

مطالعه همگامی در شبکه‌های عصبی

محسن مهرانی - استاد راهنما: دکتر سامان مقیمی عراقی

فهرست مطالب

۲	۱	سخن نخست
۲	۲	مقدمه
۲	۳	شبکه انباشت و شلیک
۳	۱.۳	آهنگ تیزه زدن
۳	۲.۳	نشانگر تشخیص فاز همگامی
۴	۳.۳	مسائل پیشروی پیاده سازی شبیه سازی
۴	۱.۳.۳	تابع بی کران دلتا
۵	۲.۳.۳	ثبت تاریخ تیزه زدن‌ها
۵	۴.۳	نتایج
۶	۱.۴.۳	انحراف از معیار میدان
۶	۲.۴.۳	توزیع تناوب زمانی تیزه‌ها
۷	۴	شبکه‌ی نورون‌های چرخنده
۸	۱.۴	آهنگ تیزه زدن
۸	۲.۴	نشانگر توسعه یافته‌ی تشخیص همگامی
۹	۳.۴	شبیه سازی
۹	۴.۴	نتایج
۹	۱.۴.۴	در جستجوی تغییر فاز
۹	۲.۴.۴	نورون‌های خاموش
۱۱	۳.۴.۴	فاصله زمانی بین تیزه‌ها
۱۱	۴.۴.۴	فعالیت شبکه
۱۲	۵	تلاش برای توصیف
۱۳	۱.۵	جریان داخلی در فاز ناهم گام
۱۳	۲.۵	جریان داخلی در فاز هم گام

۱ سخن نخست

مطالعه فعالیت شبکه‌های عصبی برای تحقیق و بررسی کارکردهای مغز اهمیت زیادی دارد. همه بر این باوریم که مغز محمل اندیشه و تفکر است. ما کنجکاو هستیم که چگونه همکاری بین نورون‌های آن باعث می‌شود تا حافظه، کشف و پردازش صورت گیرد. هر کدام از نورون‌های مغز می‌تواند در حالت فعال [روشن] یا غیرفعال [خاموش] قرار گیرد. هم اکنون شواهدی وجود دارد که کارکردهایی طلایی یاد شده مغز در زمان‌هایی رخ می‌دهند که الگوی خاموش و روشن شدن نورون‌های آن باهم «هم‌گامی» دارند. هم‌گامی به این معناست که جمعیت بزرگی از نورون‌ها هم باهم خاموش و روشن می‌شوند و یک الگوی تکرار شونده‌ای را دنبال می‌کنند. تو گویی که باهم هم‌آهنگ یا هم‌گام شده‌اند.

بی‌تردید دستیابی به تمام جزئیات مغز برای ما میسر نیست و به آن به عنوان یک «جعبه سیاه» نگاه می‌کنیم که مدت‌هاست به دنبال ارائه مدلی هستیم که رابطه‌ی بین ورودی‌ها و خروجی‌های ثبت شده را بازتولید کند. کاری که در این پژوهش انجام خواهیم داد تلاشی است برای پیشنهاد دادن یک مدل برای این جعبه سیاه که رفتار نسبتاً مشابهی را میان ورودی و خروجی‌های این جعبه سیاه و یا مغز ایجاد می‌کند.

۲ مقدمه

مدل‌های زیادی برای شبکه‌های عصبی ارائه شده است که توانایی تولید رفتار هم‌گام شدن نورون‌ها را در آن‌ها می‌توانیم جستجو کنیم. یکی از این مدل‌ها که در تمام فصول شبیه‌سازی از آغاز تا کنون از آن بهره برده شده است؛ مدل انباشت و شلیک است [۱]. در این جستار ابتدا با مدل انباشت و شلیک شروع می‌کنیم و سپس مدلی توسعه یافته که آن را «چرخنده» صدا خواهیم کرد؛ می‌پردازیم. متن اصلی این جستار شامل معرفی این مدل‌ها و پویایی آن‌ها در زمان و نتایج ضبط شده از نشانگرهایی است که برای آشکارسازی هم‌گامی تعبیه شده‌اند.

