



دانشکده‌گان علوم  
دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر

محمد زمانی - ۶۱۰۳۹۹۱۳۵

گزارش پروژه اول علوم اعصاب محاسباتی

همانطور که صورت پروژه از ما خواسته است هر سه مدل نورونی را با توجه به تعاریف آن‌ها به صورت مجزا پیاده کرده‌ایم و پیاده سازی آن‌ها را می‌توانید در فایل پیوست شده مشاهده فرمایید.

## الف

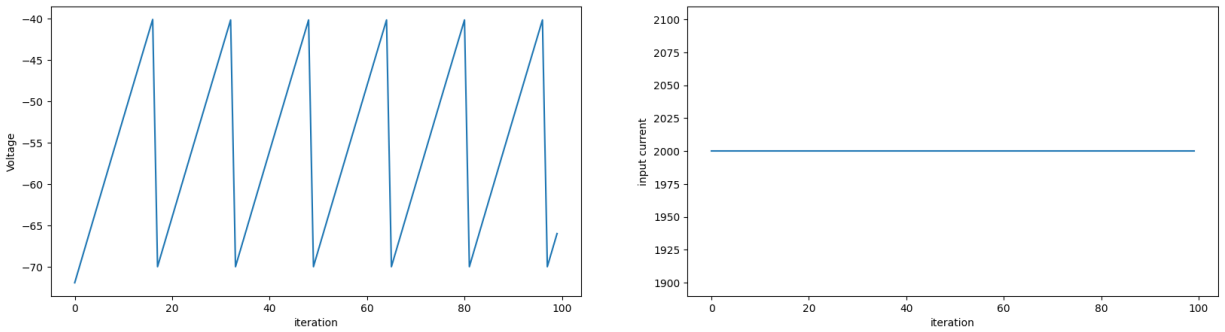
در این بخش همانطور که در صورت سوال هم به آن‌ها اشاره شده است، ما چند نوع جریان را پیاده کرده ایم که عبارتند از:

- **جریان ثابت:** در این حالت جریان ورودی در هر لحظه یک مقدار ثابتی خواهد بود و تغییری نخواهد داشت.
  - **جریان تک پله‌ای:** در این حالت جریان ورودی تا مدت زمانی که می‌توانیم خودمان آن را تعیین کنیم جریان صفر خواهد بود و بعد از آن نیز به یک عدد ثابت افزایش خواهد یافت.
  - **جریان پله‌ای:** در این حالت جریان از صفر شروع به زیاد شدن می‌کند و این افزایش به صورت یک تابع پله‌ای است.
  - **جریان سینوسی:** در این حالت جریان ورودی ما به شکل تابع سینوس خواهد بود با این تفاوت که مقادیر آن را در یک عدد ثابت ضرب خواهیم کرد و با یک عدد ثابت جمع می‌کنیم تا جریان ما در بازه بزرگتری قرار گیرد.
- حال می‌توانیم نتایج بدست آمده را برای هر یک از مدل‌های نورونی مشاهده کنیم:

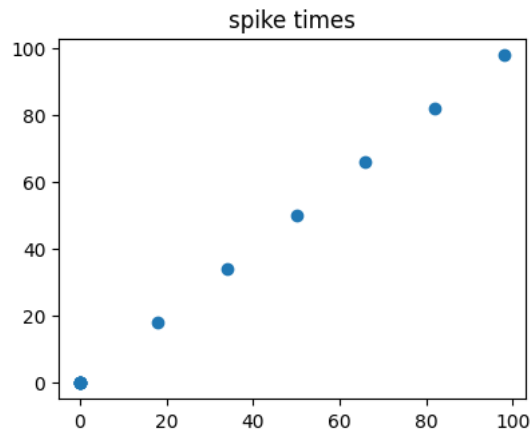
## مدل نورونی LIF

### جریان ثابت

در این حالت از آنجایی که یک جریان ثابت به نورون می‌دهیم و از طرفی مدل ما یک مدل LIF خطی است بنابراین نورون شروع می‌کند به ضربه زدن با یک نرخ ثابت که همچنین می‌توانید نرخ آن را در شکل ۲ مشاهده کنید.



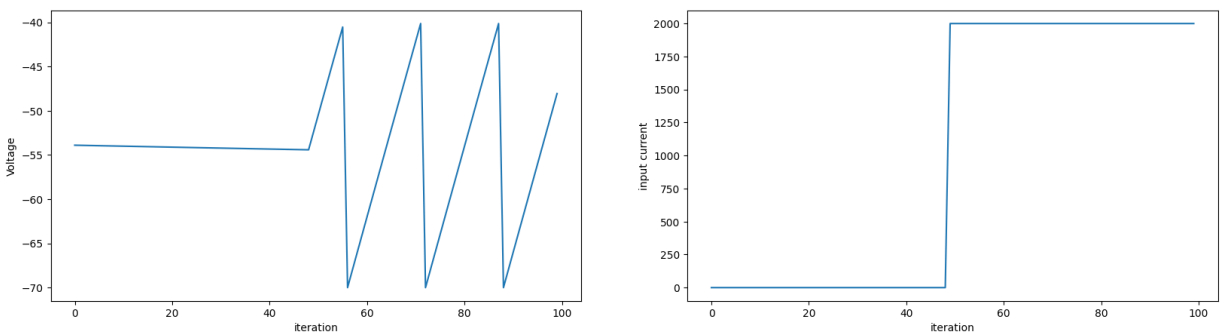
شکل ۱: تغییرات پتانسیل مدل نورونی LIF با جریان ثابت



شکل ۲: نمودار زمان ضربه بر اساس مرحله شبیه سازی

## جریان تک پله‌ای

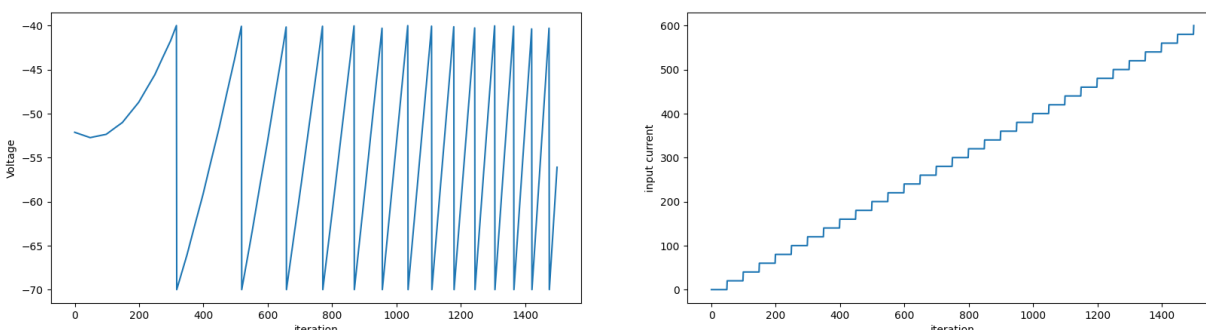
در این حالت همانطور که مشاهده می‌کنید در ابتدا که جریان ورودی نداریم نورون با سرعت کمی شروع می‌کند تا به حالت استراحت خودش برسد اما به محض اینکه ورودی به آن می‌دهیم از انجایی که جریان ثابت است، دقیقاً نورون رفتاری مشابه حالت قبل خواهد داشت و با نرخ ثابتی ضربه خواهد زد.



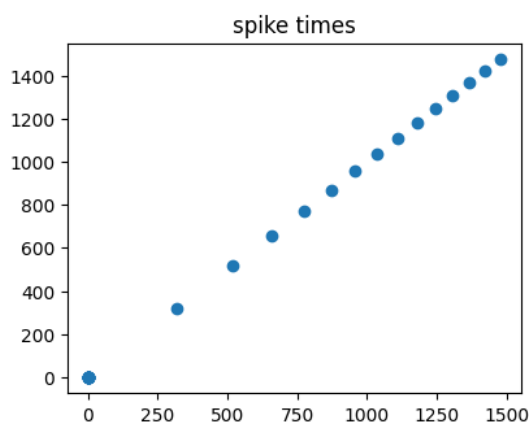
شکل ۳: تغییرات پتانسیل مدل نورونی LIF با جریان تک پله ای

## جریان پله‌ای

در این حالت همانطوری که مشاهده می‌کنید در گذر زمان که جریان ورودی مقدار بیشتری خواهد داشت در نتیجه با نرخ سریعتری نورون ضربه خواهد زد و هر چه که به جلوتر می‌رویم این نرخ بیشتر و بیشتر می‌شود که می‌تواند نرخ ضربه زدن را در شکل ۵ مشاهده کنید.



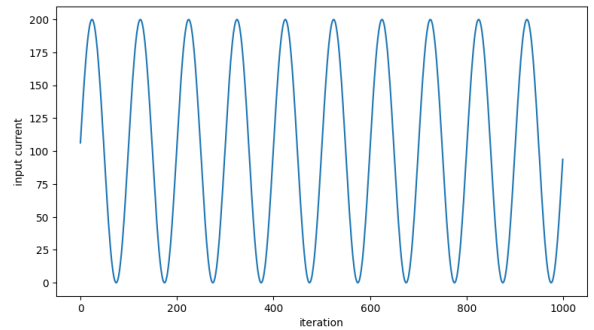
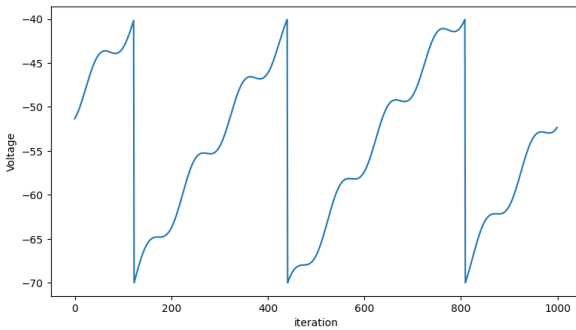
شکل ۴: تغییرات پتانسیل مدل نورونی LIF با جریان پله‌ای



شکل ۵: نمودار زمان ضربه بر اساس مرحله شبیه سازی

## جریان سینوسی

در این حالت زمانی که جریان ما در حال بیشتر شدن است اختلاف پتانسیل درون نورون کمتر می‌شود اما زمانی که جریان کاهشی است با نرخ کمتری اختلاف پتانسیل کاهش می‌یابد و با توجه به این مسئله نورون پس از چند بار افزایش جریان ضربه خواهد زد و این ضربه زدن هم چون یک مدل خطی و بدون خاصیت تطبیق پذیری داریم یک نرخ کاملاً ثابت خواهد داشت.

