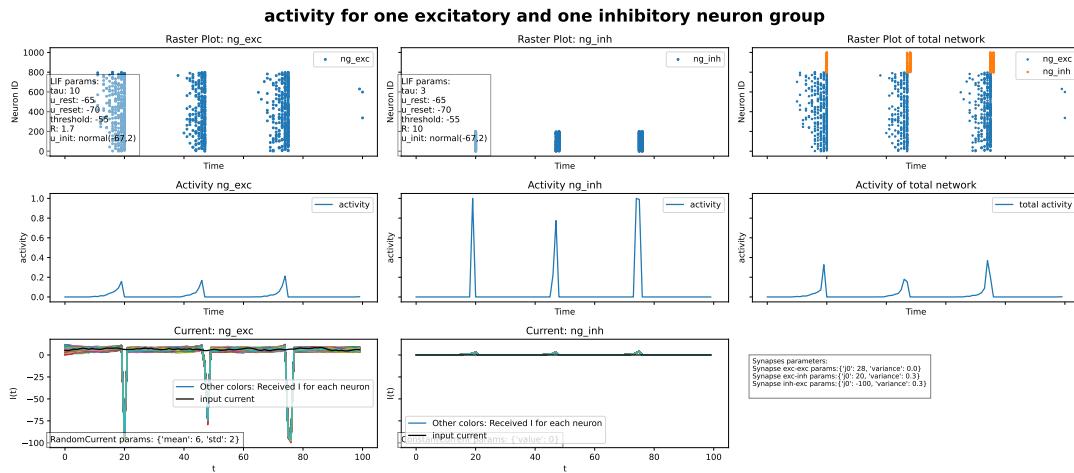
تفاوت هایی که مشاهده میکنیم، بیشتر درمورد میزان فعالیت های جمعیت ها است و رفتار کلی همان رفتاری است که بالاتر توضیح داده شد.

## ۲.۳.۰ تحلیل پارامتر ها

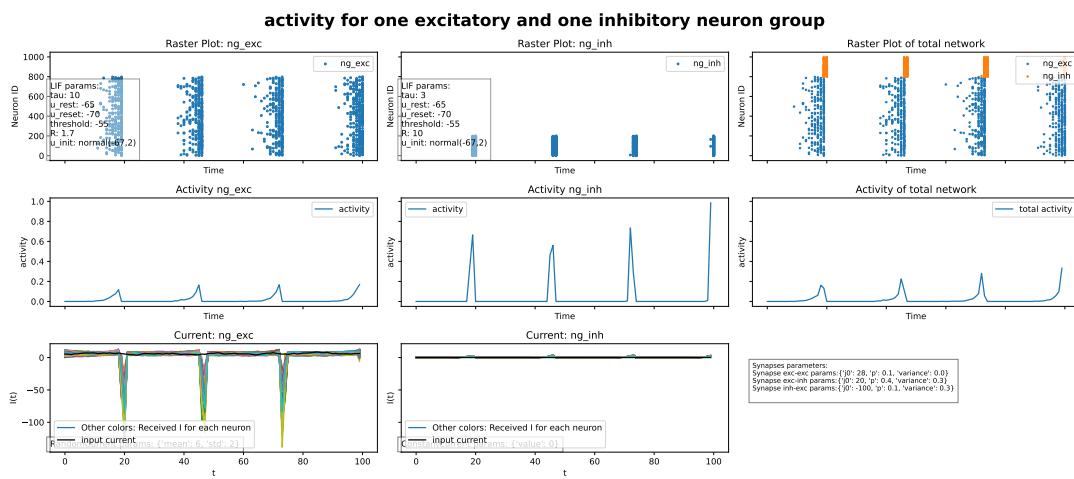
حال سعی میکنیم تاثیر پارامتر های مختلف را روی رفتار این جمعیت مشاهده کنیم. کارمان را ابتدا روی همان الگوی سیناپسی سوم انجام میدهیم و اگر جایی نیاز به الگو های دیگر بود و رفتار جدیدی داشتند، آن ها را نیز بررسی میکنیم.

پارامتر  $z_j$  در شکل ۶۱ مشاهده کردیم که وزن های سیناپسی ( $z_j$ ) برای ۳ سیناپس متفاوت بود. اگر این وزن ها را برابر قرار دهیم چه اتفاقی می افتد؟ جواب این سوال در شکل ۶۴ نهفته است. در این شکل، ما تمام پارامتر های موجود در سیناپس ها را یکسان گرفته ایم. در ادامه با بالا و پایین کردن مقدار  $z_j$  تاثیر آن را روی رفتار جمعیت ملاحظه میکنیم. همانطور که در شکل ۶۴ مشاهده میکنید، به علت وجود جریان تصادفی، زمان ضربه زدن نورون های مهاری با یکدیگر متفاوت است. از این رو فعالیت جمعیت مهاری نیز کم است. این فعالیت کم، بین معناست که نورون هایی که به عنوان نورون پیش سیناپسی جمعیت مهاری هستند، با احتمال کمتری همزمان فعال شده و درنتیجه جریان ورودی به جمعیت مهاری به آستانه خود برای ضربه زدن نمی رسد. فقط در جاهایی از نمودار میبینیم که این نورون ها به صورت تک و توک ضربه زده اند.