۳ شبکه انباشت و شلیک

در این نوشتار [۱] نویسندگان تلاش می‌کنند تا هم‌گامی را برای شبکه‌ی نورون‌های مهاری رصد کنند. این نورون‌ها به گونه‌ای باهم مرتبط هستند که تیزه زدن هر نورون منجر به مهار پتانسیل دیگر نورون‌ها می‌شود. تک‌تک نورون‌های این شبکه از تحول انباشت و شلیک تبعیت می‌کند. معادله تحول اختلاف پتانسیل هر کدام از نورون‌ها با محیط بیرونش از رابطه زیر داده می‌شود:

$$\dot{v}_i = a_i - v_i - \frac{g}{N} \sum_{n|t_n < t} S_{i,l(n)} \delta(t - t_n - t_d) \quad (1)$$

- g : ضریب اتصال هر جفت نورون. از آنجا که همه‌ی نورون‌ها در این مطالعه مهاری هستند؛ باید این کمیت مثبت انتخاب شود تا تاثیر جمله‌ی پایانی در نهایت منفی باشد.

- S : ماتریس همسایگی. این کمیت نشان می‌دهد که آیا دو نورون به هم متصل و تاثیرگذار هستند یا خیر.

- t_d : زمان تاخیر میان زدن تیزه هر نورون و تاثیر آن روی نورون‌های دیگر.

- a_i : یک پتانسیل تحریکی و خارجی. در این مطالعه این مقدار برای هر نورون به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و تا پایان شبیه‌سازی ثابت باقی می‌ماند.

- N : تعداد نورون‌های در شبکه

۱.۳ آهنگ تیزه زدن

پیش از آن که به شبیه‌سازی یک شبکه از نورون‌ها بپردازیم؛ خوب است تا یک نورون تنها را مطالعه کنیم. یک نورون تنها که پویایی از جنس مدل انباشت و شلیک دارد؛ دوره تناوب تیزه‌زدن آن از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است.

$$\dot{v}_i = I - v_i \rightarrow \frac{dv_i}{I - v_i} = dt \quad (2)$$

$$\rightarrow T = \ln\left(\frac{I}{I-1}\right) \quad (3)$$

این رابطه نشان می‌دهد که بسامد تیزه‌زدن یک نورون با افزایش مجموع جریان‌های ورودی آن به صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد.

۲.۳ نشانگر تشخیص فاز هم‌گامی

برای آن که متوجه شویم که شبکه در حالت هم‌گامی یا ناهم‌گامی است نیاز است تا آشکارسازی را تعبیه کنیم که باتوجه به رفتار سامانه، هم‌گامی یا ناهم‌گامی را با عقربه‌ی خود نشان دهد. برای این منظور ابتدا مفهوم میدان (E) را تعریف می‌کنیم که بیانگر شدت فعالیت نورون‌های شبکه است. انحراف از معیار این کمیت در طول زمان، پارامتر مناسبی است که به کمک آن هم‌گامی را تشخیص دهیم.

$$\ddot{E} + \gamma \alpha \dot{E} + \alpha^2 E = \frac{\alpha^2}{N} \sum_{n|t_n < t} \delta(t - t_n - t_d) \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \langle E^2 \rangle_t - \langle E \rangle_t^2 \quad (5)$$

* دقت کنیم که شدت میدان با تعداد تیزه زدن‌ها رفتاری ملایم دارد. به عنوان مثال اگر تیزه‌ها متوقف شوند؛ شدت میدان پس از لحظاتی چند [متناسب با α] صفر می‌شود.

در طول زمان میدان E و σ را رصد می‌کنیم. برای دریافت شهودی عملکرد مناسب این پارامتر نظم، فرض کنید که شبکه در حالتی است که جمعیت بزرگی از آن در حال خاموش و روشن شدن هم‌گام است. پس مشاهده خواهیم کرد که میدان که شدت فعالیت نورون‌ها را نشان می‌دهد در حال ضربان رفت و برگشتی است. این افت‌وخیز با تقویت هم‌گامی دامنه‌ی بزرگتر پیدا می‌کند به طوری که انحراف آن از میانگین پهنای قابل توجهی کسب می‌کند. از این رو انحراف معیار میدان، کمیت مناسبی است که میزان هم‌گامی را گزارش کند.

۳.۳ مسائل پیشروی پیاده سازی شبیه سازی

۱.۳.۳ تابع بی‌کران دلتا

یکی از مشکلات شبیه سازی معادلات دیفرانسیلی حضور تابع دلتای دیراک است. این تابع در نقطه صفر خود دارای مقداری بینهایت است. معرفی چنین تابعی به رایانه کاری دشوار است و همانندی محاسباتی ندارد. حال برای برطرف کردن این مشکل چه باید کرد؟ نکته در این جا نهفته است که چون ما برای حل عددی معادله دیفرانسیلی خود از زمان پیوسته استفاده نمی‌کنیم و از گام‌هایی با طول مثبت Δt استفاده می‌کنیم این مشکل به صورت زیر مدیریت می‌شود.