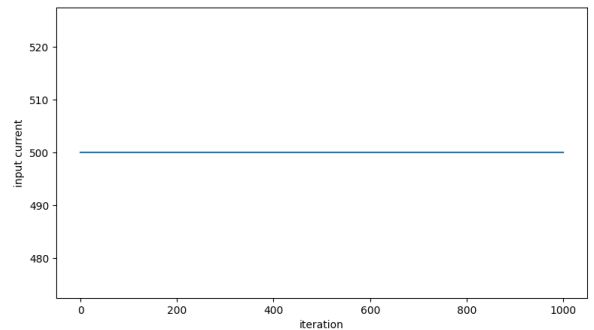
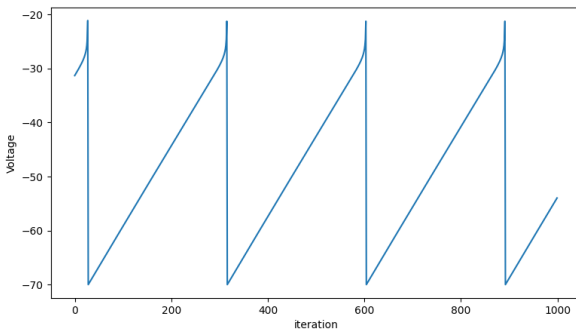


شکل ۶: تغییرات پتانسیل مدل نوروئی LIF با جریان سینوسی

## مدل نوروئی ELIF

همانطور که نتایج را برای این مدل مشاهده می‌کنید زمان های ضربه در مدل های نوروئی ELIF کاملاً مشابه مدل های نوروئی LIF است و کاملاً رفتارهای مشابهی دارند با این تفاوت که این مدل های نوروئی مکانیزم ضربه زدن های نوروئی واقعی را که یک جهش در اختلاف پتانسیل آنها شکل می‌گیرد در موقع ضربه را شبیه سازی می‌کند که می‌توانید آن را برای همه جریان های متفاوت مشاهده کنید، البته نکته ای که وجود دارد این است که از آنجایی که اختلاف پتانسیل نوروئی بعد از عبور از مقدار  $\theta_{rh}$  رشد سریعی دارد و از آنجایی که در شبیه سازی رزلوشن بالایی نداریم برخی از پتانسل های فعالیت<sup>۱</sup> به صورت کامل به نمایش گذاشته نشده‌اند.

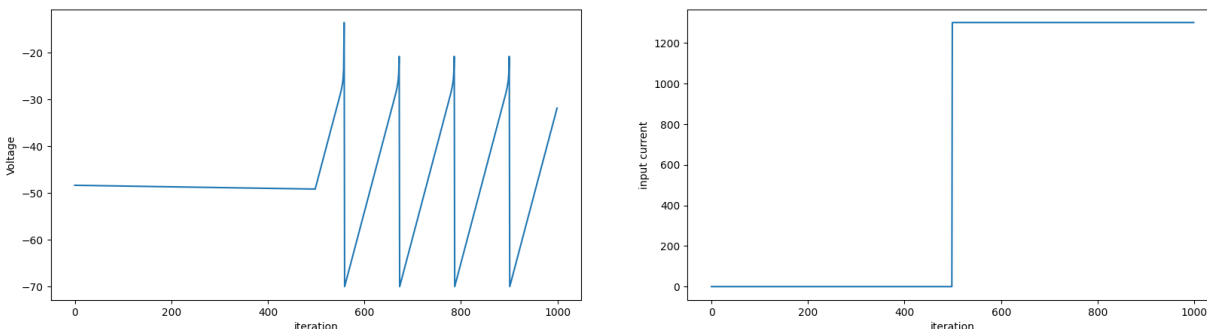
## جریان ثابت



شکل ۷: تغییرات پتانسیل مدل نوروئی ELIF با جریان ثابت

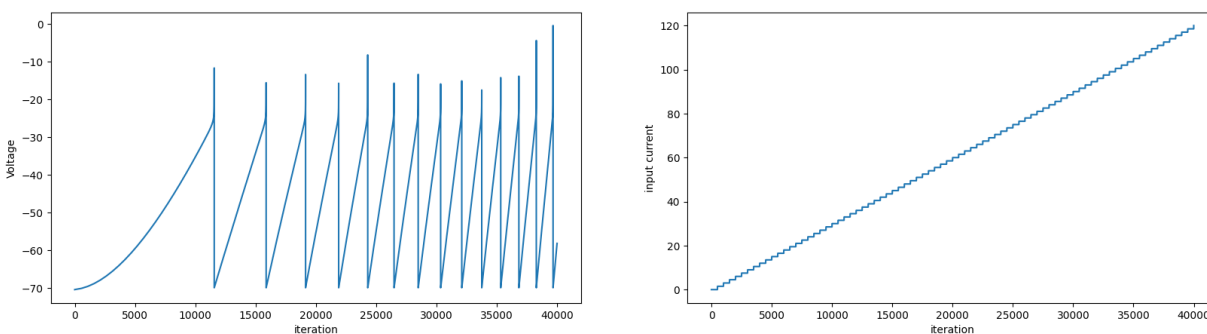
<sup>1</sup>action potential

## جریان تک پله‌ای



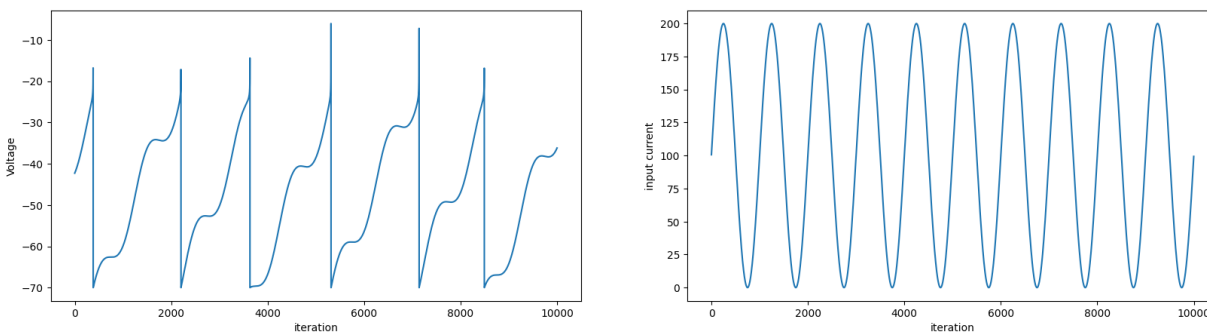
شکل ۸: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان تک پله ای

## جریان پله‌ای



شکل ۹: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان پله‌ای

## جریان سینوسی



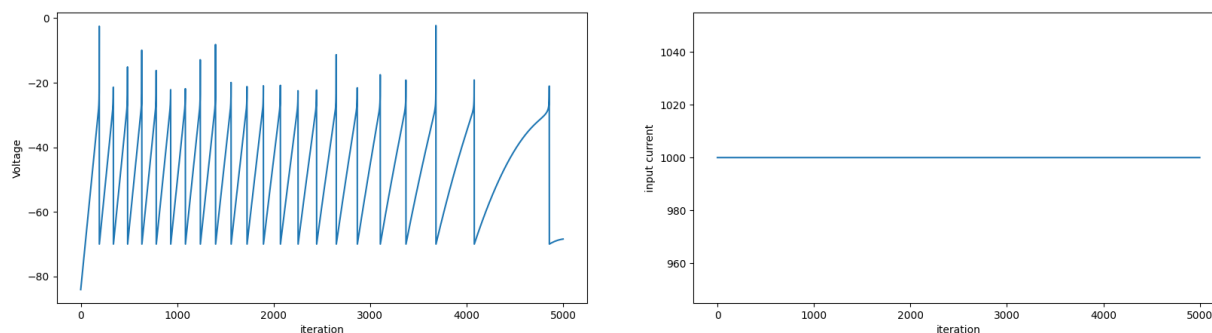
شکل ۱۰: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان سینوسی

## مدل نورونی AELIF

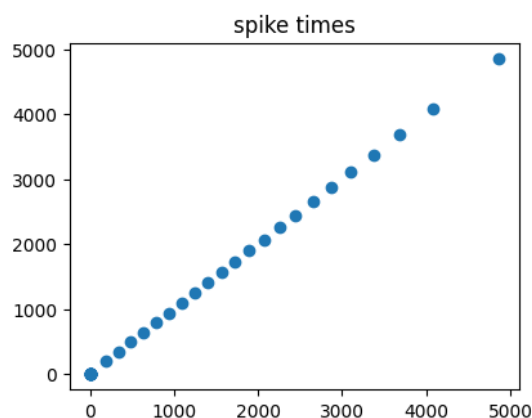
مهمترین خصیصه و هدفی که ما در این مدل به دنبال آن بودیم شبیه سازی خاصیت تطبیق پذیری نورن ها است، نورن های واقعی بعد از اینکه ورودی ثابتی برای مدت زمان طولانی به آن ها وارد می شوند به آن عادت می کنند و این باعث می شود که میزان حساسیت آن ها به مرور زمان کمتر شده و البته اگر این جریان ثابت را قطع کنیم این عادت به مرور از بین خواهد رفت، پس چیزی که در این مدل باید انتظار داشته باشیم این است که رفتار تطبیق پذیری را در آن ها مشاهده کنیم.

## جریان ثابت

در این حالت که به نورن جریان ثابت می‌دهیم بعد از مدتی به صورت کم کم نورون ما به این ورودی عادت می‌کند و خاصیت تطبیق پذیری نورون ما باعث می‌شود که نرخ ضربه در نورون ما کاهش یابد که این را به وضوح می‌توانید در شکل ۱۲ مشاهده کنید.



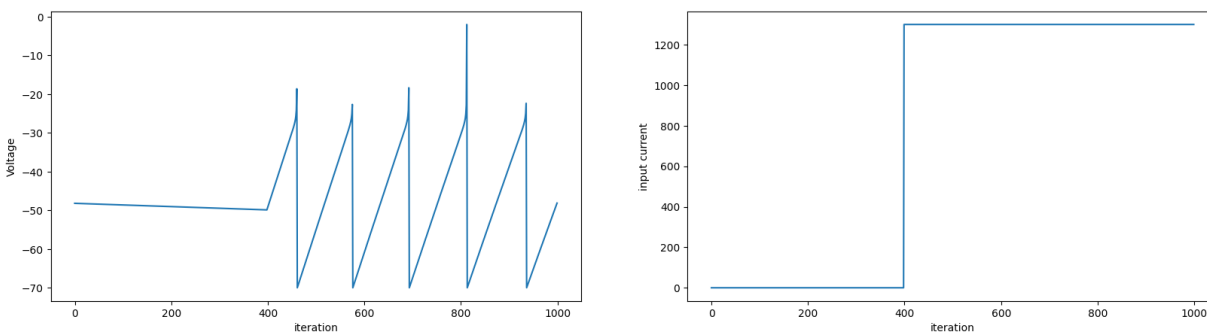
شکل ۱۱: تغییرات پتانسیل مدل نورونی AELIF با جریان ثابت



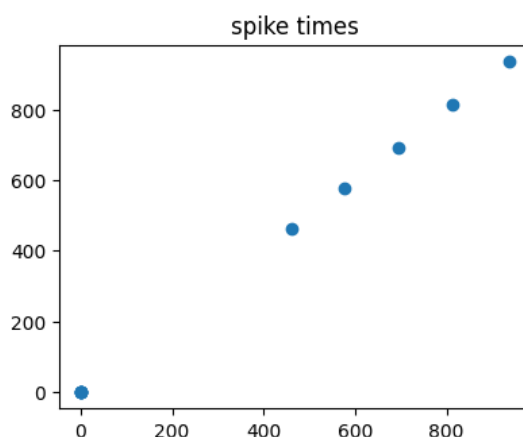
شکل ۱۲: نمودار زمان ضربه بر اساس مرحله شبیه سازی

## جریان تک پله‌ای

این حالت نیز تا زمانی که ورودی نداریم اختلاف پتانسیل نورون آهسته آهسته به سمت حالت استراحت می‌رود و بعد از اینکه یک جریان با نرخ ثابت وارد می‌شود مشابه قسمت قبل نورون شروع به ضربه زدن می‌کند اما نرخ این ضربه ها با توجه به خاص تطبیق پذیری نورون به مرور زمان کاهش پیدا می‌کند شکل ۱۴.



