



# Izhikevich Neuron Model Simulation Report

عرشیا ربیعی  
۶۱۰۳۹۸۱۲۵

۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۲

## ۱ مقدمه

مدل نوروئی Izhikevic یک مدل نوروئی است که رفتار آنها را شبیه سازی میکند و در مقایسه با بعضی از مدل ها از نظر نشان دادن رفتار مطابق با طبیعت شبیه به مدل Hodgkin and Huxley و از نظر سادگی به اندازه ی مدل LIF عمل میکند.

در این گزارش سعی میکنیم با استفاده از این مدل و پیاده سازی که انجام داده ام، الگوهای رفتاری که مغز ما از آنها پیروی میکنند و تا به الان آنها را شناخته ایم را شبیه سازی کرده و آنها را تحلیل کنیم.

همچنین یک تحلیل کلی از اینکه این مدل نوروئی چه معادله و چه پارامترهایی دارد را بررسی کرده و نقش پارامترها را بررسی میکنیم

## ۲ چگونه مدل Izhikevic کار میکند؟

این مدل نوروئی از دو معادله دیفرانسیل دو بعدی ساده تشکیل شده که در ادامه خواهیم دید:

$$\begin{aligned}\frac{dv}{dt} &= 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I \\ \frac{du}{dt} &= a(bv - u)\end{aligned}$$

و همچنین هر گاه نرون spike بزند  $v$  به مقدار  $c$  برمیگردد و همچنین  $u$  به مقدار  $u + d$  آپدیت میشود. ناگفته نماند در این مدل معمولاً spike threshold را  $30\text{mv}$  در نظر میگیرند. که به متغیر  $u$  recovery variable میگویند.

اگر به دو معادله دقت کنید میبینید در تغییرات  $u$   $v$  بکار رفته است و در تغییرات  $v$   $u$  بکار رفته است. همچنین علامت متغیر  $u$  در معادله ی اول منفی است یعنی کمک میکند  $v$  به میزان تعادل خود بازگردد. اگر بخواهیم دقیق تر شویم هر قدر که  $v$  افزایش یابد به میزان حساسیت یا همان  $b$  در معادله دوم، کمک به افزایش  $u$  میکند و هر قدر که  $u$  بیشتر شود مقاومت آن در تغییرات  $v$  در معادله ی اول نمود پیدا میکند و به مرور زمان این افزایش  $v$  تمام میشود و به کاهش پیدا میکند. همچنین تاثیر پارامتر  $a$  در میزان کاهش recovery potential است. چون این ضریب در معادله دوم در ترم  $-u$  تاثیر اصلی را میگذارد.

## ۳ آنالیز مدل نوروئی Izhikevic با پارامترهای مختلف

### 1. Regular Spiking:

این شبیه ساز معمول یک نرون میباید که با ورود جریان در یک بازه ی زمانی تعداد کمی اسپایک میزند و رفته رفته این در همان بازه ی زمانی یکسان تعداد اسپایک ها کمتر میشود و کمی adaptation رخ میدهد به طور طبیعی با افزایش میزان جریان ورودی به نرون تعداد اسپایک ها افزایش میابد اما نه از یه حدی بیشتر که دلیل آن را پس از بیان

کردن پارامترها توضیح خواهم داد. برای شبیه سازی این رفتار با مدل نورونی ایزیکویچ پارامترها را به صورت زیر مقدار دهی میکنیم:

- $a = 0.02$
- $b = 0.2$
- $c = -65$
- $d = 8$

همانطور که میبینید به نسبت پارامتر  $d$  مقدار بالایی دارد بنابراین  $u$  به میزان بیشتری بالا میرود و روند و نوروں تایم بیشتری در دوران hyperpolarization خود باقی میماند

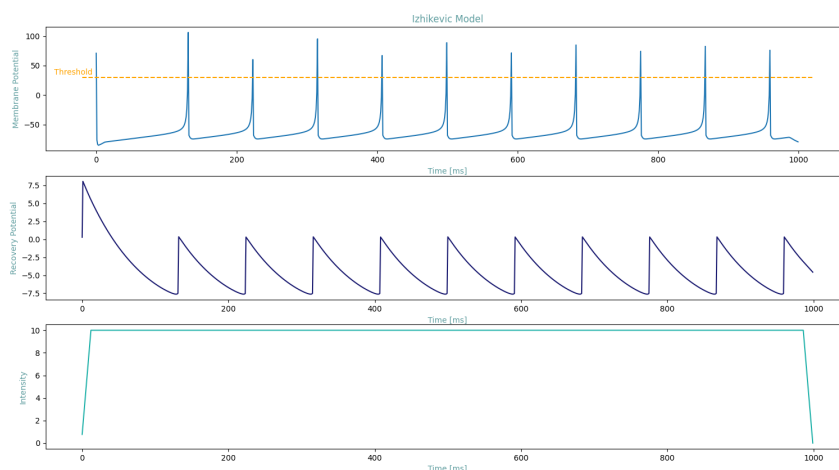


Figure 1: Regular Spiking with constant  $I = 10$

همانطور که از شکل هم مشاهده میکنید در کل زمان نوروں ها به یک شکل اسپایک زده اند.

حال میخواهیم با استفاده از نمودار F-I Curve تاثیر جریان بر تعداد اسپایک این حالت را بررسی کنیم

همانطور که در شکل ۲ مشاهده میکنید با تزریق جریان بیشتر تعداد اسپایک ها در یک بازه ی زمانی ۱ ثانیه ای بیشتر میشود

در حالت قبل جریان ورودی ثابت بود. حال میخواهیم یک جریان همراه نویز به رفتار RS(Regular Spiking) اضافه کنیم و تاثیر آن را مشاهده کنیم.