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + \int_t^{t+\Delta t} \dot{v}_i dt \quad (6)$$

$$= v_i(t) + \int_t^{t+\Delta t} \left[a_i - v_i - \frac{g}{N} \sum_{n|t_n < t} S_{i,l(n)} \delta(t - t_n - t_d) \right] dt \quad (7)$$

$$\approx v_i(t) + [a_i - v_i(t)] \Delta t - \frac{g}{N} \sum_{n|t_n < t} S_{i,l(n)} \int_t^{t+\Delta t} \delta(t - t_n - t_d) dt \quad (8)$$

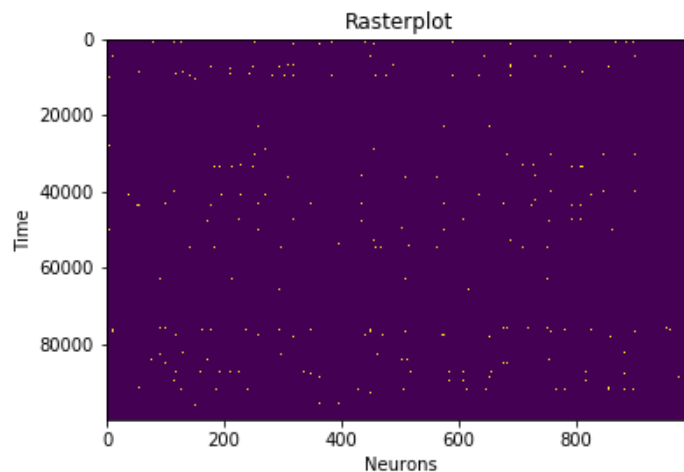
$$\approx v_i(t) + [a_i - v_i(t)] \Delta t - \frac{g}{N} \sum_{n|t_n < t} S_{i,l(n)} H(t + \Delta t - t_n - t_d) \quad (9)$$

حالا تابع پله کاملاً برای ما آشنا و قابل مدلسازی است. دقت شود که تابع پله یاد شده فقط در

محدوده $t, t + \Delta t$ زندگی می‌کند و پس از آن اعتبار ندارد. معادله ۹ می‌گوید که باید برای تحول پتانسیل نرون i ام بررسی کنیم که آیا نرونی در همسایگی آن تیزه زده است یا نه. اگر چنان باشد؛ یک واحد به جمع تیزه زدگان اضافه کنیم.

۲.۳.۳ ثبت تاریخ تیزه زدن‌ها

برای محاسبه تحول پتانسیل در رابطه ۹ چنان که توضیح داده شد نیاز به دانستن تاریخ تیزه زدن‌ها داریم. اگر بخواهیم برای تمامی نرون‌ها در هر گام زمانی تیزه‌زدن آن را به صورت مجزا ثبت کنیم؛ یک آرایه مربعی خواهیم داشت که شماره سطر آن می‌تواند معرف زمان باشد و ستون نماد شماره نرون - شکل شماره (۱). اما مشکلی که برای این شبیه سازی رخ خواهد داد. در صورت افزایش تعداد نرون‌ها و زمان شبیه



شکل (۱) ثبت لحظه‌ای تیزه زدن هر نرون به صورت مجزا - در این نمودار ضریب تاثیر هر نرون روی همسایه‌هایش $g = 5$ بوده است. چنان که انتظار می‌رفت شاهد هم‌گامی هستیم.

سازی با یک ابر آرایه روبرو خواهیم شد که امکان دارد در ذخیره سازی آن دچار مشکل شویم. به همین خاطر در شبیه سازی انجام شده تنها مجموع تیزه زدن‌ها را ذخیره کردیم تا یک آرایه یک ستونه داشته باشیم و در ذخیره‌سازی به مشکل نخوریم.

۴.۳ نتایج

اندازه‌ی پارامترهایی که برای این شبیه‌سازی انتخاب کردیم؛ کاملاً از صورت مقاله یاد شده برداشته شده و به قرار زیر است.

$$\alpha = 20 s^{-1} *$$

* جریان‌های تصادفی خارجی نوروها از اعضای بازه‌ی (۲/۸, ۱/۲) انتخاب می‌شوند.