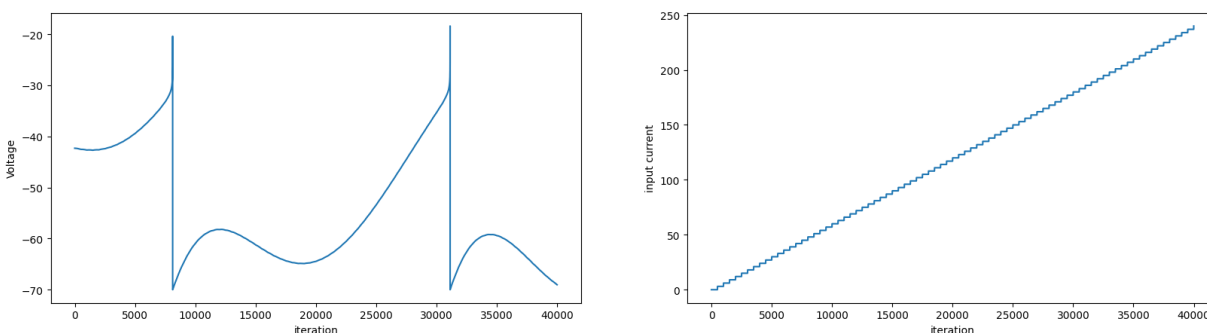
شکل ۱۳: تغییرات پتانسیل مدل نورونی AELIF با جریان تک پله ای



شکل ۱۴: نمودار زمان ضربه بر اساس مرحله شبیه سازی

## جریان پله ای

در این حالت جریان که مرور زمان زیاد و زیاد تر می شود و طبعا اختلاف پتانسیل نورون به سمت حد آستانه حرکت خواهد کرد، اما از آنجایی که خاصیت تطبیق پذیری در نورون وجود دارد باعث می شود نرخ ضربه زدن نورون پایین باشد.

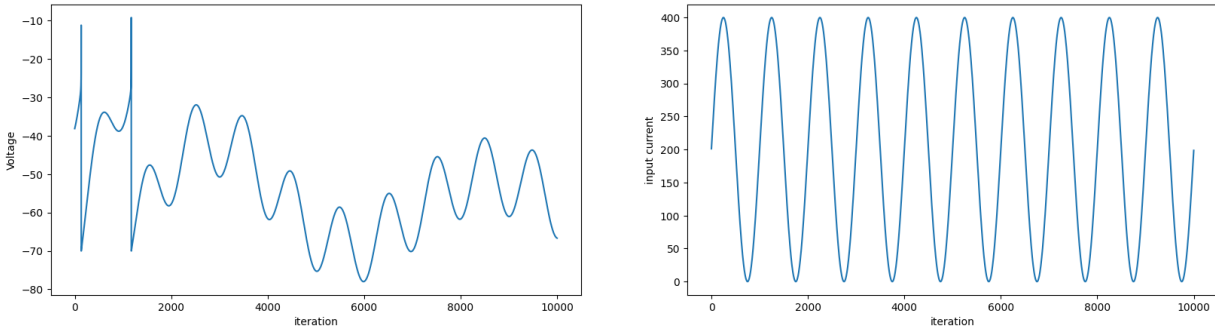


شکل ۱۵: تغییرات پتانسیل مدل نورونی AELIF با جریان پله ای

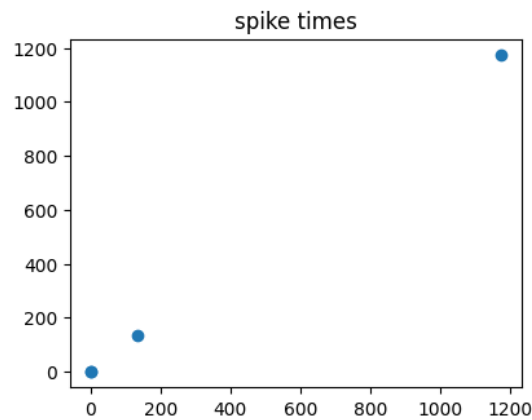
## جریان سینوسی

در این حالت از آنجایی که جریان ما یک الگوی کاملاً یکسان را طی می کند نورون به آن عادت می کند و از جایی به بعد اجازه نمی دهد نورون به راحتی وارد حالت ضربه شود و به نوعی با این ورودی مثل یک نویز برخورد خواهد کرد که نرخ ضربه آن را

می‌توانید در شکل ۱۷ مشاهده کنید.



شکل ۱۶: تغییرات پتانسیل مدل نورونی AELIF با جریان سینوسی



شکل ۱۷: نمودار زمان ضربه بر اساس مرحله شبیه سازی

## ب

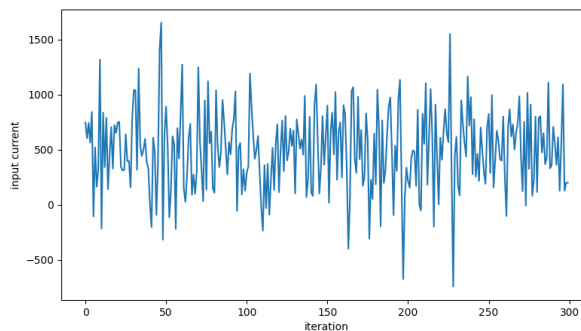
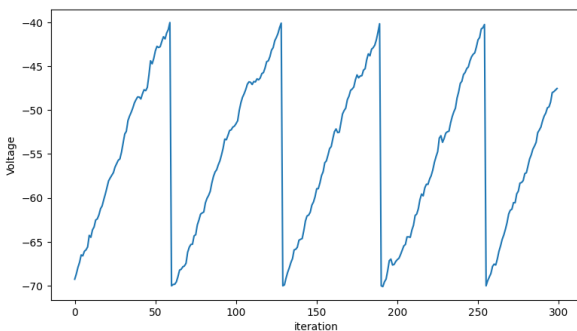
در این قسمت دو جریان ورودی نویزی را پیاده کردیم که دارای توزیع های نرمال و یا یکنواخت خواهند بود، سپس نمودار تغییرات اختلاف پتانسیل نورون‌ها را با این جریان‌ها رسم کردیم. نکته ای که وجود دارد در این حالت به یکی از جریان‌های موجود یک مقدار خاص نویز وارد نکرده‌ایم، بلکه کاملاً یک جریان نویزی و رندوم را به نورون داده‌ایم و رفتار نورون را مورد بررسی قرار داده‌ایم.

## مدل نورونی LIF

به طور کلی از آنجایی که نرخ کاهش اندازه اختلاف پتانسیل در این مدل نورونی کم است، ما مشاهده می‌کنیم که زمان‌هایی که جریان‌ها مقدار کمی دارند اندکی اندازه اختلاف پتانسیل شروع به کاهش می‌کند و اما به صورت کلی اندازه اختلاف پتانسیل در حال افزایش است و در نتیجه نورون ضربه می‌زند و به طور کلی می‌توان گفت که این نورون‌ها با یک نرخ ثابتی ضربه می‌زنند.

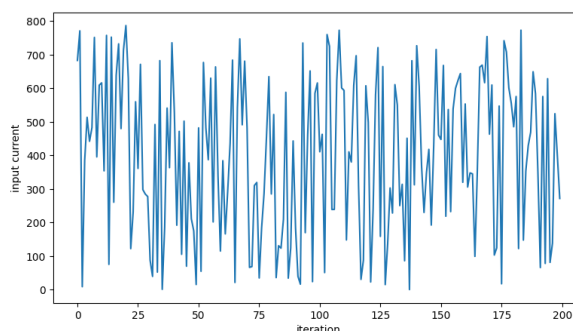
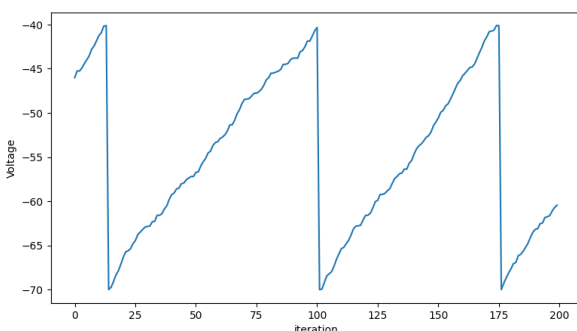


## جریان نویزی با توزیع نرمال



شکل ۱۸: تغییرات پتانسیل مدل نورونی LIF با جریان نویزی با توزیع نرمال

## جریان نویزی با توزیع یکنواخت

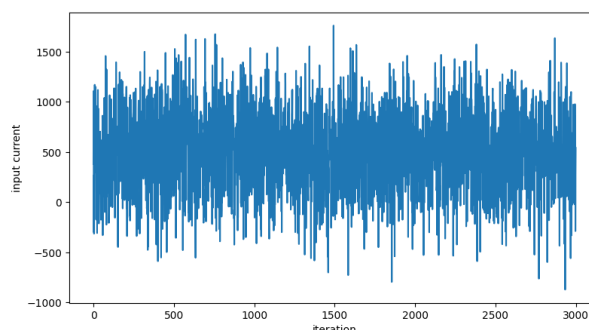
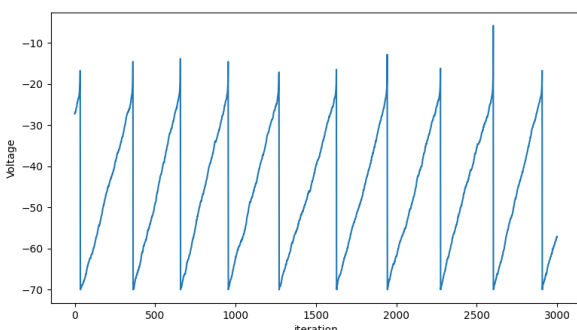


شکل ۱۹: تغییرات پتانسیل مدل نورونی LIF با جریان نویزی با توزیع یکنواخت

## مدل نورونی ELIF

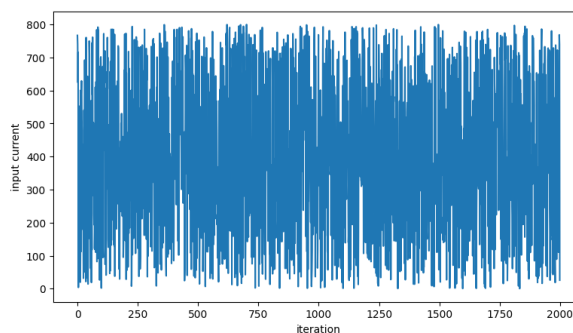
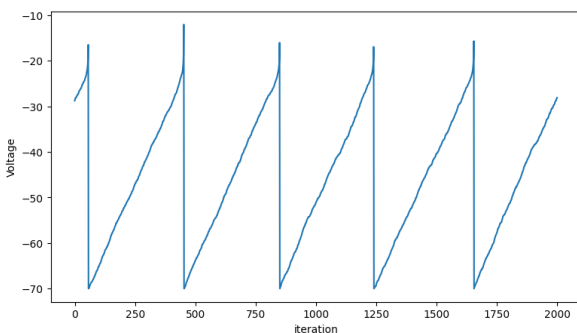
این مدل نیز دقیقاً مانند مدل نورونی قبل عمل می‌کند با این تفاوت که سعی می‌کنند پتانسیل فعالیت را نیز شبیه سازی کنند.