برای شبیه سازی نویز در برنامه از توزیع نرمال با میانگین و انحراف معیار مشخص استفاده شده که همان انحراف معیار نمایانگر میزان نویز میباشد.

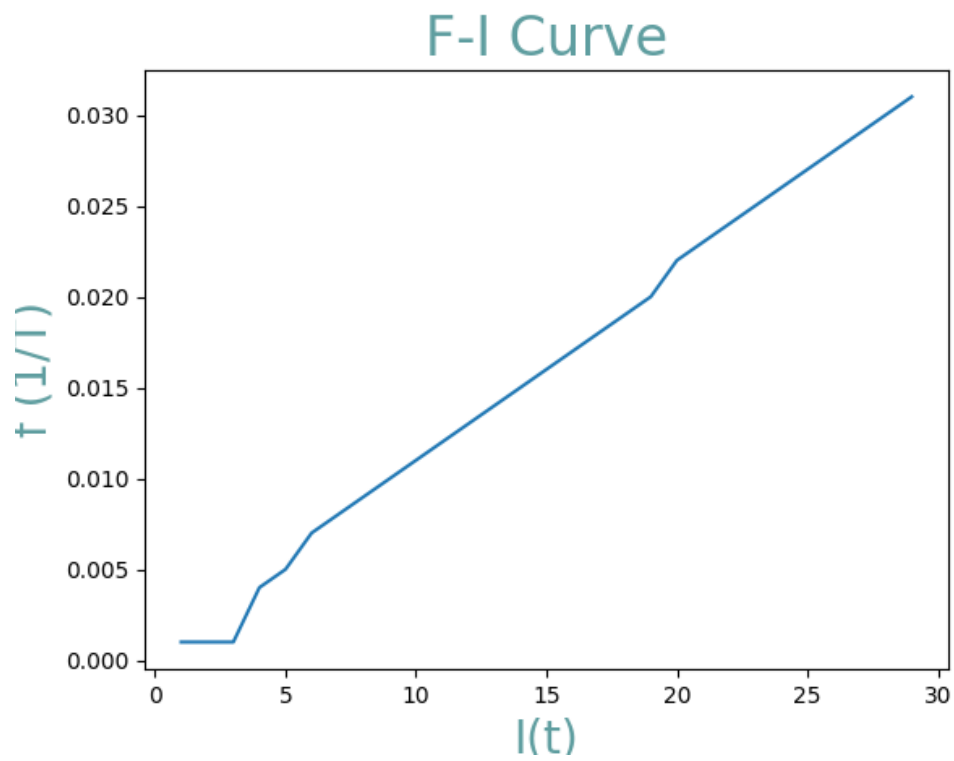


Figure 2: Regular Spiking F-I curve in 1000ms

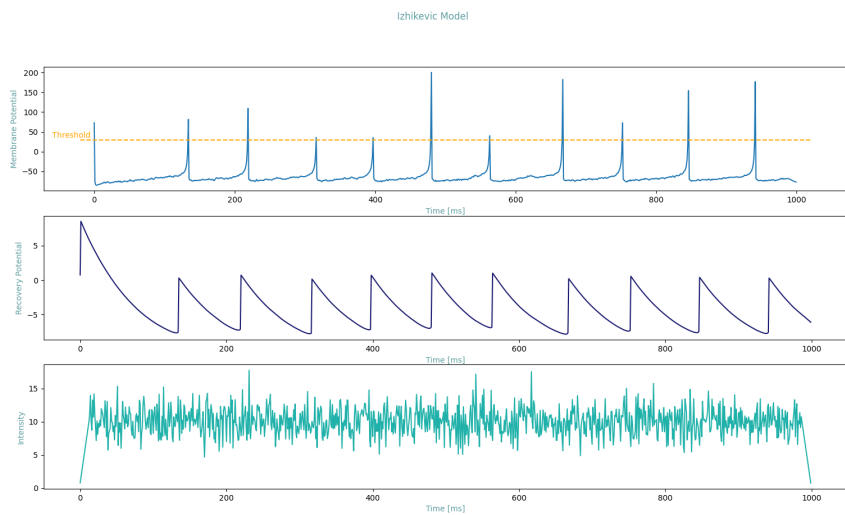


Figure 3: Regular Spiking with I-mean = 10 and I-STD = 2

همانطور که مشاهده میکنید با اضافه کردن نویز بجای جریان ثابت در sub-threshold fluctuation, اتفاق می افتد. همچنین اگر نمودار های recovery potential را مقایسه کنید ببینید هیچ تغییری در الگو شکل نگرفته که میتوانیم نتیجه بگیریم این مشخصه بیشتر از پارامتر های نورون تاثیر میپذیرد. حال کمی میزان نویز یا همان انحراف معیار را افزایش میدهیم.