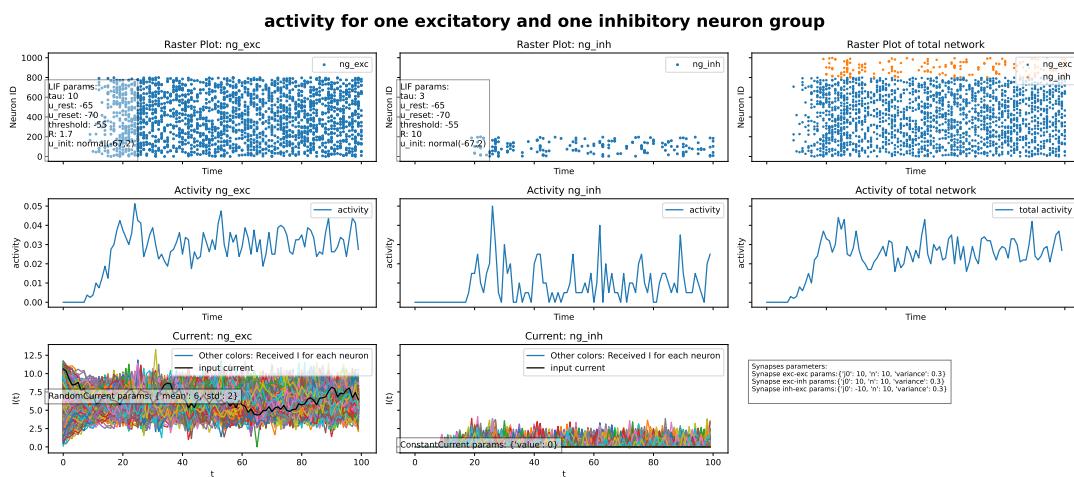
حال اگر مقدار  $z_j$  در سیناپس تحریکی به مهاری را افزایش دهیم چه اتفاقی می افتد؟ شکل ۶۵ به ما میگوید که افزایش وزن های سیناپس



شکل ٦٢: رفتار جمعیت تحریکی و مهاری با نسبت ۸۰۰ به ۲۰۰ وسیناپس نوع اول به همراه جریان تصادفی

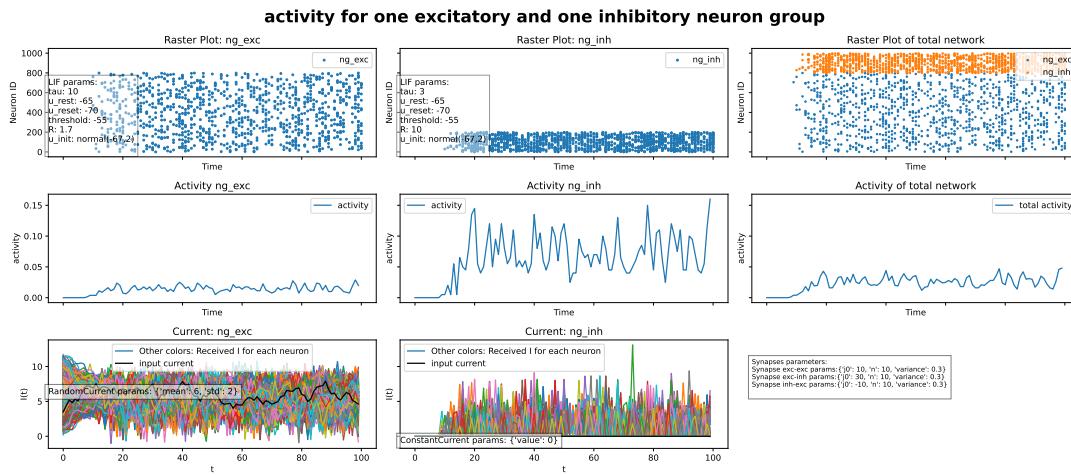


شکل ٦٣: رفتار جمعیت تحریکی و مهاری با نسبت ۸۰۰ به ۲۰۰ وسیناپس نوع دوم به همراه جریان تصادفی



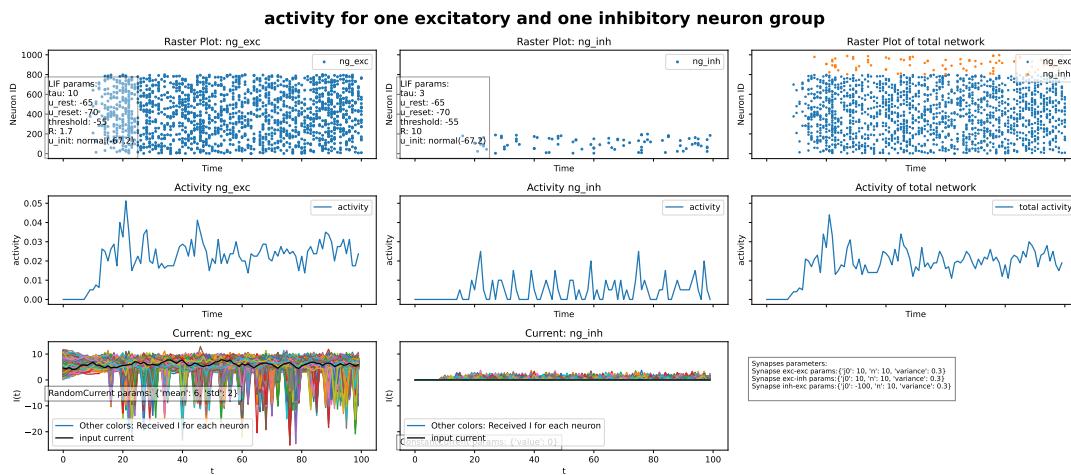
شکل ٦٤: رفتار جمعیت تحریکی و مهاری با نسبت ۸۰۰ به ۲۰۰ وسیناپس نوع سوم به همراه جریان تصادفی و  $\sigma_r$  برابر

تحریکی به مهاری، باعث می شود که جریان ورودی به جمیعت و نورون های مهاری بیشتری شده و در نتیجه، تعداد ضربات آن ها بیشتر شود. همانطور که از شکل نیز مشخص است، فعالیت نورون های مهاری بیشتر شده و این بیشتر شدن فعالیت نورون های تحریکی باعث کاهش فعالیت نورون های تحریکی شده است.