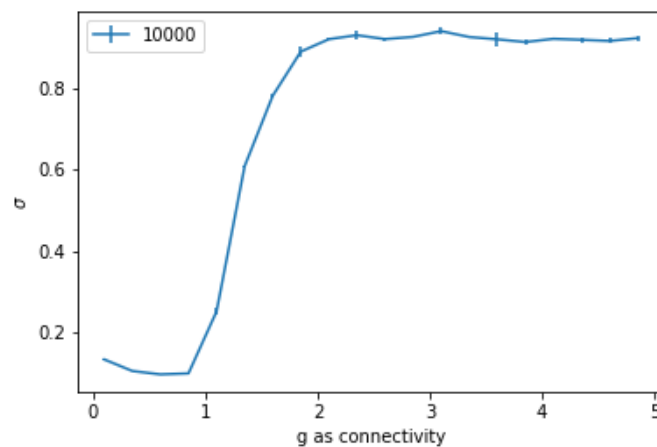
$$N = 10000 *$$

$$t_d = 0.1 s *$$

این شبیه‌سازی برای ۱۰۰۰ ثانیه اجرا شده است که در آن هر گام زمانی برابر ۰/۰۱ ثانیه گرفته شده است. کد شبیه‌سازی در پوشه مسئله همگامی برای مدل انباشت و شلیک قابل مشاهده است.

۱.۴.۳ انحراف از معیار میدان

مهم‌ترین شاخصه ما برای ردگیری همگامی، انحراف معیار میدان E است که با زیگما σ نمایش می‌دهیم. جهش به وجود آمده در شکل (۲) به این معنی است که سامانه از حالت ناهم‌گامی به هم‌گامی تغییر فاز داده است.

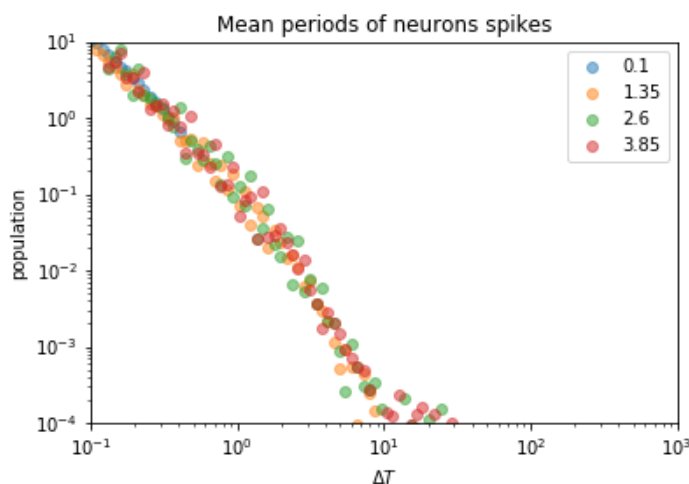


شکل (۲) تغییر فاز از ناهم‌گامی به هم‌گامی برای ۱۰۰۰ نرون

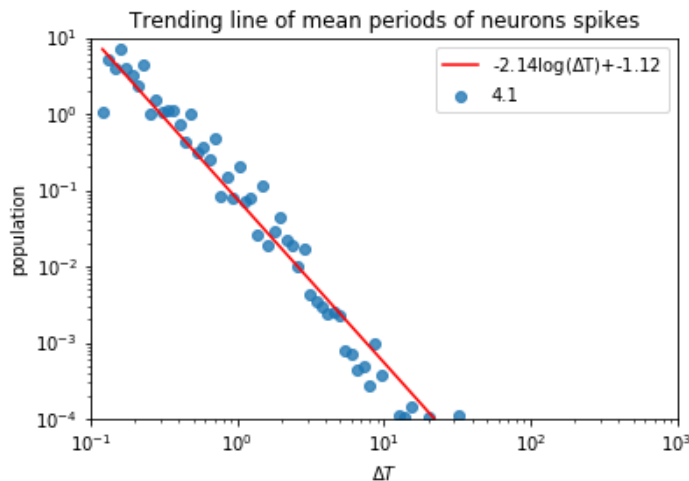
۲.۴.۳ توزیع تناوب زمانی تیزه‌ها

شبکه‌ی ما متشکل از نوروهایایی است که مدام در حال تیزه زدن و فعال نگه‌داشتن شبکه هستند. برخی با بسامد بیشتری تیزه می‌زنند و برخی آهسته‌تر. اگر کنجکاو باشیم که جمعیت کل نوروهای ما چگونه میان دسته‌های مختلف با تناوب‌های متفاوت توزیع شده است؛ لازم است تا توزیع فراوانی آن‌ها را یکجا رسم کنیم - شکل ۳.