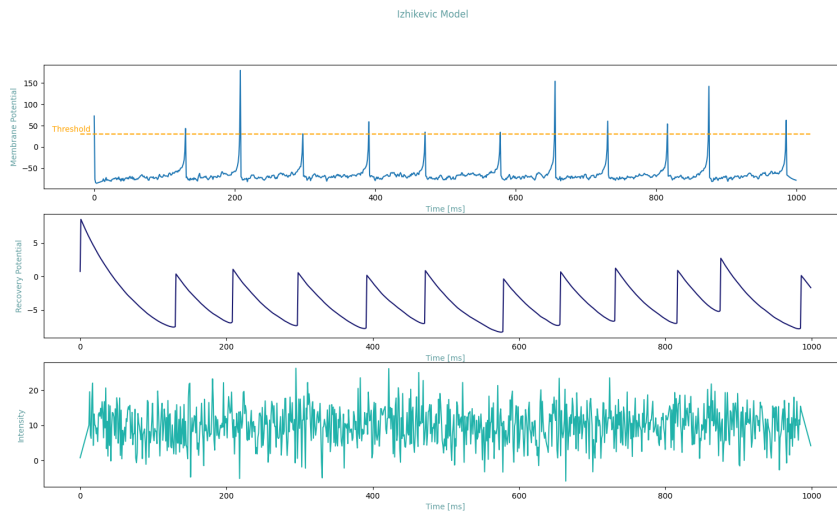


Figure 4: Regular Spiking with I-mean = 10 and I-STD = 5

با افزایش میزان نویز از روی نمودار ۴ مشاهده میکنیم که میزان نوسان در sub-threshold افزایش پیدا کرده است و اسپایک ها کمکی به adaptation نورون نمیکند.

## 2. Intrinsically Bursting

در این حالت رفتار نورونی ابتدا اسپایک به تعداد زیاد انجام میشود سپس به اسپایک ها حالت قبلی یعنی RS را به خود میگیرند. یک مثال از این رفتار در ما انسان ها وقتی است که یک شی داغی را لمس میکنیم. ابتدا این شی را بسیار داغ حس میکنیم سپس به مرور زمان حس از بین میرود. حال برای شبیه سازی این رفتار با مدل ایزیکویچ از پارامتر های زیر استفاده میکنیم:

- $a = 0.02$
- $b = 0.2$
- $c = -55$
- $d = 4$

همانطور که مشاهده میکنید پارامتر  $d$  ,  $c$  با حالت قبلی متفاوت است که باعث چنین رفتاری شده اما چرا؟  
 اولاً مقدار  $c$  بیشتر شده یعنی مسیری که باید پتانسیل نورون طی کند تا به اسپایک برسد کوتاه تر است.  
 همچنین مقدار  $d$  به نسبت حالت قبل کمتر شده است یعنی افزایش مقدار  $u$  کند تر میباشد بنابراین بنابراین فرصت بیشتری برای اسپایک دارد و بیشتر اسپایک میزند و در نهایت بعد از این که  $u$  به یک حدی رسید دوباره رفتار RS از خود نشان میدهد.

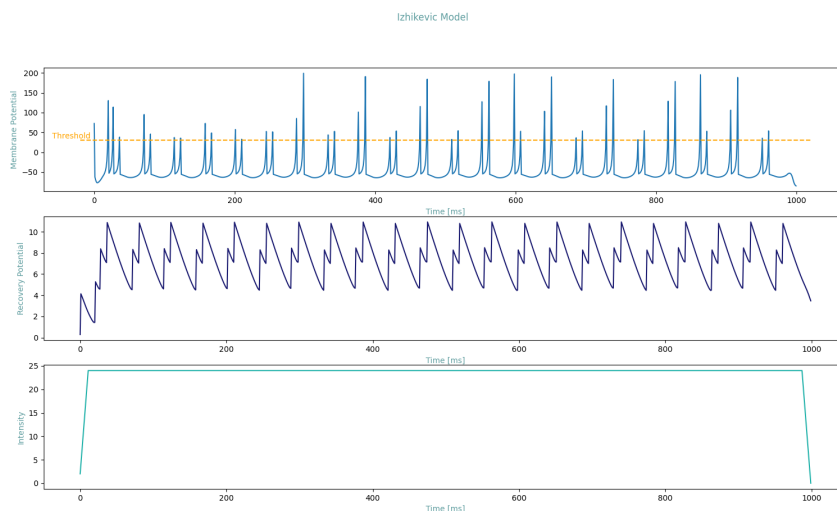


Figure 5: Intrinsically Bursting with constant  $I = 24$

همانطور که از شکل ۵ هم میتوان دید رفتار نورون مطابق انتظار ما بوده است حال به جای جریان ثابت یک جریان همراه نویز که با توزیع نرمال ساخته شده به نورون ورودی میدهیم. شکل ۶ را مشاهده کنید همانطور که میبینید مانند حالت قبل در sub-threshold نوسان رخ میدهد. اگر بخواهیم نمودار recovery potential جریان ثابت و متغیر را مقایسه کنیم متوجه میشویم در حال متغیر فرکانس بیشتر میباشد.

حال میزان نویز هم افزایش میدهیم و با توجه به نمودار متوجه میشویم همانطور که مانند رفتار نورونی قبلی انتظار داشتیم میزان نوسان در sub-Threshold افزایش یافته است. همچنین با افزایش نویز میزان نوسان recovery potential نیز افزایش پیدا کرده است که میتوان اینطور برداشت کرد که تلاش  $u$  برای adaptation بیشتر شده است. همچنین با اعمال نویز متوجه میشویم adaptation با مشکل رو به رو میشود و گاهی اسپایک ها بیش از حد انتظار ماست. هرچند که این مورد یعنی افزایش میزان اسپایک میتواند به دلیل افزایش بی رویه نویز به علت انحراف معیار بالا باشد.