شکل ۶۵: رفتار جمیعت تحریکی و مهاری با نسبت ۸۰۰ به ۲۰۰ وسیناپس نوع سوم به همراه جریان تصادفی و  $j_0$  بیشتر از تحریکی به مهاری

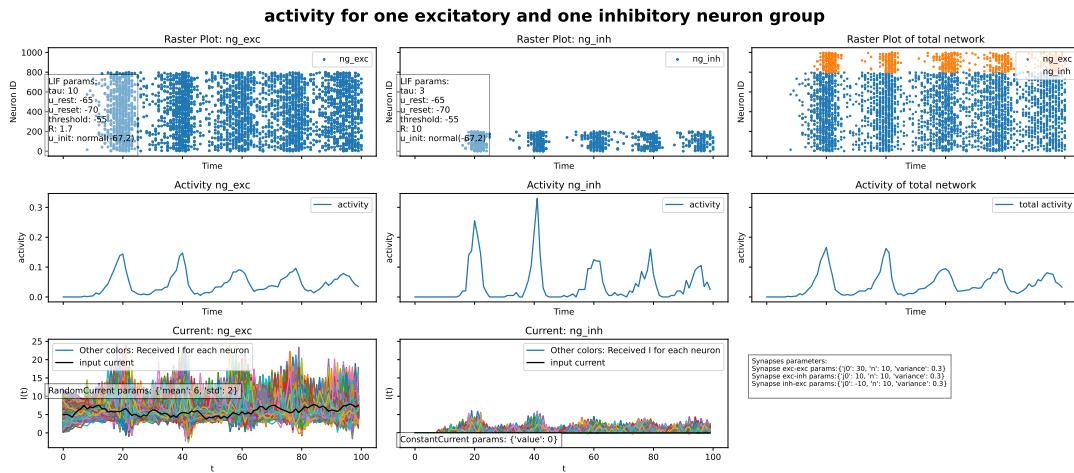
حال اگر بر عکس این اتفاق روی دهد چه؟ طبق شکل ۶۶ مشاهده میکنیم که این کار باعث می شود تا فعالیت نورون های جمیعت تحریکی مقداری کمتر شود که این کمتر شدن منجر می شود تا فعالیت خود نورون های مهاری نیز کاهش یابد و در کل، فعالیت کل جمیعت نیز کاهش یابد.



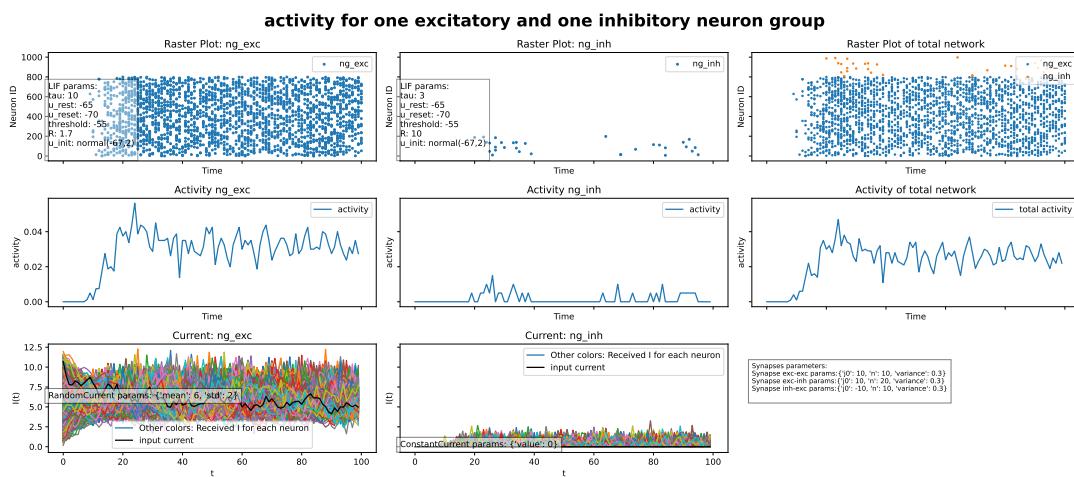
شکل ۶۶: رفتار جمیعت تحریکی و مهاری با نسبت ۸۰۰ به ۲۰۰ وسیناپس نوع سوم به همراه جریان تصادفی و  $j_0$  بیشتر از مهاری به تحریکی

در نهایت بررسی میکنیم اگر مقدار  $j_0$  در سیناپس بین نورون های جمیعت افزایش یابد چه اتفاقی می افتد. از در بخش های قبلی میدانیم که افزایش وزن های سیناپس داخلی یک جمیعت باعث افزایش فعالیت جمیعت می شد. در شکل ۶۷ نیز این مورد را مشاهده میکنیم. اما این افزایش فعالیت، خود باعث می شود تا فعالیت جمیعت مهاری نیز افزایش یابد و این افزایش فعالیت نورون های مهاری، باعث کاهش فعالیت جمیعت تحریکی در بخش هایی میشود و از این رو قله و دره هایی در نمودار فعالیت جمیعت تحریکی و درنتیجه فعالیت کلی جمیعت ها ببینیم:

پارامتر  $n$  حال به بررسی پارامتر  $n$  می پردازیم. مانند پارامتر قبلی، ابتدا با زیاد کردن  $n$  در سیناپس از جمیعت تحریکی به جمیعت مهاری شروع میکنیم. همانطور که در شکل ۶۸ نیز مشاهده میکنیم، با افزایش  $n$  از  $10^0$  به  $20^0$ ، فعالیت نورون های تحریکی کاهش می یابد. در نگاه اول ممکن است انتظار داشته باشیم که افزایش  $n$  منجر به افزایش فعالیت جمیعت پس سیناپسی شود ولی بر عکس این اتفاق می افتد. دلیل این امر این است که ما می دانیم طبق فرمول  $w_{ij}$ ، مقدار  $j_0$  به تعداد  $n$  نورون تقسیم می شود. به عنوان مثال اگر ما  $n = 1$  در نظر بگیریم، هر نورون جمیعت پس سیناپسی فقط به یک نورون پیش سیناپسی متصل است و از آنجا که وزن آن نیز برابر با حداکثر مقدار، یعنی  $j_0$  است، هر بار که نورون پیش سیناپسی مربوطه ضربه بزند، نورون پس سیناپسی نیز ضربه خواهد زد. اما اگر این مقدار را افزایش دهیم، مثلاً  $20^0$