## جریان نویزی با توزیع نرمال



شکل ۲۰: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان نویزی با توزیع نرمال

## جریان نویزی با توزیع یکنواخت

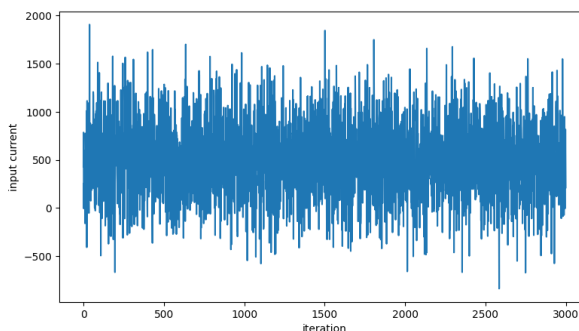
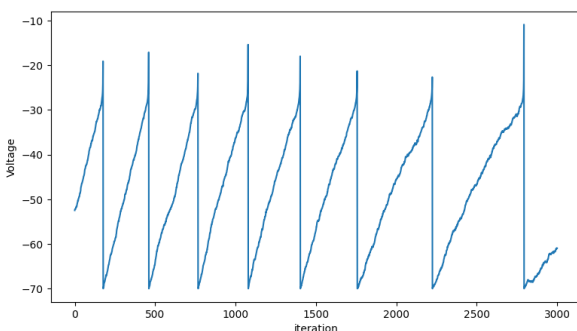


شکل ۲۱: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان نویزی با توزیع یکنواخت

## مدل نورونی AELIF

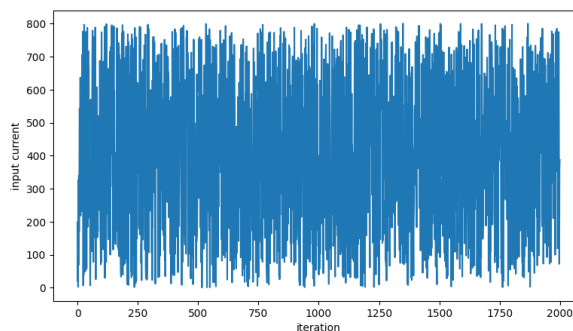
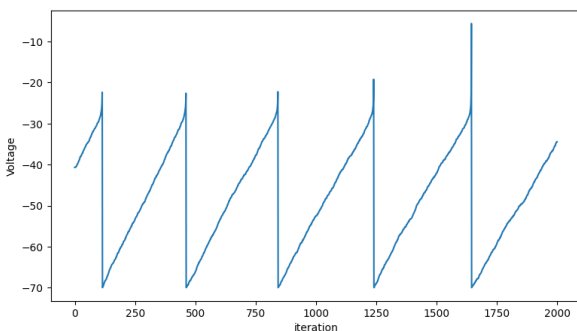
در این مدل از آنجایی که خاصیت تطبیق پذیری را داریم مطابق انتظار بعد از مدت زمانی نوروں ما به نویز وارده عادت می‌کند و با نرخ کمتری ضربه می‌زند که می‌تواند این موضوع را در شکل ۲۴ مشاهده کنید.

## جریان نویزی با توزیع نرمال

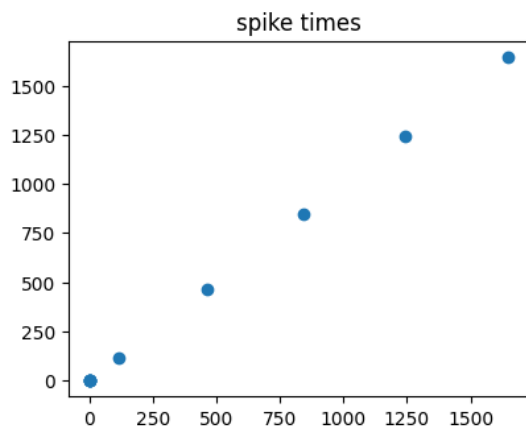


شکل ۲۲: تغییرات پتانسیل مدل نورونی AELIF با جریان نویزی با توزیع نرمال

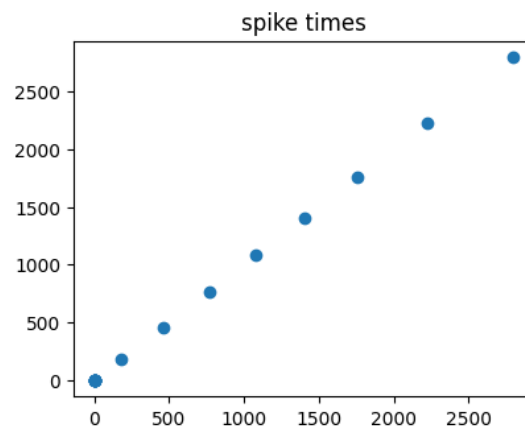
## جریان نویزی با توزیع یکنواخت



شکل ۲۳: تغییرات پتانسیل مدل نورونی AELIF با جریان نویزی با توزیع یکنواخت



(ب) جریان ورودی نویزی با توزیع پکنواخت



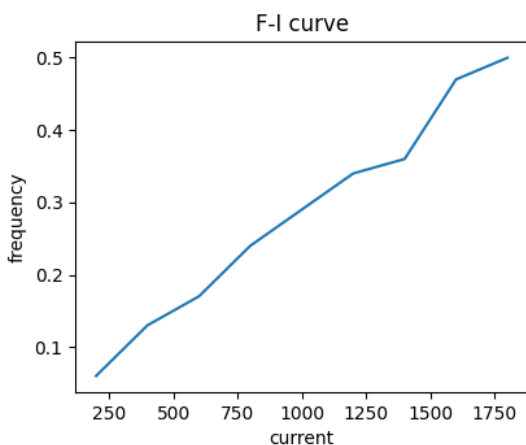
(آ) جریان ورودی نویزی با توزیع نرمال

شکل ۲۴: نرخ ضربه برای مدل نورنی AELIF

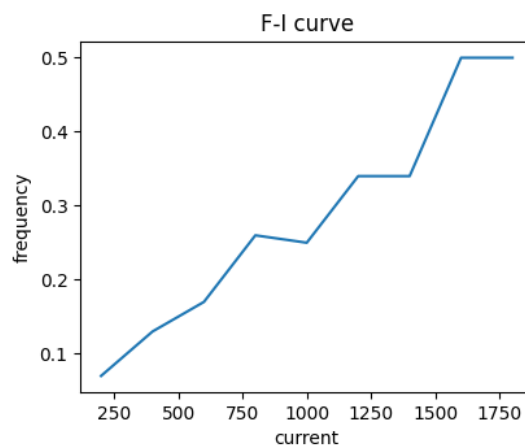
## ج

برای هر یک از مدل‌های نورونی با استفاده از جریان‌های ثابت متفاوت، فرکانس را اندازه می‌گیریم و در نهایت نتایج به عنوان نمودار ارائه می‌دهیم.

**نکته مهم:** ما فرکانس را نسبت تعداد کل ضربه‌ها به تعداد مراحل شبیه‌سازی در نظر گرفته ایم.

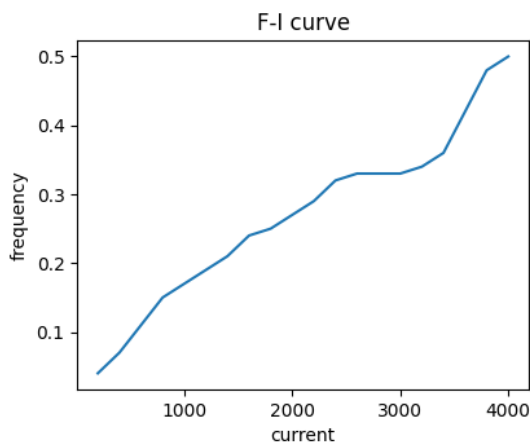


(ب) جریان ثابت با نویز نرمال

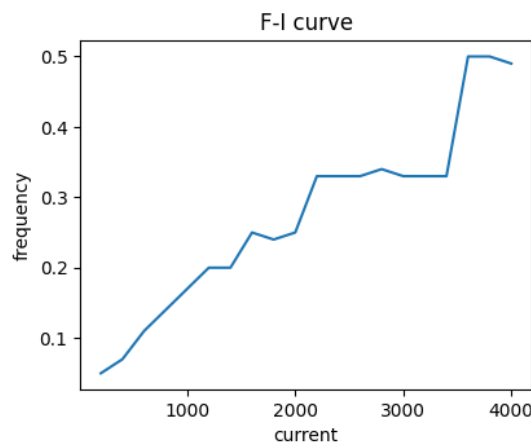


(آ) جریان ثابت بدون نویز

شکل ۲۵: نمودار جریان-فرکانس برای مدل نورنی LIF

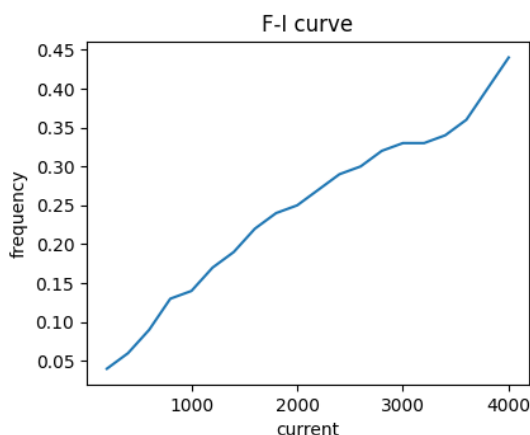


(ب) جریان ثابت با نویز نرمال

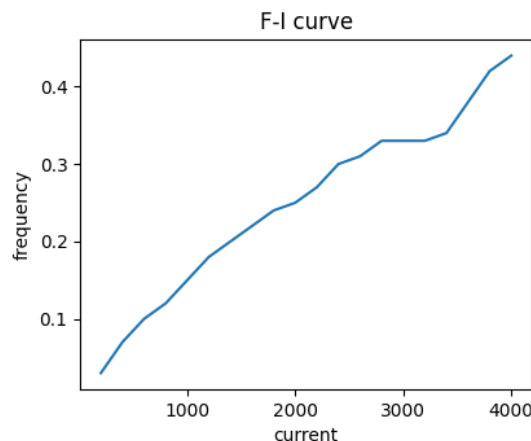


(آ) جریان ثابت بدون نویز

شکل ۲۶: نمودار جریان-فرکانس برای مدل نورنی ELIF



(ب) جریان ثابت با نویز نرمال



(آ) جریان ثابت بدون نویز

شکل ۲۷: نمودار جریان-فرکانس برای مدل نورنی AELIF

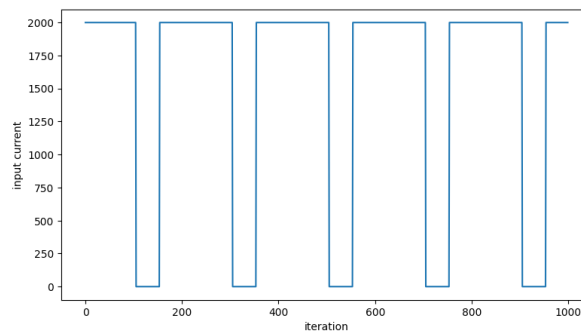
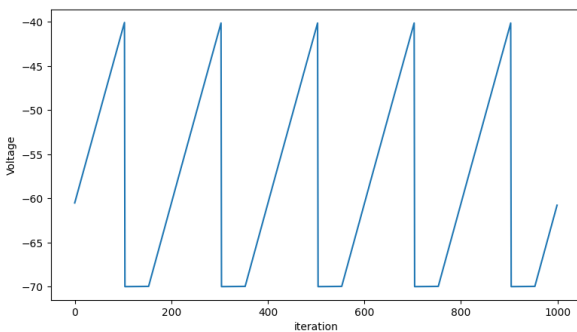
همانطور که در همه مدل‌ها مشاهده می‌کنید، زمانی که به نورون نویز وارد می‌کنیم، نمودار جریان-فرکانس حاصل صاف‌تر و هموارتر<sup>۲</sup> خواهد بود به طوری که هر چه میزان این نویز بیشتر باشد، نمودار صاف‌تر است و مانند  $y = x$  می‌شود، در صورتی که وقتی جریان نویزی نیست، تابع ما بیشتر شکل پله‌ای دارد و با افزایش جریان به صورت پله‌ای فرکانس زیاد می‌شود. البته در مدل نورنی AELIF از آنجایی که خاصیت تطبیق‌پذیری داریم، مدل ما به نویز حساسیت کمتری دارد، پس خیلی تغییر زیادی حس نخواهیم کرد و در حالتی که نویز وارد کردیم و بدون نویز بودیم تفاوت چندانی در رفتار نورون نمی‌توان مشاهده کرد مگر اینکه مقدار نویز را خیلی بیشتر کنیم.