حال نمودار F-I curve

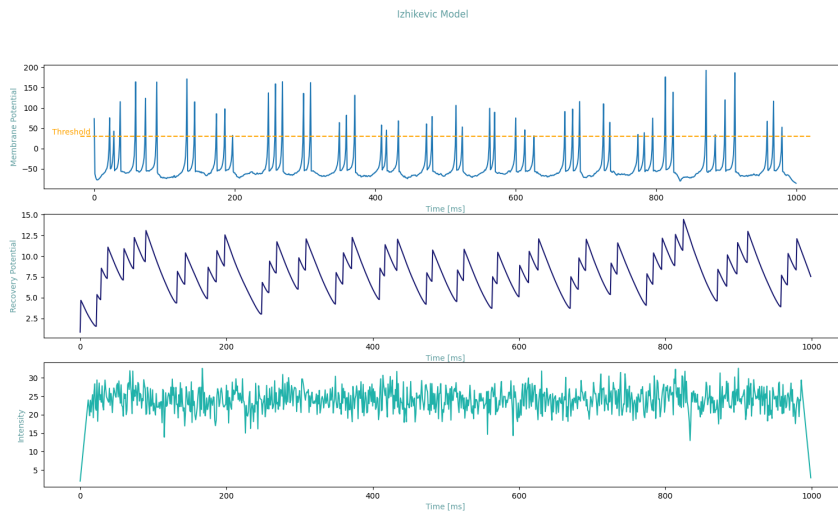


Figure 6: Intrinsically Bursting with  $I\text{-mean} = 24$  and  $I\text{-STD} = 3$

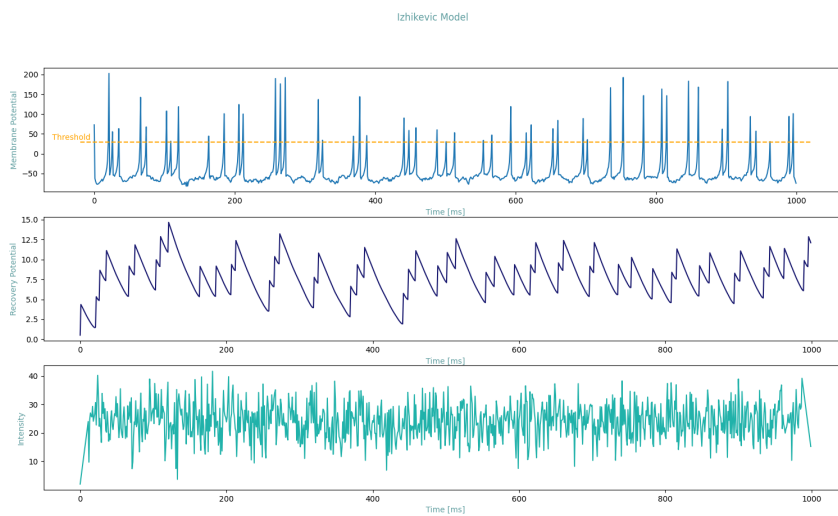


Figure 7: Intrinsically Bursting with  $I\text{-mean} = 24$  and  $I\text{-STD} = 6$

ان را بررسی میکنیم مطابق شکل ۸ همانطور که انتظار داشتیم میزان فرکانس اسپایک بیشتر از حالت قبل است

### 3. Chattering

در این حالت اسپایک ها در یک دوره زمانی بسیار زیاد میباشند. در این رفتار نرونی در گذر زمان adaptation رخ نمیدهد. بلکه همانقدر به اندازه ی اول نوروں به جریان