شکل ۶۷: رفتار جمعیت تحریکی و مهاری با نسبت ۸۰۰ به ۲۰۰ و سیناپس نوع سوم به همراه جریان تصادفی و  $n$  بیشتر از تحریکی به تحریکی

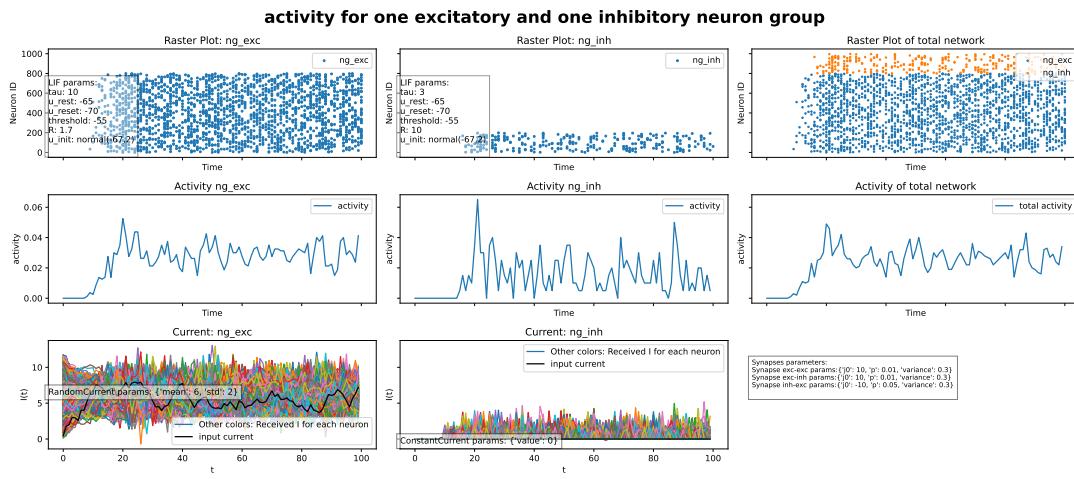


شکل ۶۸: رفتار جمعیت تحریکی و مهاری با نسبت ۸۰۰ به ۲۰۰ و سیناپس نوع سوم به همراه جریان تصادفی و  $n$  بیشتر از تحریکی به مهاری

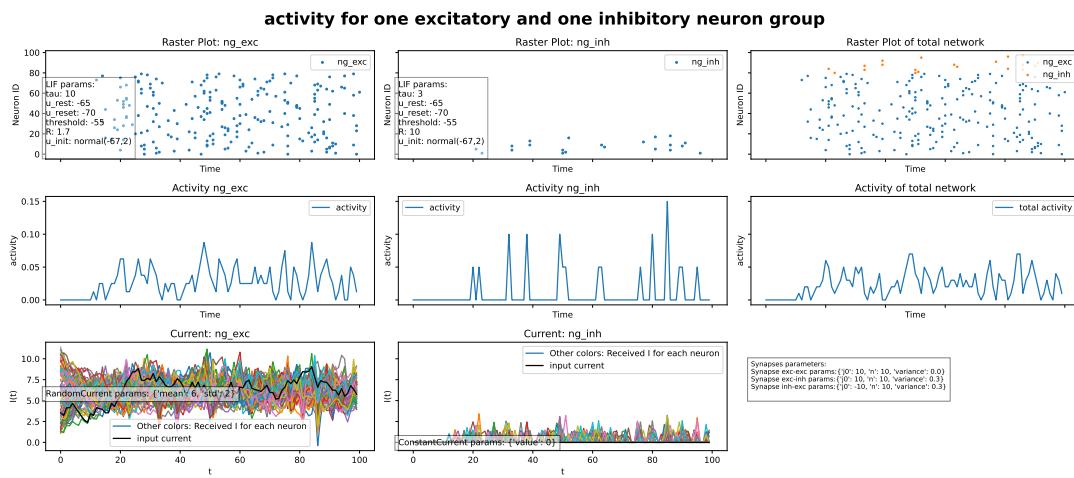
باعث می شود تا هر یک از نورون های پیش سیناپسی که متصل به نورون پس سیناپسی مورد نظر ما است، وزنی حدود  $\frac{j_0}{20}$  بگیرد که این باعث می شود تاثیر تک نورون های پیش سیناپسی، کمتر شود یا به عبارت دیگر، دیگر نتیجه مشابه شکل ۶۴ دریافت کرد، چرا که مثلا اگر  $p$  را برابر ۰.۱ قرار دهیم، تعداد اتصال های سیناپسی از جمعیت تحریکی به مهاری خیلی بیشتر از ۱۰ می شود! و ما مشاهده کردیم که با ۲۰ اتصال، فعالیت جمعیت مهاری بسیار کاهش میافتد. به عنوان مثال برای رسیدن به نتیجه ای مشابه، میتوان پارامتر های سیناپس هارا به صورت شکل ۶۹ قرار داد.

پارامتر  $p$  پارامتر  $p$  نیز تأثیری مشابه پارامتر  $n$  دارد. چرا که این پارامتر نیز تعیین کننده تعداد اتصالات بین نورون های دو جمعیت است. تفاوتی که دارد، چون  $p$  درصدی از جمعیت را انتخاب میکند، نمیتوان همانند الگوی سوم، با  $p$  های برابر نتیجه مشابه شکل ۶۴ دریافت کرد، چرا که مثلا اگر  $p$  را برابر ۰.۱ قرار دهیم، تعداد اتصال های سیناپسی از جمعیت تحریکی به مهاری خیلی بیشتر از ۱۰ می شود! و ما مشاهده کردیم که با ۲۰ اتصال، فعالیت جمعیت مهاری بسیار کاهش میافتد. به عنوان مثال برای رسیدن به نتیجه ای مشابه، میتوان پارامتر های سیناپس هارا به صورت شکل ۶۹ قرار داد.