## ۵

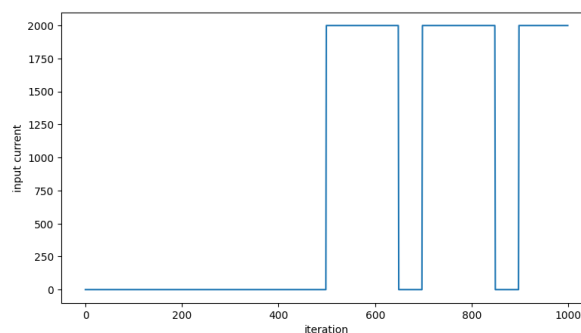
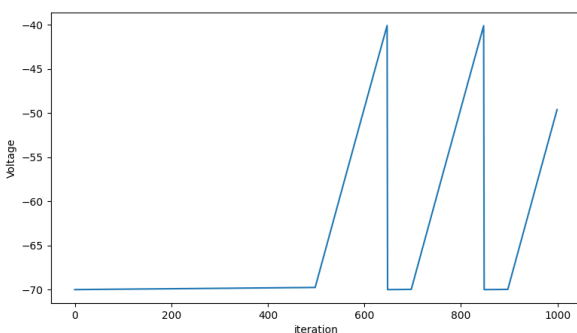
برای افزودن Refractory بعد از هر ضربه تا یک مدت زمان مشخص جریان ورودی را قطع می‌کنیم تا این فرآیند شبیه سازی شود، که نتایج آن را برای تمامی مدل‌ها و ورودی‌هایی که تا به این لحظه ارائه دادیم به نمایش خواهیم گذاشت:

<sup>2</sup>Smooth

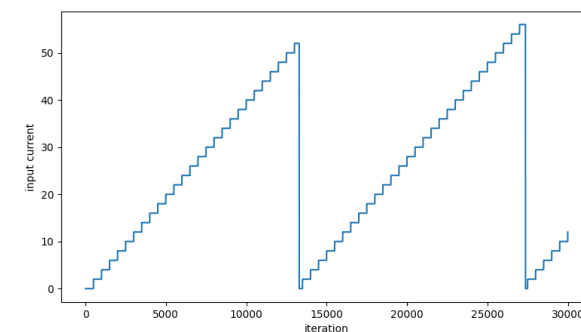
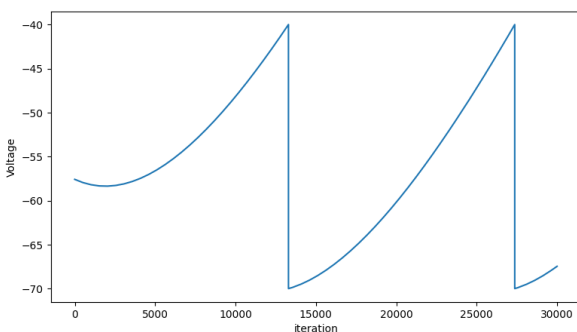
## مدل نرونی LIF



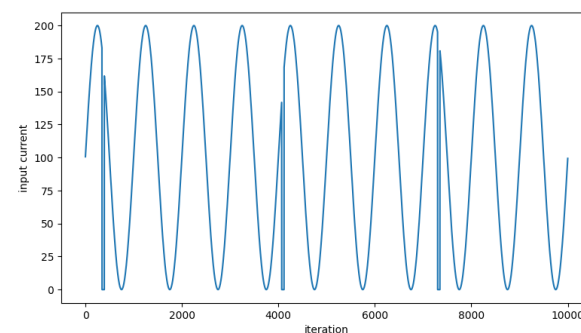
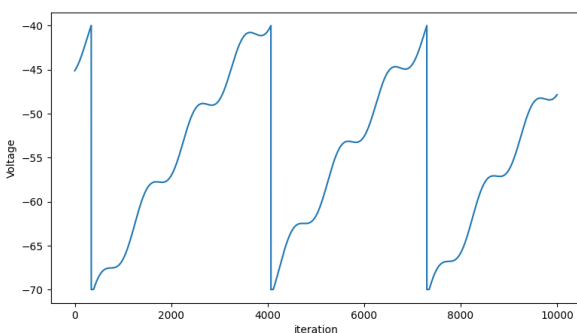
شکل ۲۸: تغییرات پتانسیل مدل نرونی LIF با جریان ثابت



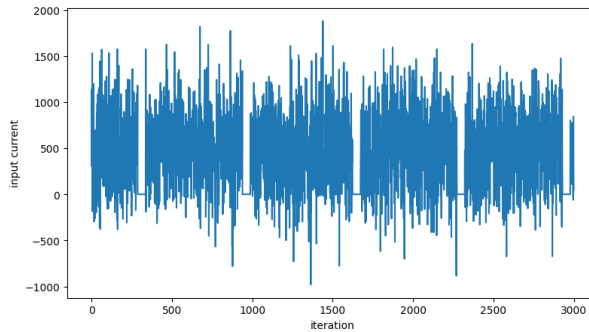
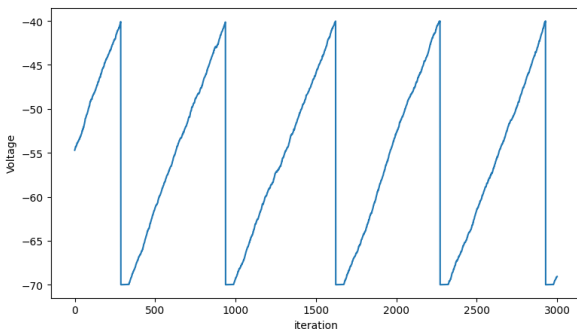
شکل ۲۹: تغییرات پتانسیل مدل نرونی LIF با جریان تک پله ای



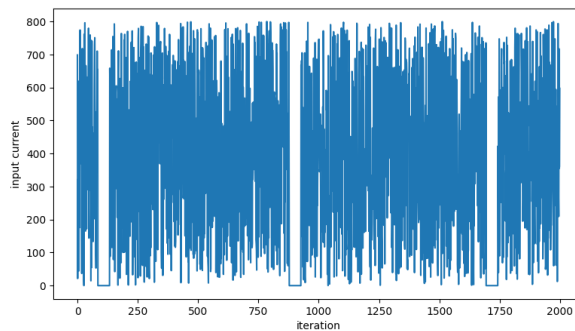
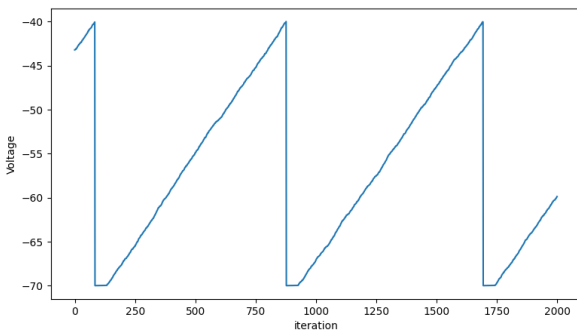
شکل ۳۰: تغییرات پتانسیل مدل نرونی LIF با جریان پله‌ای



شکل ۳۱: تغییرات پتانسیل مدل نرونی LIF با جریان سینوسی

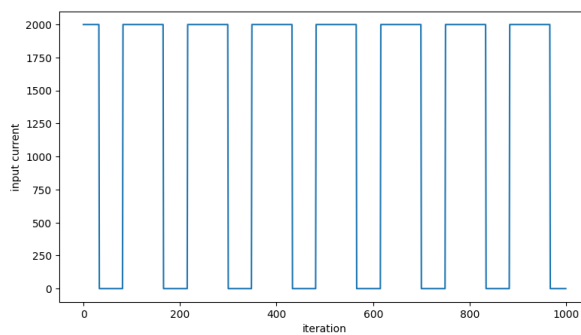
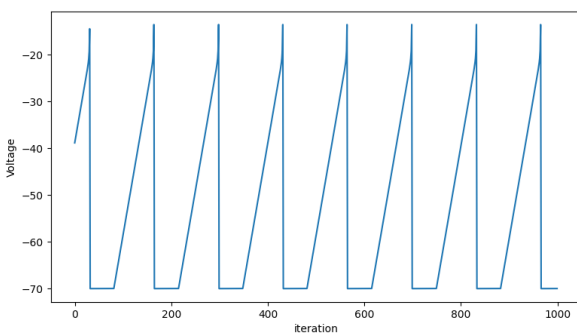


شکل ۳۲: تغییرات پتانسیل مدل نورونی LIF با جریان نویزی با توزیع نرمال

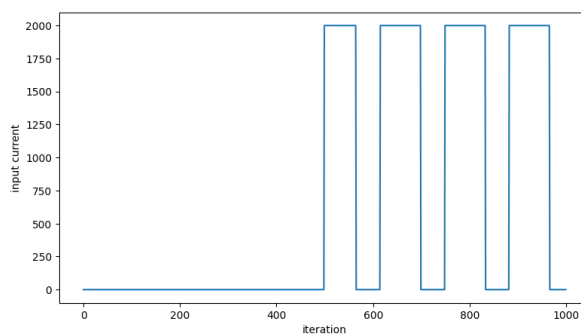
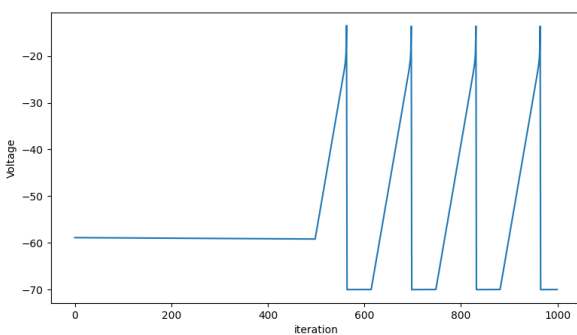