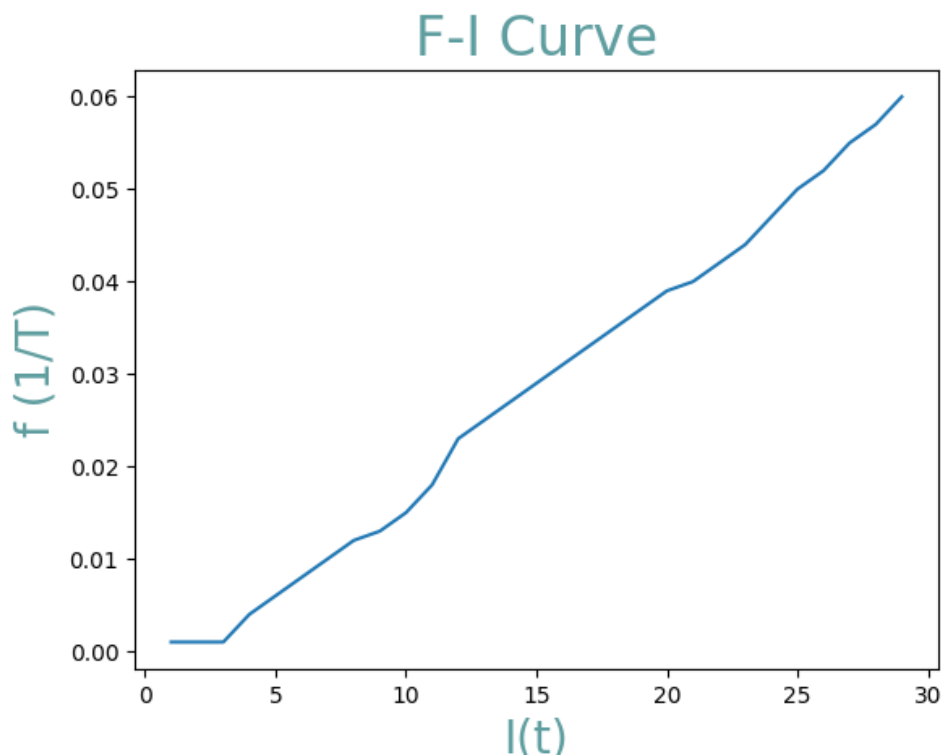


Figure 8: Intrinsically Bursting F-I curve in 1000ms

ورودی حساس می باشد. در پارامتر های این حالت تغییرات حالت قبل ادامه پیدا کرده است یعنی افزایش  $c$  و کاهش  $d$  ادامه پیدا کرده است یعنی مانند آنالیز حالت قبل افزایش  $u$  حتی کمتر هم شده و توانایی کنترل پتانسیل نوروئی را ندارد و از آن طرف نیز افزایش  $c$  باعث شده که مسیر طی کردن پتانسیل نوروئی برای اسپایک کوتاه تر شود. برای شبیه سازی این رفتار با مدل نوروئی ایزیکویچ از پارامتر های زیر استفاده میکنیم.

- $a = 0.02$
- $b = 0.2$
- $c = -50$
- $d = 2$

حال یک جریان ثابت معادل ۲۴ به مدل وارد میکنیم تا نمودار های آن را در شکل ۹ ببینیم

نمودار مطابق انتظار ما در توضیحات اولیه عمل کرده است.

حال مانند حالات قبل به جریان ورودی نویز اعمال میکنیم. نمودار آن مطابق شکل ۱۰ خواهد شد..



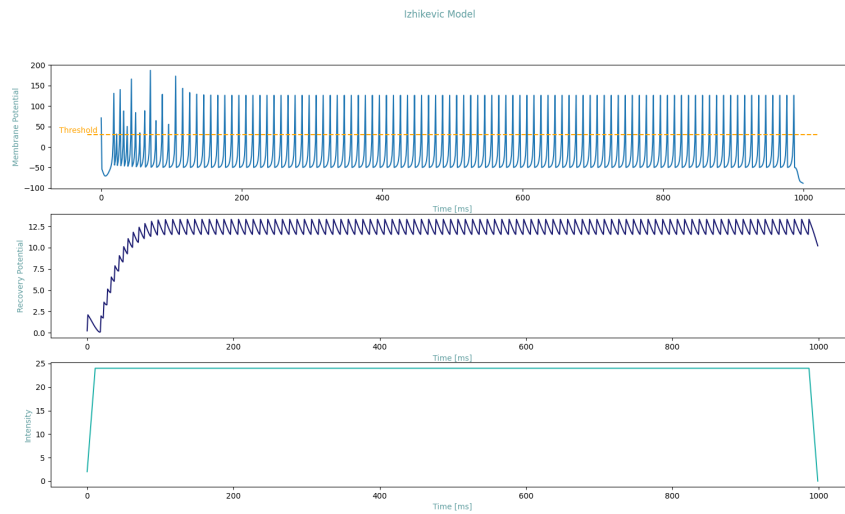


Figure 9: Chattering with constant  $I = 24$



Figure 10: Chattering with  $I\text{-mean} = 24$  and  $I\text{-STD} = 3$

همانطور که مشاهده میکنید باز هم مانند حالات قبل در fluctuation , sub-Threshold , اتفاق می افتد.

حال میخواهیم مطابق شکل ۱۱ میزان این نویز را افزایش دهیم.

همانطور که میبینید با اعمال نویز بر عکس جریان ثابت در یک جاهایی sub-Threshold fluctuation اتفاق می افتد که در این حین میزان recovery potential بیشتر از حالات قبل کاهش میابد. همچنین با ایجاد نویز بیشتر میبینیم میزان فرکانس ها کاهش میابد.

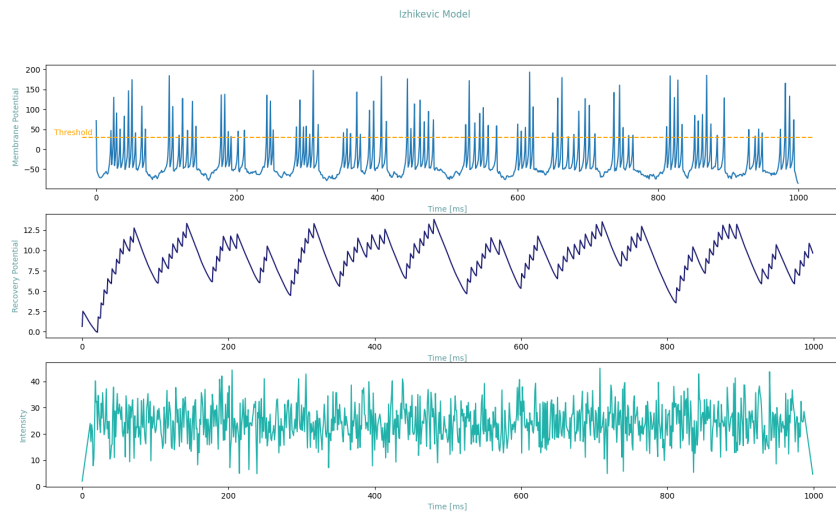


Figure 11: Chattering with  $I\text{-mean} = 24$  and  $I\text{-STD} = 7$

یعنی در تعداد نواحی بیشتری fluctuation اتفاق می افتد. حال نمودار F-I Curve را میتوانید در شکل ۱۲ مشاهده کنید و همانطور که انتظار داریم با توجه به افزایش شدید اسپایک ها مقدار این نمودار هم نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