پارامتر اندازه جمعیت در نهایت تاثیر اندازه جمعیت را روی رفتار بررسی میکنیم. تا کنون نسبت ۸۰۰ به ۲۰۰ را برای تحریکی به مهاری بررسی کردیم. اکنون می توانیم کمتری از آن، مثلا ۸۰ به ۲۰ را بررسی کنیم و البته پارامتر ها را ثابت بگیریم. (مثلا با پارامتر های شکل ۶۴ همانطور که در شکل ۷۰ ملاحظه میکنید، نگه داشتن پارامتر های ثابت با سیناپس نوع سوم، باعث می شود که به دلیل افزایش نسبی  $n$  به اندازه جمعیت، فعالیت جمعیت به طور کلی کاهش بیابد که این، به دلیل افزایش نسبی  $n$  است که پیش تر توضیح داده شد. از این رو انتظار داریم که تغییر جمعیت در مدل سیناپسی دوم این مشکل را نداشته باشد.



شکل ۶۹: رفتار جمعیت تحریکی و مهاری با نسبت ۸۰۰ به ۲۰۰ و سیناپس نوع دوم به همراه جریان تصادفی و  $p$  متفاوت



شکل ۷۰: رفتار جمعیت تحریکی و مهاری با نسبت ۸۰ به ۲۰ و سیناپس نوع سوم به همراه جریان تصادفی

## ۴۰ فرایند تصمیم‌گیری

به بخش آخر پروژه، یعنی تصمیم‌گیری می‌رسیم. در این بخش از ما خواسته شده است که دو جمعیت نورونی تحریکی و یک جمعیت نورونی مهاری ساخته و ارتباطات بین آن‌ها را برقرار کنیم. سپس برای هر یک از جمعیت‌های نورونی تحریکی، یک جریان ورودی نویزی در نظر بگیریم و در هر بار شبیه سازی، یکی از ورودی‌ها به صورت کلی قوی‌تر از دیگری باشد.

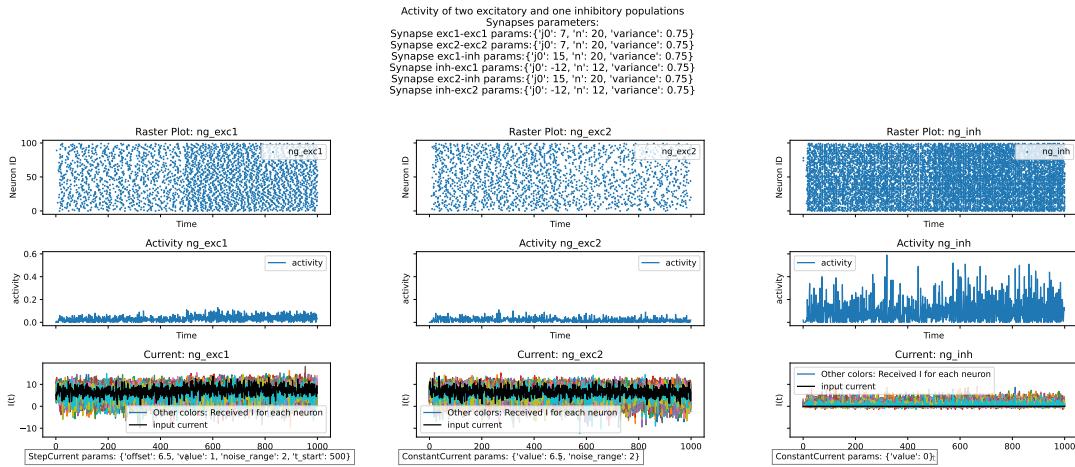
من ابتدا نتیجه خوبی که با پارامترهای مهاری گرفته‌ام را به عنوان نمونه می‌گذارم، سپس حالت‌های ممکن مختلف دیگر را بررسی می‌کنم. برای رسیدن به نمودار خواسته شده در این بخش، باید از دانشی که از بخش‌های قبل بدست آورده‌یم استفاده کنیم. به طور مثال اگر می‌خواهیم که پراکنده‌ی زمان ضربه زدن نورون‌ها زیاد باشد، نیاز داریم ۰۲ را کاهش دهیم، یا اگر می‌خواهیم که تغییر رفتار جمعیت بعد از تصمیم‌گیری، مشهود باشد، نیاز داریم که وزن سیناپس بین جمعیت‌ها را بیشتر کنیم. من با درنظر گرفتن این موارد و تحلیل‌های قبلی، به شکل ۷۱ رسیدم که شبیه‌شکل آورده شده در پروژه بود. اما در ادامه، پارامترهای تاثیرگذار را تغییر میدهیم تا تاثیر آن‌ها و روند رسیدن به این مدل را بهتر بفهمیم. همانطور که در شکل دیده می‌شود، در ابتدا جریان هر دو جمعیت نورونی تحریکی برابر است و از این رو جمعیت‌ها در تعادل قرار دارند و فعالیت هر سه جمعیت تقریباً یکسان است. اما بعد از اینکه در لحظه ۵۰۰ جمعیت اول اندکی افزایش می‌یابد، در زمان کوتاهی، فعالیت آن و در نتیجه فعالیت جمعیت جمهوری بیشتر شده و در نتیجه فعالیت جمعیت تحریکی دیگر کاهش می‌یابد. این به این دلیل است که با افزایش جریان ورودی به جمعیت ۱، و همچنین بیشتر شدن جریان سیناپس درون آن، نورون‌های آن سریع‌تر ضربه زده و در نتیجه فعالیت آن‌ها بیشتر می‌شود. با بیشتر شدن فعالیت جمعیت ۱، جریان ورودی به جمعیت مهاری نیز افزایش یافته و فعالیت آن نیز بیشتر می‌شود. اکنون جمعیت مهاری با بیشتر شدن فعالیتش می‌خواهد که فعالیت دو جمعیت دیگر را کاهش دهد، اما از آنجا که جریان جمعیت تحریکی ۲ افزایشی نیافته بود، جریان ورودی به آن در مجموع کاهش یافته و فعالیت آن کم می‌شود. من برای آنکه نمودار پروژه شود، جریان‌های ورودی را تزدیک به جریان مورد نیاز برای ضربه زدن انتخاب کردم تا کاهش جریان بتواتر تاثیر محسوسی در نمودار بگذارد. اما بیشتر بودن جریان نیز همانطور که از شکل ۷۲ معلوم است تاثیر در این فرایند تصمیم‌گیری ندارد و صرفاً فعالیت کلی را افزایش می‌دهد. (در ۲ مدل تحریکی، جریان مورد نیاز برای ضربه زدن، در حدود ۶ است) حال تمامی پارامترهای را برابر با یکدیگر قرار داده و تاثیر هر یک را روی فرایند تصمیم‌گیری بررسی می‌کنیم. نتیجه حاصل مطابق شکل ۷۳ خواهد شد.