همان طور که می بینید به ظاهر این توزیع رفتاری توانی دارد و اگر کنجکاو باشیم می توانیم شیب این نمودار تمام لگاریتمی آن را جهت محاسبه ی نمای توزیع بدست آوریم - شکل ۴.



شکل (۳) توزیع بسامدی شبکه های ۱۰۰۰ نرونی که هر کدام قدرت اتصال متفاوتی دارند.



شکل (۴) محاسبه ی نمای توزیع توانی فاصله زمانی بین تیزه ها

۴ شبکه ی نوروهای چرخنده

در این مدل به جای آن که برای شبکه خود از مدل انباشت-شلیک استفاده کنیم از مدل چرخنده استفاده می کنیم. در این مدل نوروهای ما مانند دوندهایی به دور میدان مثلثاتی می دوند. ما نقطه ی

فاز π را به عنوان علامت برای این دونده‌ها قرار دادیم. هر زمان که دونده‌ای از علامت خود گذشت یک تیزه برای او در نظر می‌گیریم و بلافاصله او را به فاز $-\pi$ باز می‌گردانیم.

برای توصیف فاز هر نورون از معادلات زیر استفاده می‌کنیم:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = I_i - \cos(\theta_i) - gE, & -5\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi \\ \dot{E} = M - \alpha E \\ \dot{M} = -\alpha M + \frac{\alpha}{N} \sum_{n|t_n < t} \delta(t - t_n - t_d) \end{cases} \quad (10)$$

θ_i : مشخص کننده‌ی فاز هر نورون. این فاز میان دو لبه در حال حیات است. کوچکترین کران بالای آن همان حالت آستانه در π است و بزرگترین کران پایین آن نگه‌دارنده‌ای است که از ریزش نورون‌ها جلوگیری می‌کند.

E : میدانی است که شدت فعالیت شبکه را نشان می‌دهد.

M : یک پارامتر فرعی که در حل معادله دیفرانسیل مرتبه دوم به دو معادله‌ی تحول مرتبه اول ما را یاری کرده است.

این مدل نسبت به مدل قبلی شامل ویژگی‌های مثبتی است. یکی از ویژگی‌های خوب آن این است که پس از بازنشانی فاز نورون تیزه زده، فاز آن به زاویه‌ای برده می‌شود که دارای خواص مثلثاتی مشابهی است. به این معنا که دیگر شاهد گسستگی در اندازه‌ی جملاتی که تحول نورون را توصیف می‌کنند؛ نیستیم.

۱.۴ آهنگ تیزه زدن

برای نورونی تنها که پویایی از جنس چرخنده دارد؛ دوره‌ی تناوب تیزه زدن آن بر حسب مجموع جریان ورودی رفتاری مطابق زیر دارد [۲]:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{I^2 - 1}} \quad (11)$$

این به این معناست که مدل چرخنده و انباشت‌وشلیک اگر چه هر دو با افزایش جریان، بسامد تیزه زدنشان افزایش می‌یابد اما رفتار تغییر آن به دو گونه‌ی متفاوت صورت می‌پذیرد. این نکته‌ی مهمی است که در هنگام مقایسه‌ی دو مدل باید به خاطر داشته باشیم.

۲.۴ نشانگر توسعه یافته‌ی تشخیص همگامی

برای تشخیص هم‌گامی از یک پارامتر دیگری که در این مقاله [۲] توسط نویسندگان ابداع شده‌است؛ بهره می‌بریم.

$$s = \langle [\frac{1}{N_a} \sum_{i_a} \sin(\theta_{i_a})]^2 \rangle_t \quad (12)$$

میانگین‌گیری بالا روی ۱۰۰۰ گام آخر زمانی انجام می‌شود. این فاصله زمانی باید حتماً بزرگ‌تر از گام‌های زمانی تحول ریزمقیاس آن باشد. همچنین برای این متوسط‌گیری نوروهای را مدنظر می‌گیریم که در منطقه ی فعال قرار گرفته‌اند. منطقه‌ی فعال، سمت چپ دایره مثلثاتی است.