#### 4. Low Threshold Spiking

در این حالت پتانسیل اسپایک ها تا حد زیادی بیشتر از threshold نمیرود. در این رفتار نوروئی امکان دارد که فرکانس اسپایک بالا باشد اما به مرور adaptation نیز رخ بدهد. پارامترها در این حالت به نسبت حالات قبلی تغییرات بیشتری میکنند:

- $a = 0.02$
- $b = 0.25$
- $c = -65$
- $d = 2$

در این حالت پارامتر  $d$  تغییر نکرده یعنی کماکان افزایش  $u$  کند میباشد اما از طرفی مقدار  $c$  کاهش پیدا کرده است یعنی پتانسیل نوروئی مسیر طولانی تری برای رسیدن به threshold دارد که میتواند یکی از دلایل این باشد که این کانفیگ از پارامترها در زمان اسپایک مقدار زیادی از threshold خود تجاوز نمیکند. همچنین مقدار  $b$  کمی افزایش یافته که به افزایش میزان  $u$  برای کنترل پتانسیل نوروئی کمک میکند. حال جریان ثابت ۱۲ را به مدل تزریق میکنیم تا نمودار آن را در شکل ۱۳ مشاهده کنیم.

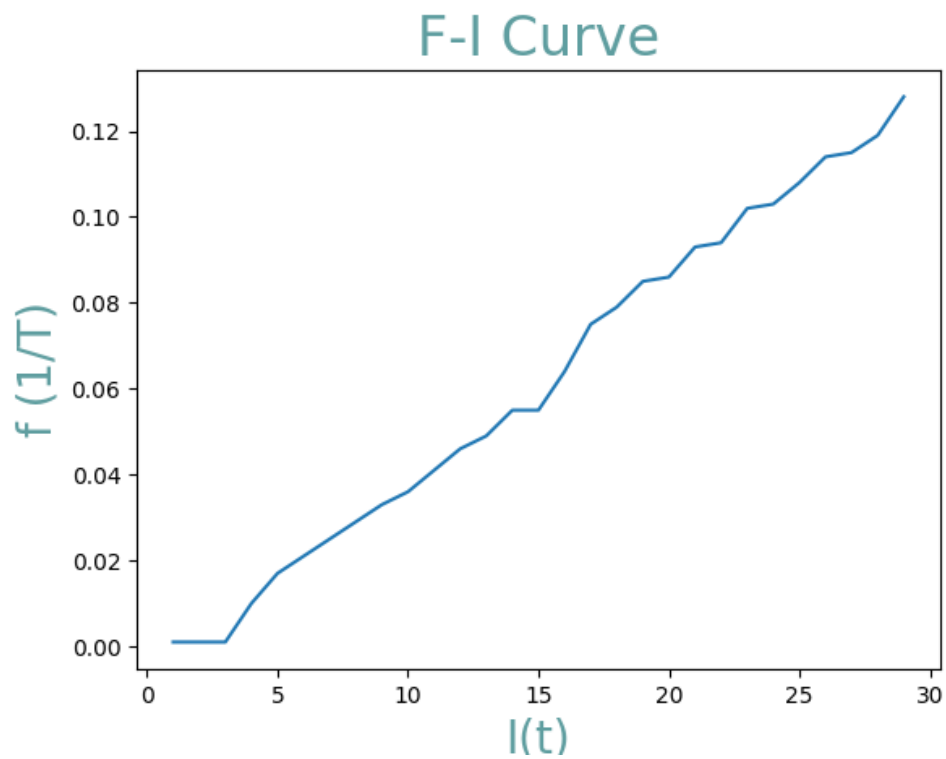


Figure 12: Chattering F-I curve in 1000ms

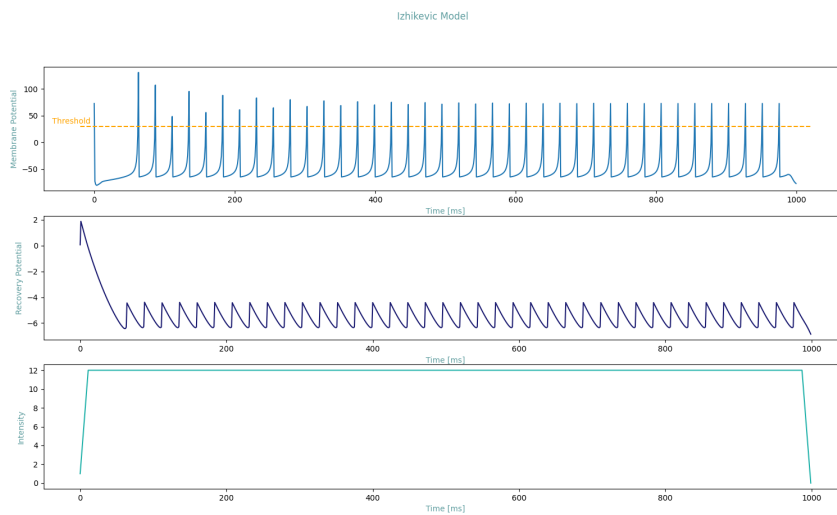


Figure 13: Low Threshold Spiking with constant  $I = 12$

همانطور که مشاهده میکنید نمودار طبق توصیفی که انتظار داشتیم رفتار کرده اند حال مانند دفعه های قبل بجای جریان ثابت جریان همراه نویز به مدل تزریق میکنیم که تصویر ان را در شکل ۱۴ و ۱۵ ببینید