شکل ۷۱: تصمیم‌گیری با دو جمعیت تحریکی و یک جمعیت مهاری

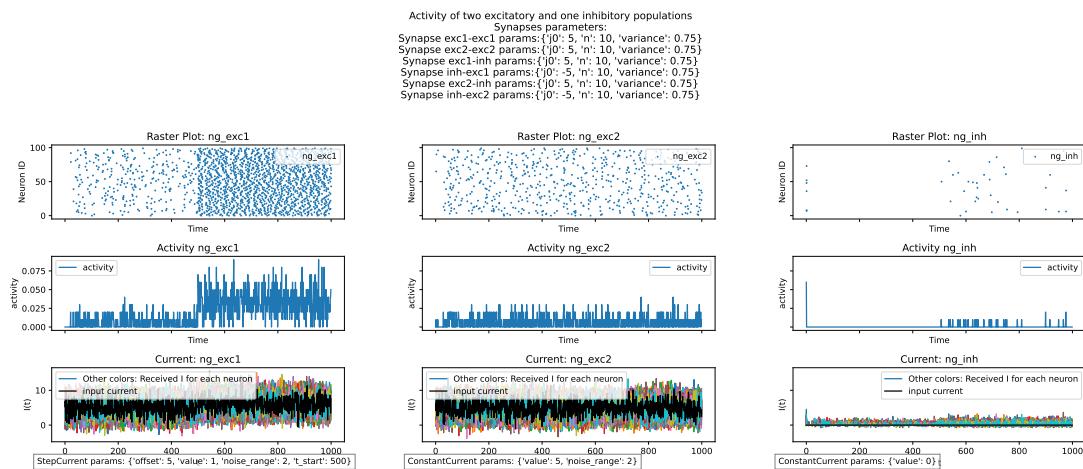
از آنجا که واریانس تاثیر چشم‌گیری در فعالیت ندارد، از بررسی جداگانه آن چشم پوشی می‌کنیم:

پارامتر ۰<sub>z</sub> ابتدا بررسی می‌کنیم که اگر وزن‌های سیناپس‌های تحریکی به مهاری را افزایش دهیم چه اتفاقی می‌افتد. همانطور که در شکل ۷۴ نیز مشاهده می‌شود، مانند حالت قبل فعالیت نورونی که دارای جریان بیشتر است افزایش می‌یابد اما به دلیل اینکه وزن‌ها به جمعیت مهاری نیز کمی بیشتر شده، نورون‌های مهاری نیز شروع به ضربه زدن می‌کنند و در نتیجه فعالیت مقداری فعالیت جمعیت دارای جریان کمتر نیز کاهش می‌یابد. اگر همین کار را برای سیناپس‌های مهاری به تحریکی انجام میدادیم چه اتفاقی می‌افتاد؟ مطابق شکل ۷۵ مشاهده می‌شود که تغییر محسوسی در رفتار نسبت به شکل ۷۳ رخ نمی‌دهد. چرا که افزایش وزن‌های سیناپس‌های مهاری به تحریکی، تنها در حالت تاثیرگذار هست که وزن‌های تحریکی نیز زیاد باشند تا جمعیت مهاری فعالیتی داشته باشد.

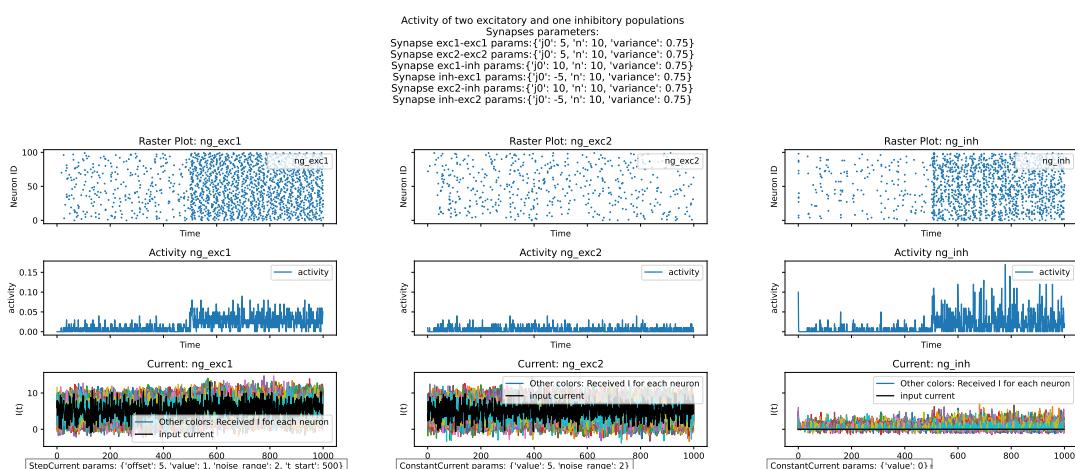
پارامتر  $n$  حال پارامتر  $n$  را بررسی می‌کنیم. طبق چیزی که در بخش ۲ و ۳ یاد گرفتیم، میدانیم در جمعیت‌های یکسان، میتوان پارامتر  $p$  را به گونه‌ای تنظیم کرد که تاثیری مشابه  $n$  داشته باشد چرا که اثر هر دوی این پارامترهای بر روی تعداد ارتباطات سیناپسی است، از این رو در این بخش فقط به بررسی  $n$  میپردازیم. از این رو ابتدا تاثیر افزایش  $n$  در سیناپس‌های تحریکی به مهاری را بررسی می‌کنیم. طبق شکل ۷۶ می‌بینیم