۳.۴ شبیه‌سازی

ثوابت مسئله را به گونه‌ی زیر انتخاب می‌کنیم.

$$\alpha = 20 \text{ s}^{-1} *$$

* جریان‌های تصادفی خارجی نوروها از اعضای بازه‌ی (۳/۵, ۱۳/۵) انتخاب می‌شوند. این بازه به گونه‌ای انتخاب شده است که یک نرون تنها با دینامیک چرخنده، بسامدی داشته باشد که نرون تنها با دینامیک انباشت‌وشلیک در بازه‌ی (۱/۲, ۲/۸) داشت.

$$N = 10000 *$$

$$t_d = 0.1 \text{ s} *$$

حال شبکه‌ی خود را به ازای قدرت اتصال‌های مختلف اجرا می‌کنیم تا مجدداً تحقیق کنیم که چگونه تغییر در قدرت اتصال g می‌تواند باعث شود تا تغییر فاز از ناهم‌گامی به هم‌گامی رخ دهد. برای مشاهده‌ی دفترچه شبیه‌سازی به آدرس [مسئله همگامی برای مدل چرخنده](#) مراجعه کنید.

۴.۴ نتایج

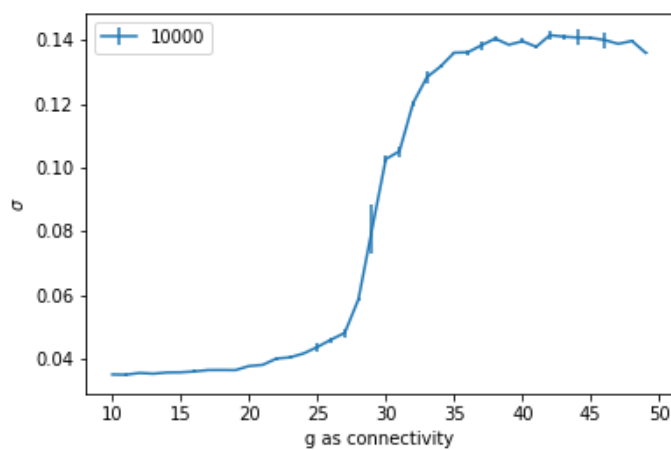
مرتب‌ی اجرای این الگوریتم خطی است و برای یک شبکه شامل ۱۰۰۰ نرون و برای ۱۰۰۰۰ گام شبیه‌سازی زمانی در حدود ۴ ثانیه به طول می‌انجامد.

۱.۴.۴ در جستجوی تغییر فاز

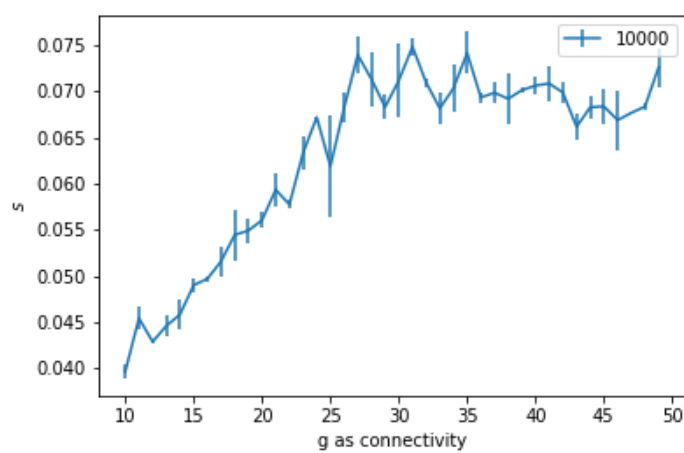
پس از رصد کردن تغییرات رفتار سیستم بر حسب قدرت مهار نوروها، تغییر فاز مانند مدل قبلی مشاهده شد اما مکان تغییر فاز تغییر کرد و حول $g = 30$ قرارگرفت. این تغییر فاز در دو شکل ۵ و ۶ قابل مشاهده است.

۲.۴.۴ نوروهای خاموش

در حین شبیه‌سازی متوجه شدیم که در ناحیه‌ای که به فاز هم‌گامی در حال گذار هستیم؛ جمعیت نوروهای که همیشه خاموش هستند؛ در حال گسترش است - شکل ۷. هر چه قدر قدرت مهار