شکل ۳۳: تغییرات پتانسیل مدل نورونی LIF با جریان نویزی با توزیع بکنواخت

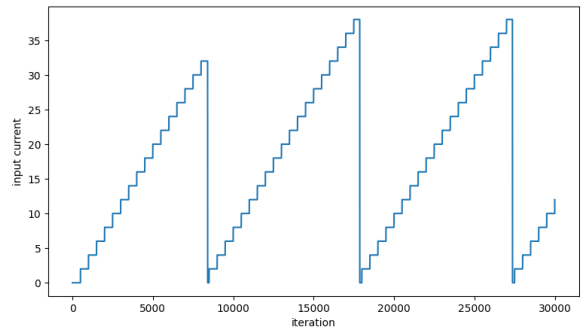
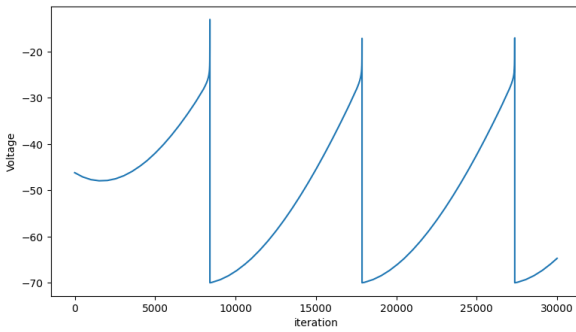
## مدل نورونی ELIF



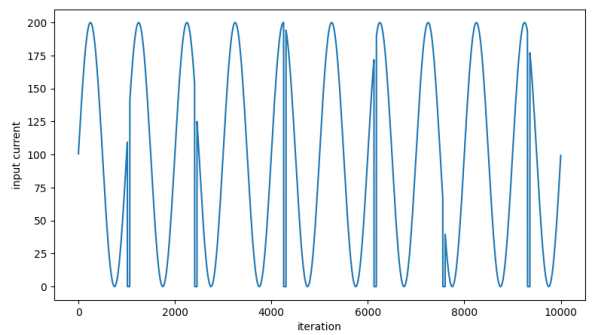
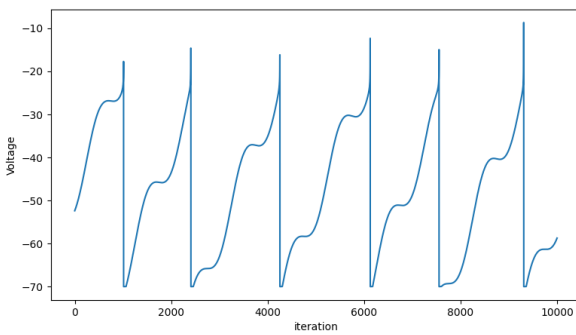
شکل ۳۴: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان ثابت



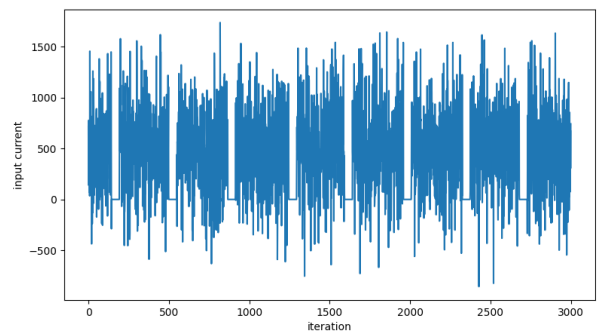
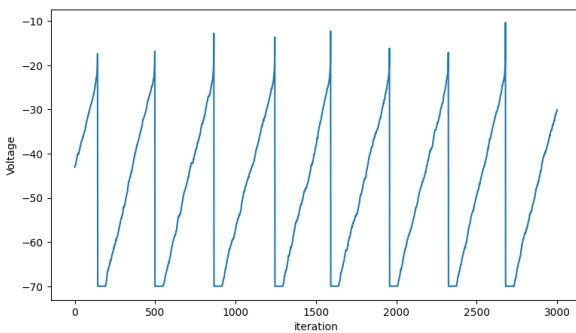
شکل ۳۵: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان تک پله ای



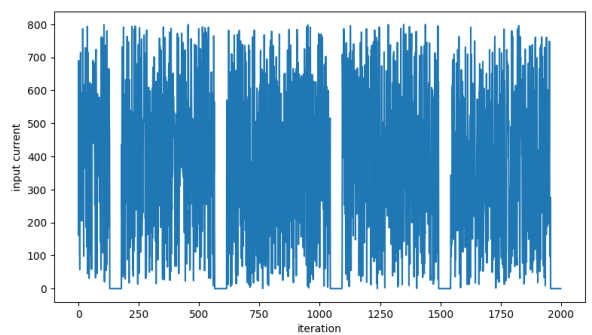
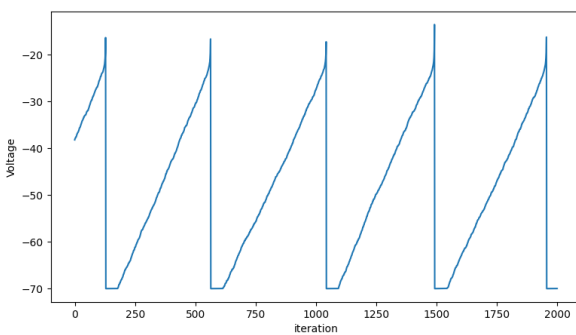
شکل ۳۶: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان پله‌ای



شکل ۳۷: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان سینوسی

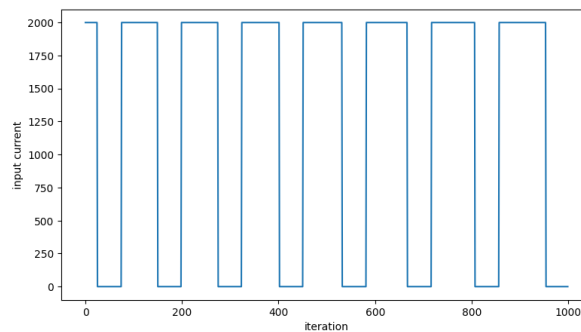
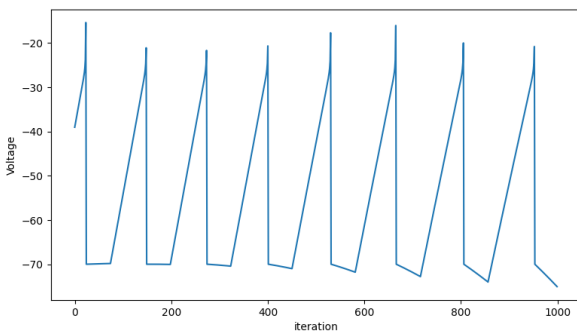


شکل ۳۸: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان نویزی با توزیع نرمال

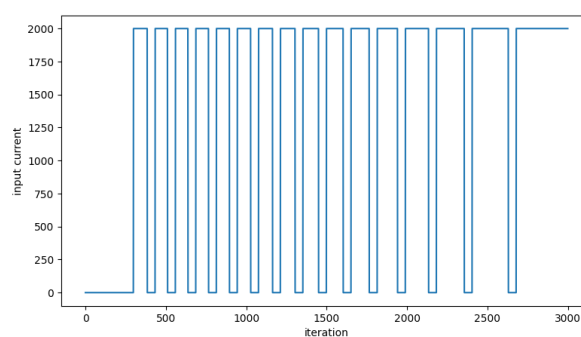
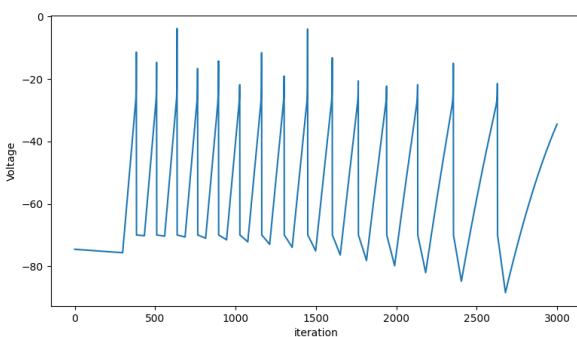


شکل ۳۹: تغییرات پتانسیل مدل نورونی ELIF با جریان نویزی با توزیع یکنواخت

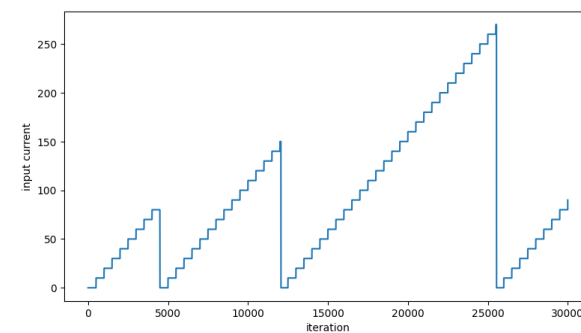
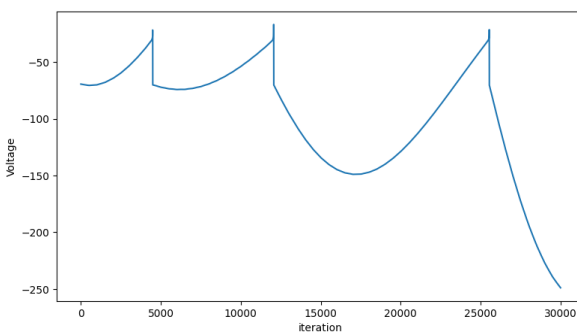
## مدل نرونی AELIF



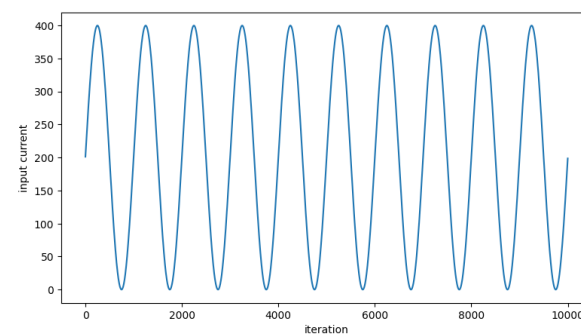
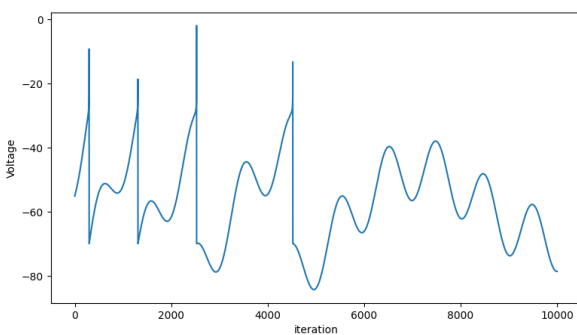
شکل ۴۰: تغییرات پتانسیل مدل نرونی AELIF با جریان ثابت