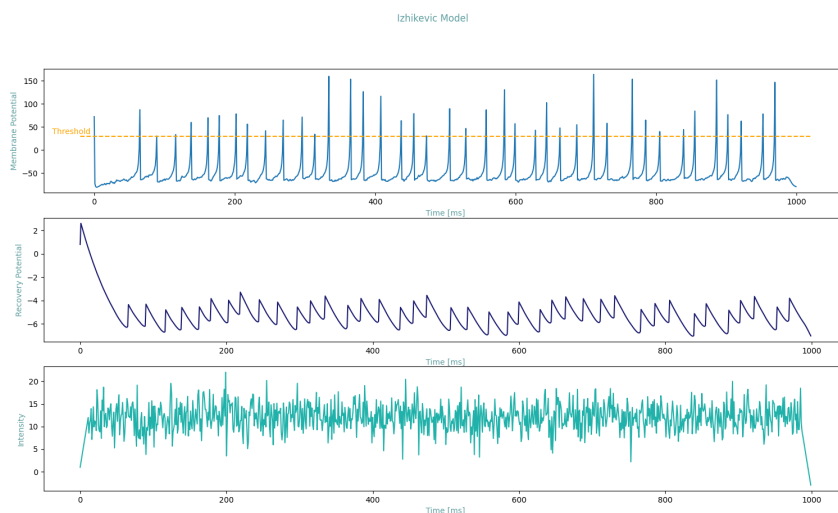


Figure 14: Low Threshold Spiking with  $I\text{-mean} = 12$  and  $I\text{-STD} = 3$

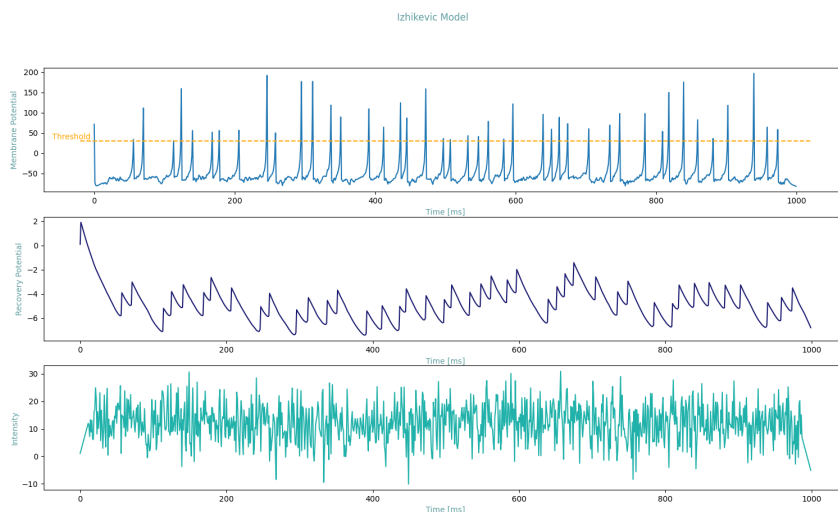


Figure 15: Low Threshold Spiking with  $I\text{-mean} = 12$  and  $I\text{-STD} = 7$

در این دو حالت که نویز با میزان مختلف تزریق شده است علاوه بر این که رفتار همیشگی خود یعنی ایجاد sub-Threshold fluctuation نشان داده است بلکه این نویز باعث شده

در جاهایی دیگر الگوی LTS نداشته باشد و بیشتر از حد انتظار از threshold عبور کند. حال نمودار F-I curve را رسم میکنیم طبق انتظار این رفتار از رفتار chattering باید اسپایک کمتری داشته باشد.

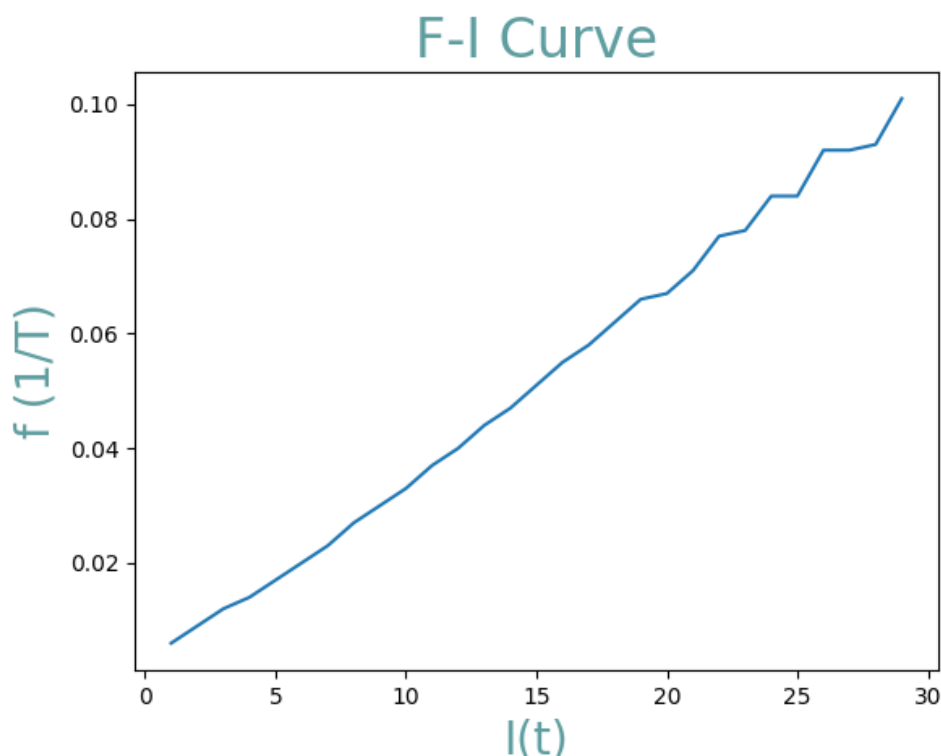


Figure 16: Low Threshold Spiking F-I curve in 1000ms

و مطابق شکل ۱۶ همان چیزی که انتظار داشتیم هم رخ داد و نوسان نوروں ها کمی کمتر از حالت قبل بوده است