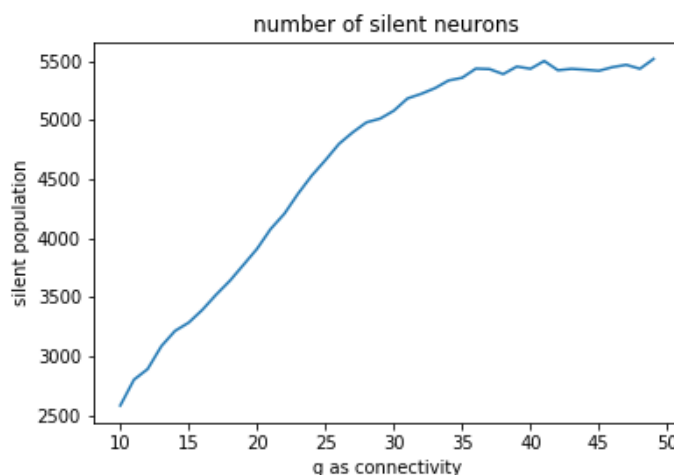


شکل (۵) پهنای جریان یک سامانه چرخنده با ده هزار نرون



شکل (۶) پارامتر نظم تعریف شده در رابطه ۱۲ برای مدل چرخنده

نورون‌ها را زیاد می‌کنیم؛ این تعداد بیشتر می‌شود. همچنین شایان ذکر است که پس از تغییر فاز این مقدار به اشباع می‌رسد و تعداد نورون‌های فعال به ثبات می‌رسند.



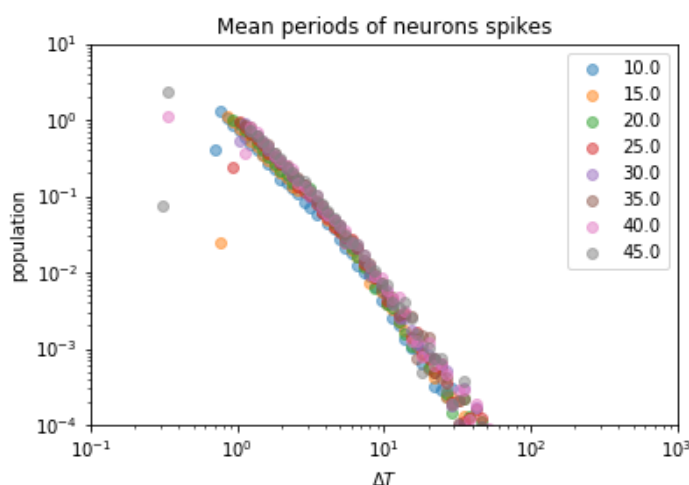
شکل (۷) تعداد نورون‌های خاموش بر حسب قدرت مهار نورون‌ها

۳.۴.۴ فاصله زمانی بین تیزه‌ها

حال که دیدیم برخی نورون‌ها همواره خاموش می‌مانند و یا به عبارتی دوره‌ی تیزه زدن آن‌ها بینهایت است؛ خوب است که دوره‌ی تیزه زدن‌های نورون‌های دیگر را نیز بررسی کنیم. شکل ۸ این شکل نمایان‌گر آن است که توزیع دوره‌ها به توزیع بی‌توانی و رفتار بی‌مقیاس نزدیک است. با این مشاهده، کنجکاو می‌شویم تا نمای بحرانی را برای آن حساب کنیم. در شکل ۹ با گذراندن یک خط بر داده‌های بدست آمده از شبکه‌ای با قدرت مهار ۴۵ را می‌بینیم.

۴.۴.۴ فعالیت شبکه

همان طور که دیدیم تعدادی از نورون‌ها در شبکه به حالت خاموش درمی‌آیند. قابل حدس است که اگر جمعیتی خاموش در شبکه داشته باشیم؛ احتمالاً آنهایی هستند که جریان تصادفی اولیه آن‌ها از بقیه کمتر است. برای تحقیق این حدس لازم است تا تعداد تیزه‌های نورون‌های شبکه را بر حسب جریان تصادفی اولیه آن‌ها مرتب کنیم. شکل ۱۰ نشانگر سامانه‌ای از ده هزار نورون است که با قدرت $g = 50$ روی هم تاثیر می‌گذارند. لازم به ذکر است که این رفتار در فاز هم‌گام قابل مشاهده است. در فاز ناهم‌گام تمام نورون‌ها که از هم تاثیر کمتری می‌پذیرند؛ فعال هستند. تعداد تیزه‌های کل شبکه رابطه‌ی مستقیمی با جریان خارجی جاری در شبکه دارد. می‌توانیم با محاسبات تحلیلی نیز به شکل بدست آمده از شبیه‌سازی عددی نزدیک شویم:



شکل (۸) فاصله‌ی زمانی بین تیزه زدن‌ها

$$\begin{cases} I_{in} &= -g \int_{a_{min}}^{a_{max}} p(a) f(a + I_{in}) da \\ f(a) &= \frac{\sqrt{a^2 - 1}}{2\pi} \end{cases} \quad (۱۳)$$