شکل ۴۱: تغییرات پتانسیل مدل نرونی AELIF با جریان تک پله ای

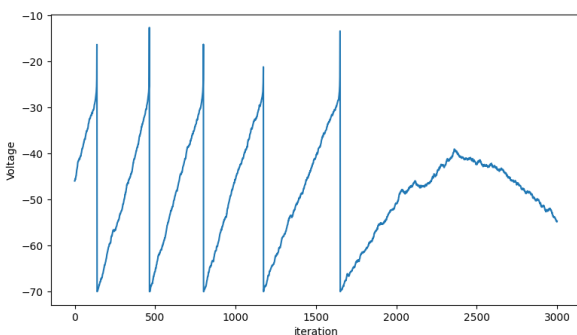


شکل ۴۲: تغییرات پتانسیل مدل نرونی AELIF با جریان پله ای

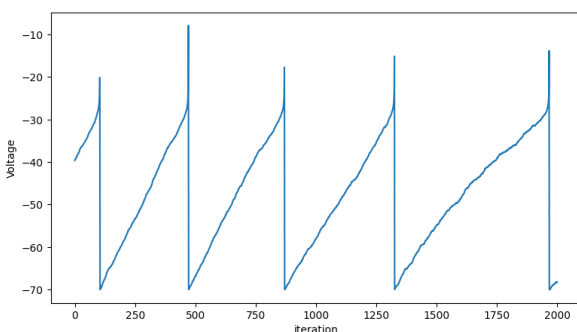


شکل ۴۳: تغییرات پتانسیل مدل نرونی AELIF با جریان سینوسی





شکل ۴۴: تغییرات پتانسیل مدل نورونی AELIF با جریان نویزی با توزیع نرمال



شکل ۴۵: تغییرات پتانسیل مدل نورونی AELIF با جریان نویزی با توزیع یکنواخت

۵

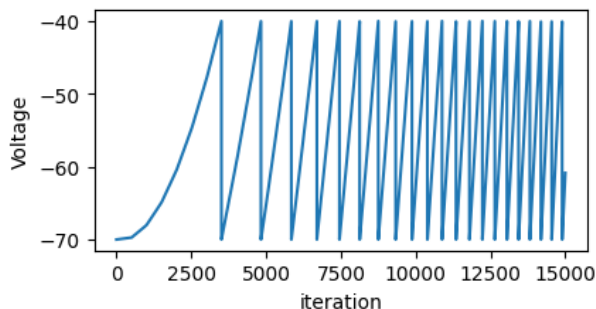
## مدل نورنی LIF

می‌دانیم که معادله مدل نورونی LIF عبارت است از:

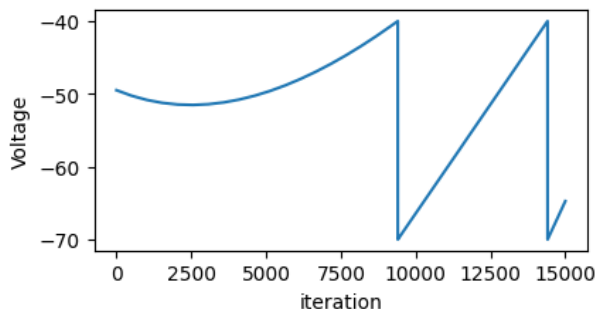
$$\tau * \frac{du}{dt} = -(u - u_{rest}) + R \times I(t)$$

که خب همانطور که می‌دانید پارامترهای متفاوتی وجود دارند که می‌توانیم برای این مدل مورد بحث قرار دهیم که هر کدام را صورت مجزا مورد تحلیل قرار می‌دهیم و در صورت نیاز نمودارهای آن‌ها را ارائه می‌دهیم:

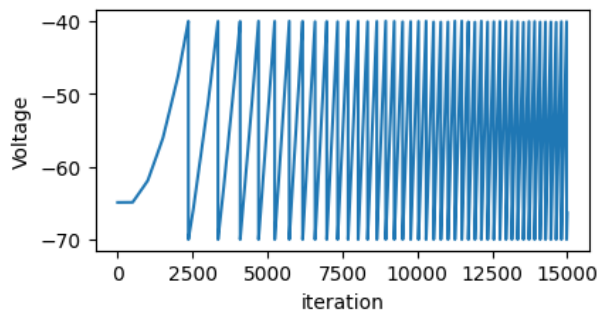
- $\tau$ : این پارامتر رزولوشن را نشان می‌دهد که خب هر چه قدرت محاسباتی بیشتری داشته باشیم و بخواهیم مدل دقیق‌تری داشته باشیم می‌توانم آن را کوچک‌تر کنیم اما به صورت معمول در این پروژه مقادیر یک‌صدم یا یک‌هزارم داشته است.
- $u_{rest}$ : این عدد اندازه پتانسیل نورون را در حالت استراحت نشان می‌دهد که معمولاً برای نورون‌های واقعی عدد منفی ۶۵ است که ما در اینجا هم از همین مقدار استفاده کرده‌ایم.
- $R$ : زمانی که مدل نورنی LIF را ارائه دادیم، گفتیم که مقاومت برای ما نقش کانال‌های یونی را بازی خواهد کرد، الان با افزایش و کاهش آن می‌توانیم تأثیرش را بر مدل ببینیم.  
برای این کار فرض می‌کنیم که جریان پله‌ای است.



شکل (ب)  $R = 10$



شکل (ج)  $R = 1$



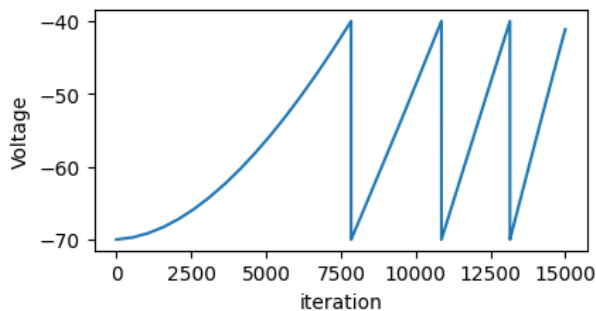
شکل (د)  $R = 20$

شکل ۴۶: تغییرات اختلاف پتانسیل مدل نورونی LIF با مقادیر مقاومت متفاوت

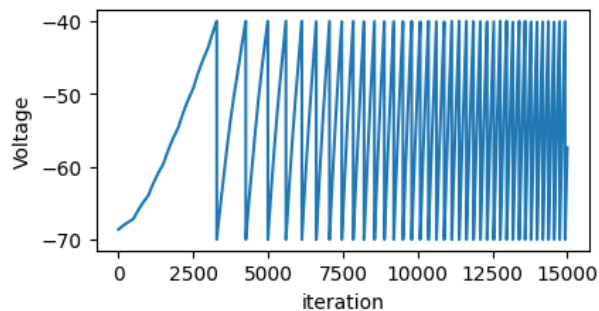
همانطور که مشاهده می‌کنید اگر جریان‌های یکسانی را به نورون بدهیم و هر چه مقدار  $R$  را بیشتر می‌کنیم، نورون با سرعت بیشتر ضربه خواهد زد و به طور کلی با سرعت بیشتری تغییرات اختلاف پتانسیل رخ می‌دهد، به نوعی به صورتی زیستی می‌توان آن را با این عبارت که سرعت عملکرد کانال‌های یونی بیشتر و بیشتر می‌شود توجیه کرد.

۷: در این قسمت نیز جریان ورودی را همان جریان ثابت پله‌ای در نظر می‌گیریم و میزان این پارامتر را تغییر می‌دهیم و اثراتش را تحلیل می‌کنیم.

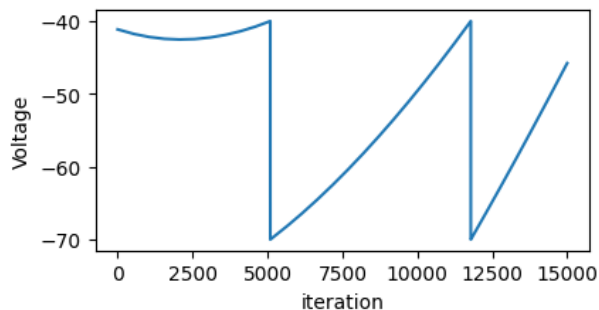
همانطور که در شکل ۴۷ مشاهده می‌کنید این پارامتر عکس پارامتر  $R$  عمل می‌کند به طوری که هر چه مقدار بزرگتری برای آن در نظر بگیریم نورون ضربه‌های کمتری می‌زند و بازه میان ضربه‌ها نیز بزرگتر می‌شود.



$\tau = 10$  (ب)



$\tau = 1$  (ت)



$\tau = 20$  (ج)

شکل ۴۷: تغییرات اختلاف پتانسیل مدل نورونی LIF با مقادیر  $\tau$  متفاوت

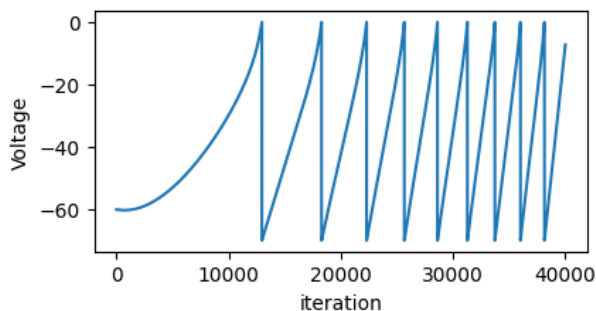
## مدل نورنی ELIF

می‌دانیم که معادله این مدل عبارت است از:

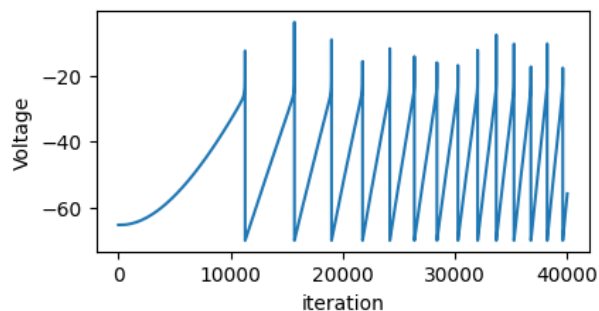
$$\tau * \frac{du}{dt} = -(u - u_{rest}) + \Delta_T \exp^{\frac{u - \theta_{rh}}{\Delta_T}} + R \times I(t)$$

بنابراین پارامترهایی که به مدل اضافه شدند را مورد بحث و تحلیل قرار می‌دهیم:

- $\Delta_T$ : فرض می‌کنیم که جریان ورودی مدل ما جریان پله‌ای است، سپس میزان  $\Delta_T$  را تغییر می‌دهیم و تاثیر آن را بررسی می‌کنیم.



$\Delta_T = 10$  (ب)



$\Delta_T = 1$  (ت)

شکل ۴۸: تغییرات اختلاف پتانسیل مدل نورونی ELIF با مقادیر  $\Delta_T$  متفاوت

همانطور که در شکل ۴۸ مشاهده می‌کنید مقدار  $\Delta_T$  رابطه عکس با سرعت نمایی رشد اختلاف پتانسیل در لحظات پتانسیل

فعالیت را دارد، هرچقدر که مقدار کوچکتري داشته باشد با سرعت نمایی بیشتری این تغییر رخ می‌دهد و اگر که آن را بزرگتر کنیم این نرخ کمتر می‌شود.

$\theta_{rh}$ : همانطور که راجب این پارامتر قبلاً هم صحبت کردیم، این پارامتر در واقع تعیین کننده حد آستانه ما است، بعد از رسیدن به این مقدار اختلاف پتانسیل نورون به صورت نمایی کم می‌شود و بعد از این موقع پتانسیل فعالیت شبیه سازی می‌شود، بنابراین به نوعی ما دو حد آستانه داریم که از حد آستانه دیگر برای تنظیم مجدد پتانسیل استفاده می‌کنیم.