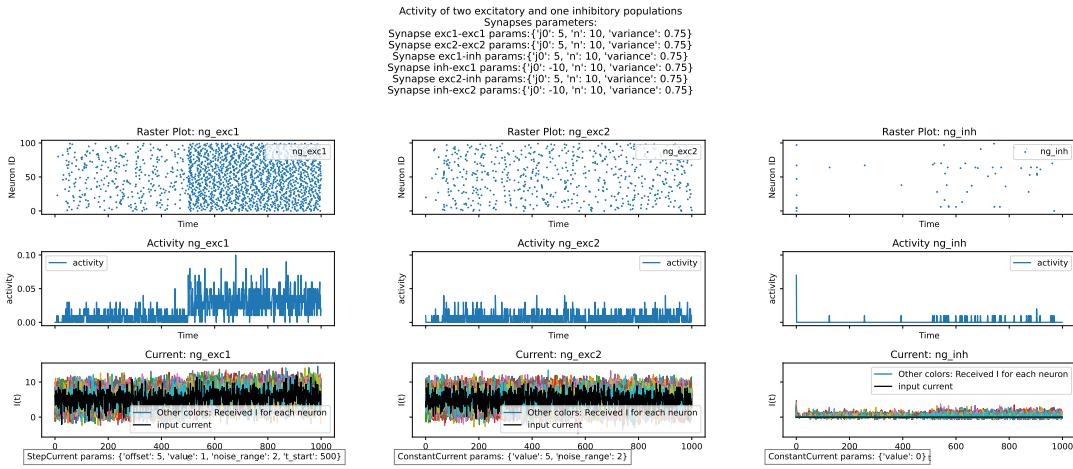
شکل ۷۲: تصمیم‌گیری با دو جمعیت تحریکی با جریان ورودی بیشتر و یک جمعیت مهاری



شکل ۷۳: تصمیم‌گیری با دو جمعیت تحریکی و یک جمعیت مهاری با پارامترهای یکسان

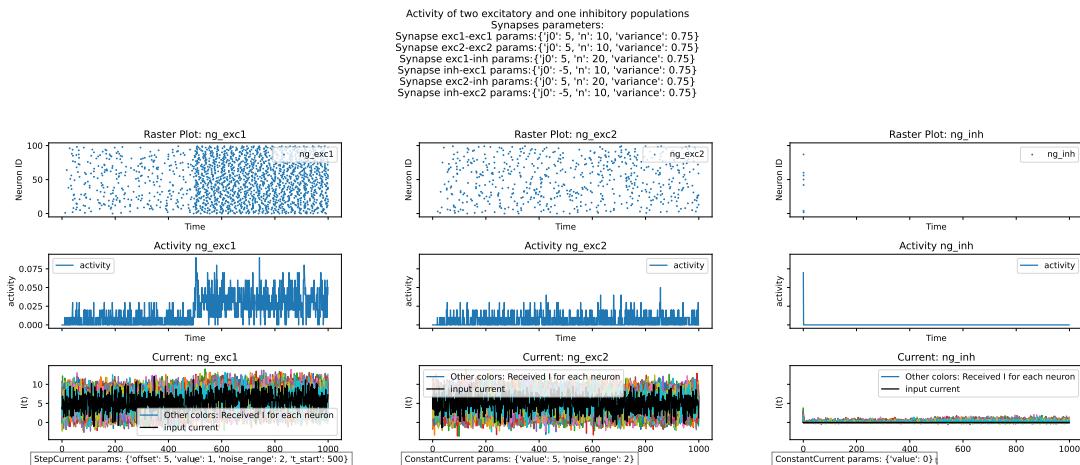


شکل ۷۴: تصمیم‌گیری با دو جمعیت تحریکی و یک جمعیت مهاری: افزایش  $j_0$  در سیناپس‌های تحریکی به مهاری



شکل ۷۵: تصمیم‌گیری با دو جمعیت تحریکی و یک جمعیت مهاری: افزایش  $j_0$  در سیناپس‌های مهاری به تحریکی

که تاثیر آن دقیقاً مشابه بخش ۳ است و باعث می‌شود که فعالیت جمعیت مهاری کاهش یابد. (به همان علتی که در بخش ۳ گفته شد). تاثیر بر عکس نیز هنگامی که فعالیت جمعیت مهاری زیاد باشد، مشابه است. در غیر این صورت تاثیر خاصی ندارد.

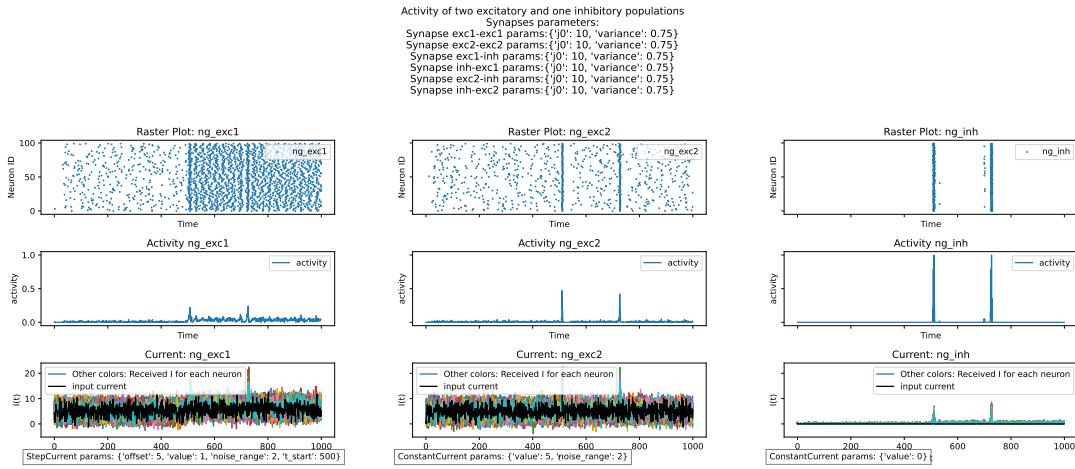


شکل ۷۶: تصمیم‌گیری با دو جمعیت تحریکی و یک جمعیت مهاری: افزایش  $n$  در سیناپس‌های تحریکی به مهاری