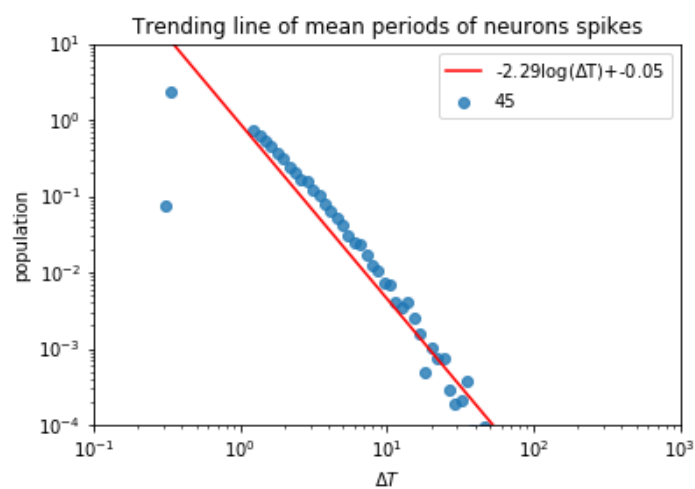
در رابطه ۱۳، $f(a)$ تابع فعالیت (تعداد تیزه بر ثانیه) تک نورون بر حسب جریان کل ورودی آن است. همچنین I_{in} تمام جریان خارجی جاری در شبکه است. حل این رابطه کمی دشوار است زیرا جریان کل را بر حسب خودش محاسبه کرده است. اما از آنجایی که در انتگرال ده تنها یک جابجایی ثابت رخ داده است؛ صورت کلی پاسخ انتگرال تغییر نمی‌کند و به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$I_{in} = \frac{-g}{2} (-a\sqrt{-1 + a^2} + \log(a + \sqrt{-1 + a^2})) \Big|_{a_{min} + I_{in}}^{a_{max} + I_{in}} \quad (۱۴)$$

۵ تلاش برای توصیف

حال که دو نوع فاز از سامانه‌ی خود را مشاهده کردیم و هر کدام را به تصویر کشیدیم؛ خوب است در مورد چگونگی گذار از یک حالت به حالت دیگر بحث کنیم. مشخصا باید بپرسیم که چه اتفاقی در سامانه‌ی ما رخ می‌دهد که منجر به تغییر رفتار جریان داخلی E می‌شود. هر کدام از مشخصه‌های این سری زمانی چیست. حول چه میانگینی در حال نوسان است. اندازه‌ی نوسانات آن چقدر است. آیا یک بسامد مشخص دارد؟ یا یک برهم‌نهی از امواج با بسامدهای متفاوت است.

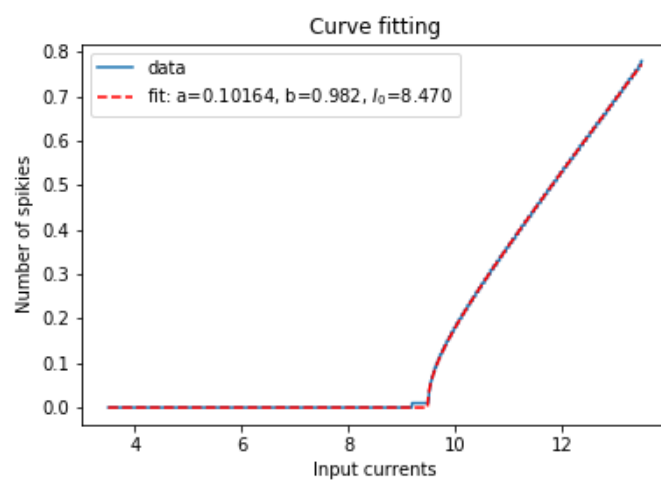
قابل ملاحظه است که در فاز هم‌گام لحظه‌ای وجود دارد که هیچ یک از نورون‌های سامانه تیزه نمی‌زند. به این معنا که در آن لحظه محرکی برای برافروختن میدان E وجود ندارد و زیر پای آن خالی می‌شود.



شکل (۹) محاسبه‌ی نمای بحرانی

۱.۵ جریان داخلی در فاز ناهم گام

۲.۵ جریان داخلی در فاز هم گام



شکل (۱۰) تعداد تیزه بر حسب جریان تصادفی برای سامانه‌ای با ده هزار نورون و ضریب تاثیر $g = 50$

مراجع

- [1] Luccioli, Stefano and Politi, Antonio. Irregular collective behavior of heterogeneous neural networks. *Phys. Rev. Lett.*, 105:158104, Oct 2010. [2](#)
- [2] Safaeesirat, Amin and Moghimi-Araghi, Saman. Critical behaviour at the onset of synchronization in a neuronal model, 2020. [8](#)