## مدل نورنی AELIF

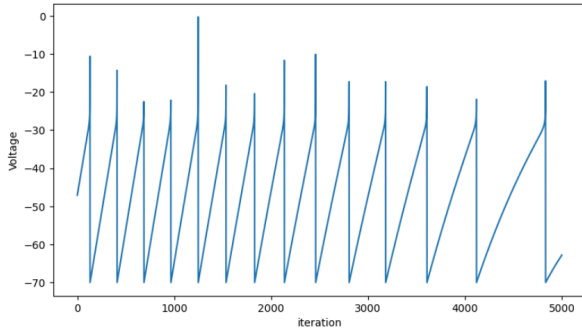
می‌دانیم که معادله این مدل نورونی عبارت است از:

$$\tau_m * \frac{du}{dt} = -(u - u_{rest}) + \Delta_T \exp^{\frac{u - \theta_{rh}}{\Delta_T}} - R \sum_k w_k + R \times I(t)$$

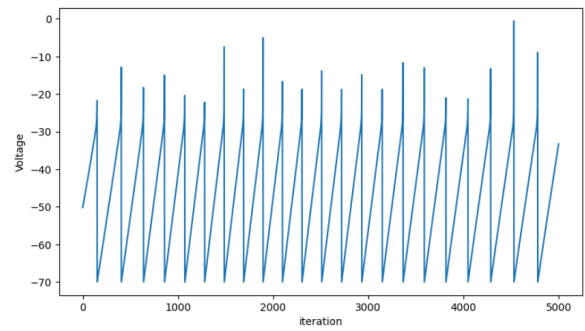
$$\tau_k * \frac{dw_k}{dt} = a_k(u - u_{rest}) - w_k + b_k \tau_k \sum_{t^f} \delta(t - t^f)$$

همانطور که معادلات را مشاهده می‌کنید پارامترهای مدل نورنی تغییر نداشته اما برای اینکه خاصیت تطبیق پذیری را به مدل اضافه کنیم، یک وزنی را همواره از اختلاف پتانسیل کم می‌کنیم که پارامترهای آن را مورد بحث قرار می‌دهیم.

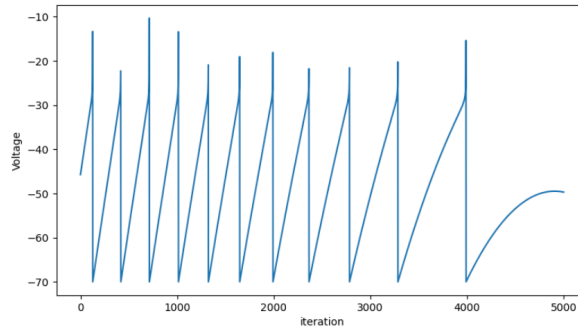
•  $\tau_k$ : یک جریان ثابت را به نورون ورودی می‌دهیم و مقدار  $\tau_k$  را تغییر می‌دهیم تا تاثیر آن را مورد تحلیل قرار دهیم:



$\tau_k = 10$  (ب)

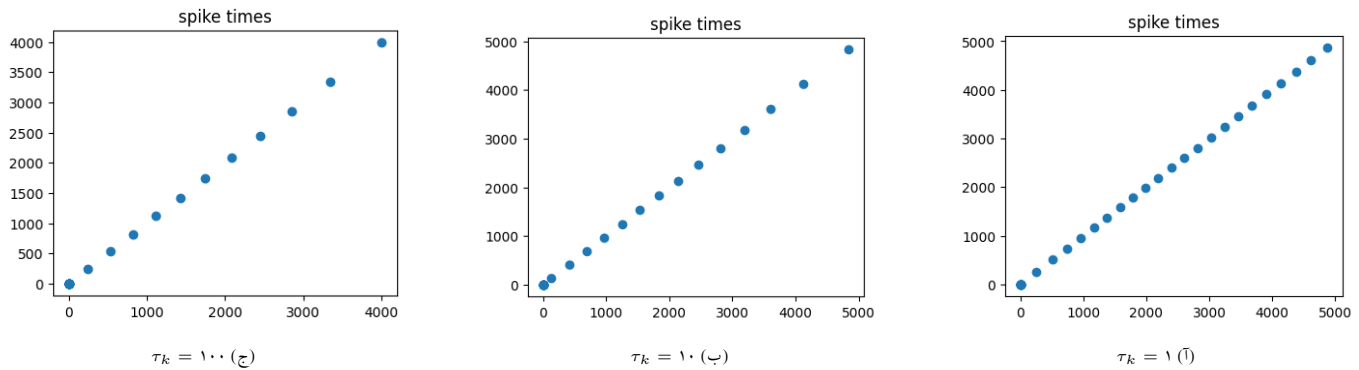


$\tau_k = 1$  (آ)



$\tau_k = 100$  (ج)

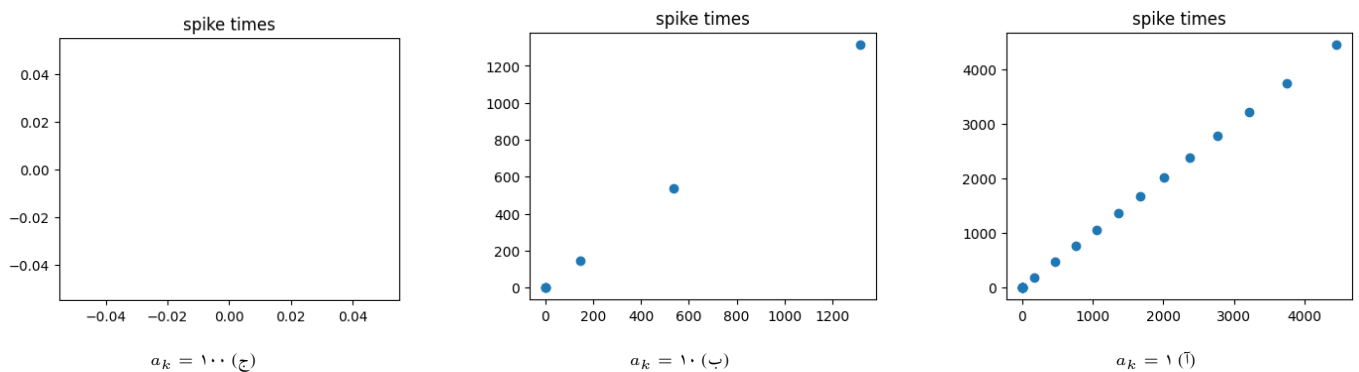
شکل ۴۹: تغییرات اختلاف پتانسیل مدل نورونی AELIF با مقادیر متفاوت  $\tau_k$



شکل ۵۰: زمان ضربه با مقادیر  $\tau_k$  متفاوت

همانطور که مشاهده می‌کنید هر چه اندازه  $\tau_k$  را افزایش می‌دهیم میزان تطبیق پذیری نورون افزایش می‌یابد و همچنین نرخ ضربه به طور کلی کاهش می‌یابد.

$a_k$ : می‌دانیم که ترم  $a_k(u - u_{rest})$  نشان می‌دهد که میزان اختلاف ما از حالت استراحت در میزان تطبیق پذیری می‌تواند مهم باشد که خوب یا استفاده از  $a_k$  می‌توانیم این تاثیر را کم یا زیاد کنیم. یک جریان ثابت را به نورون ورودی می‌دهیم و مقدار  $a_k$  را تغییر می‌دهیم تا تاثیر آن را مورد تحلیل قرار دهیم:

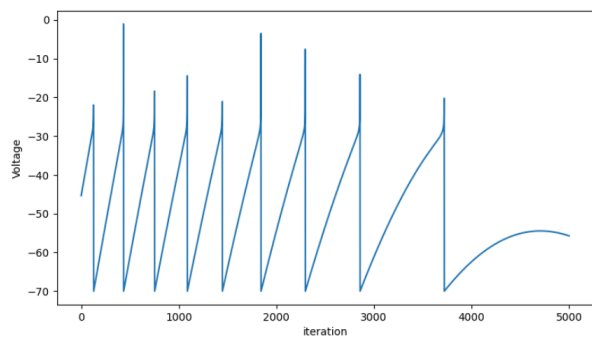


شکل ۵۱: زمان ضربه با مقادیر  $a_k$  متفاوت

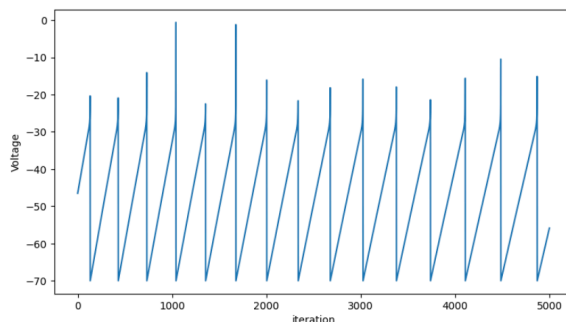
همانطور که در شکل ۵۱ مشاهده می‌کنید، هر چه مقدار  $a_k$  را بیشتر می‌کنیم نتنها خاصیت تطبیق پذیری خیلی می‌تواند زیاده‌تر شود بلکه باعث می‌شود که نورن خیلی از حالت استراحت خود دور نشود و همواره در اطراف آن بازی کند و به حد آستانه نرسد. این پارامتر با پارامتر بعدی رابطه مهمی دارد، به طوری که اگر  $b_k$  خیلی عدد بزرگتری نسبت به این پارامتر باشد آنگاه در مدت زمان طولانی خاصیت تطبیق پذیری به سرعت افزایش می‌یابد اما این ترم آنقدر قوی نیست که جلوی کم شدن اندازه اختلاف پتانسیل را بگیرد تا جایی که حتی پتانسیل نورون به منفی بی نهایت میل خواهد کرد. بنابراین می‌توان گفت که این وزن تاثیر مهمی در حفظ تعادل نورون در زمانی که به یک ورودی عادت می‌کند دارد.

$b_k$ : می‌دانیم که زمانی که ضربه داریم مقدار  $b_k$  به وزن اضافه می‌شود بنابراین این پارامتر مهمی در تعیین میزان تطبیق پذیری نورن می‌باشد.

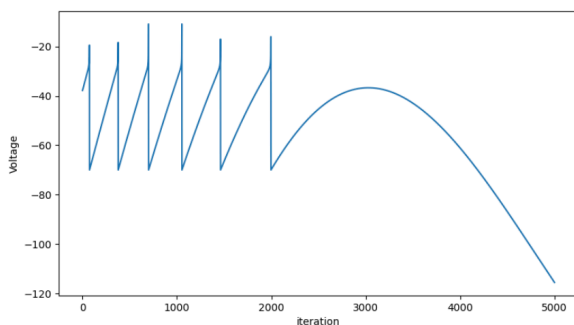
یک جریان ثابت را به نورون ورودی می‌دهیم و مقدار  $b_k$  را تغییر می‌دهیم تا تاثیر آن را مورد تحلیل قرار دهیم:



$b_k = 20$  (ب)



$b_k = 1$  (1)



$b_k = 40$  (ج)

شکل ۵۲: تغییرات اختلاف پتانسیل مدل نورونی AELIF با مقادیر متفاوت  $b_k$

همانطور که بالاتر اشاره کردیم، این پارامتر نقش مهمی در تعیین میزان تطبیق پذیری نورون دارد و اگر مقدار آن را افزایش دهیم میزان تطبیق پذیری نورون افزایش می‌یابد و از جایی به بعد اجازه ضربه را به نورون نمی‌دهد اما نمی‌توان راجب این پارامتر هم به تنهایی نظر داد چون مقدار  $a_k$  تاثیر مهمی در رفتار این پارامتر دارد همانطور که در بخش قبل توضیح دادیم.

## نتیجه گیری

در این پروژه سه مدل نورنی متفاوت را پیاده سازی و تحلیل کردیم و شناخت بهتری نسبت به نقش هر یک از پارامترهای مدل‌ها پیدا کردیم، در ادامه نیز قصد داریم که با آن‌ها یک شبکه عصبی تشیل دهیم که به این نتایج بدست آمده نیاز خواهیم داشت.