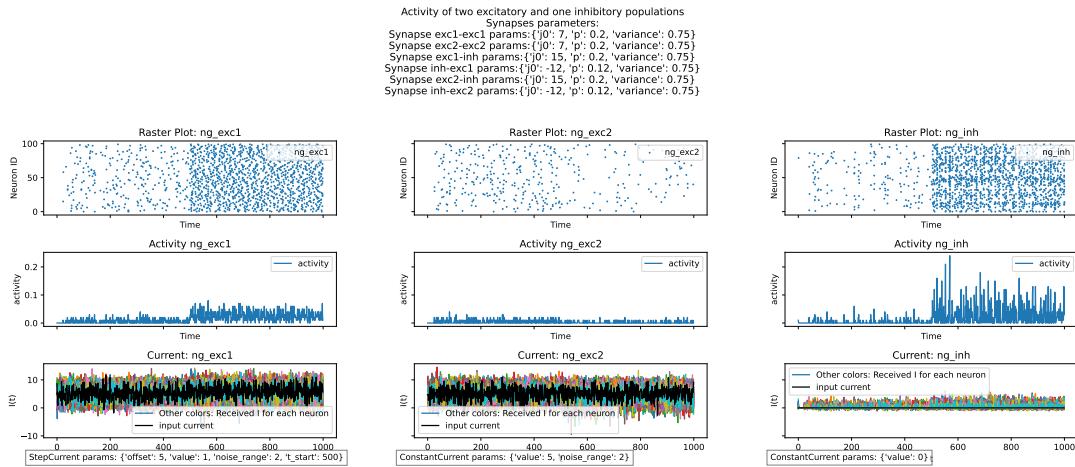
**دو الگوی دیگر** در نهایت، فرایند تصمیم‌گیری را با استفاده از دو الگوی دیگر انجام میدهیم. انتظار داریم که با وزن‌های ثابت مانند شکل ۷۱ الگوی ارتباط کامل نتواند فرایند تصمیم‌گیری را به درستی انجام دهد، چرا که مانند آن است که در الگوی سوم، مقدار  $n$  را حداکثر بگیریم. اما در مورد الگوی دوم میتوانیم با انتخاب مناسب  $p$  به رفتار مشابه به چیزی که در الگوی سوم دیدیم برسیم. شکل ۷۷ و شکل ۷۸ این دو نتیجه‌گیری را تأیید میکند.

## ۱۰.۴.۰ امتیازی

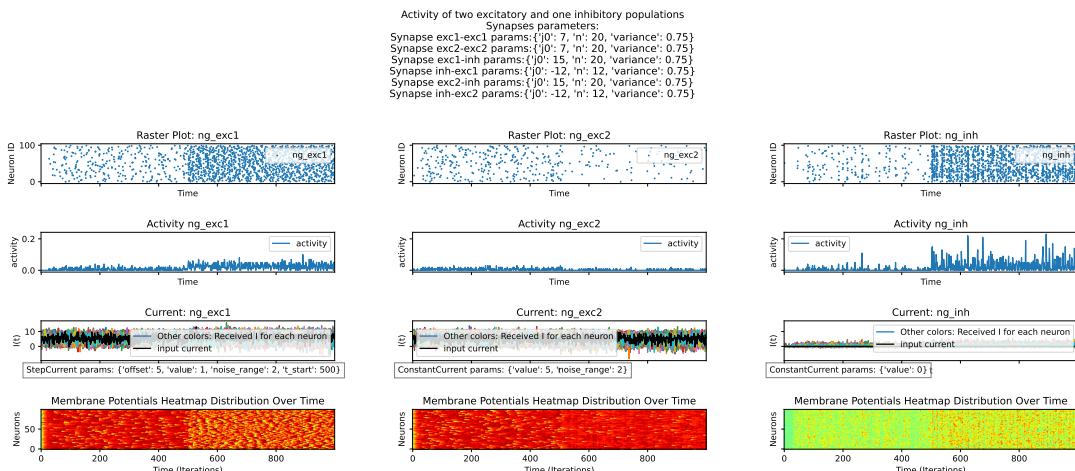
در بخش امتیازی از ما خواسته شده است که توزیع پتانسیل غشنا را در طول فرایند شبیه سازی رسم کنیم. من از دستیار حل تمرین مربوط درمورد این قسمت پرس و جو کردم و گفتند که این نمودار، باید به صورت هیت مپ (heatmap) باشد. از این رو، این نمودار برای فرایند تصمیم‌گیری با الگوی سیناپسی نوع سوم در شکل ۷۹ آمده است.



شکل ۷۷: تصمیم‌گیری با دو جمعیت تحریکی و یک جمعیت مهاری: الگوی اول



شکل ۷۸: تصمیم‌گیری با دو جمعیت تحریکی و یک جمعیت مهاری: الگوی دوم



شکل ۷۹: تصمیم‌گیری با دو جمعیت تحریکی و یک جمعیت مهاری به همراه نمودار توزیع پتانسیل غشای جمعیت در طول فرایند

# کتاب‌نامه

- [۱] Computational Neuroscience Course, School of computer science, University of Tehran
- [۲] PymoNNtorchPytorch-adapted version of PymoNNto
- [۳] Wiki-pedia: Refractory\_period\_(physiology)
- [۴] Neuronal Dynamics, Wulfram Gerstner, Werner M. Kistler, Richard Naud and Liam Paninski