## 5. Fast Spiking

در این حالت همانطور که از اسمش پیداست تعداد اسپایک های بالایی دارد. پارامترها برای شبیه سازی آن در مدل نوروئی ایزیکویچ به صورت زیر میباشد:

- $a = 0.1$
- $b = 0.2$
- $c = -65$
- $d = 2$

در این حالت مقدار پارامتر  $a$  تا حد زیادی افزایش پیدا کرده است که باعث میشود مقدار کاهش  $\text{recovery potential}$  بسیار بالا باشد بنابراین  $v$  دایم فرصت دارد تا  $\text{fluctuation}$  انجام دهد. بنابراین اینگونه در این حالت تعداد اسپایک ها بسیار بالا میباشد. حال نمودار آن با ورودی جریان ثابت ۱۵ را در شکل ۱۷ مشاهده میکنیم.

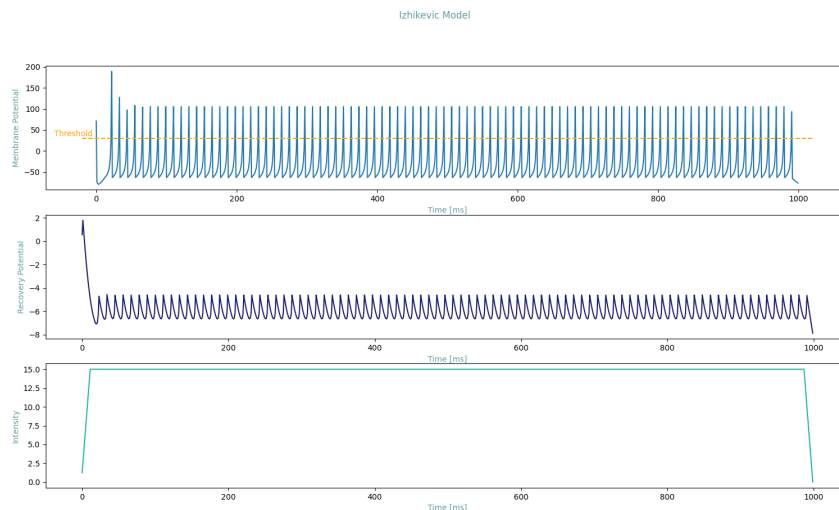


Figure 17: Fast Spiking with constant  $I = 15$

همانطور که انتظار داشتیم هم تعداد اسپایک ها به طرز عجیبی بالاست و هم  $\text{recovery potential fluctuation}$  نرخ بالایی دارد حال مانند حالات قبل و با همان روش جریان همراه با نویز به مدل القا میکنیم. نکته ی جالبی که در رابطه با این رفتار وجود دارد این است که اعمال جریان با نویز تاثیر بسیار کمی بر  $\text{sub-threshold fluctuation}$  دارد. چون به قدری اسپایک ها سریع هستند که فرصت ماندن در  $\text{sub-threshold}$  را نمیدهند. و در آخر میزان اسپایک نوروں را به ازای تزریق جریان بررسی میکنیم ( $F-I$  Curve) انتظار داریم با توجه به میزان اسپایکی که در نمودار های قبل دیدیم این حالت نسبت به حالات قبل نرخ اسپایک بسیار بالاتری داشته باشد.

همانطور که انتظار داشتیم نرخ فرکانس بسیار بالاتر از دیگر حالات بود اما نکته ی جالب اینجاست که از یک جریانی بیشتر (۲۶) تاثیر افزایش جریان بر افزایش نرخ فرکانس بسیار کاهش میابد.

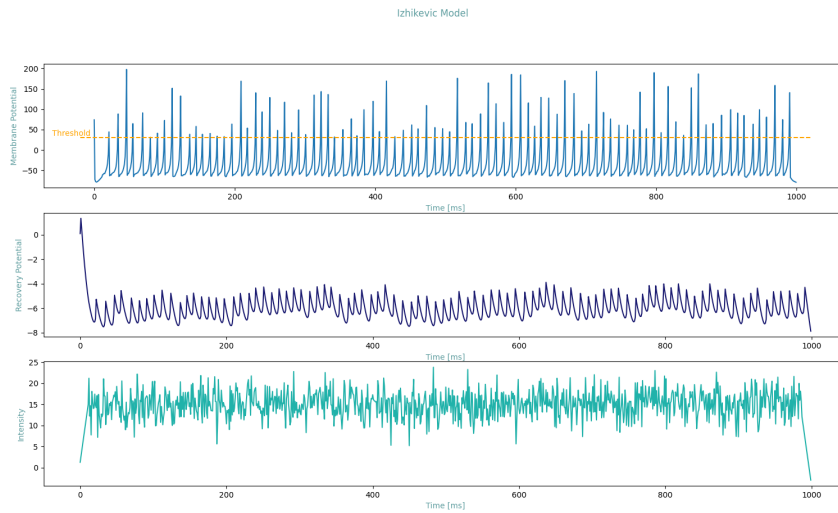


Figure 18: Fast Spiking with I-mean = 15 and I-STD = 3

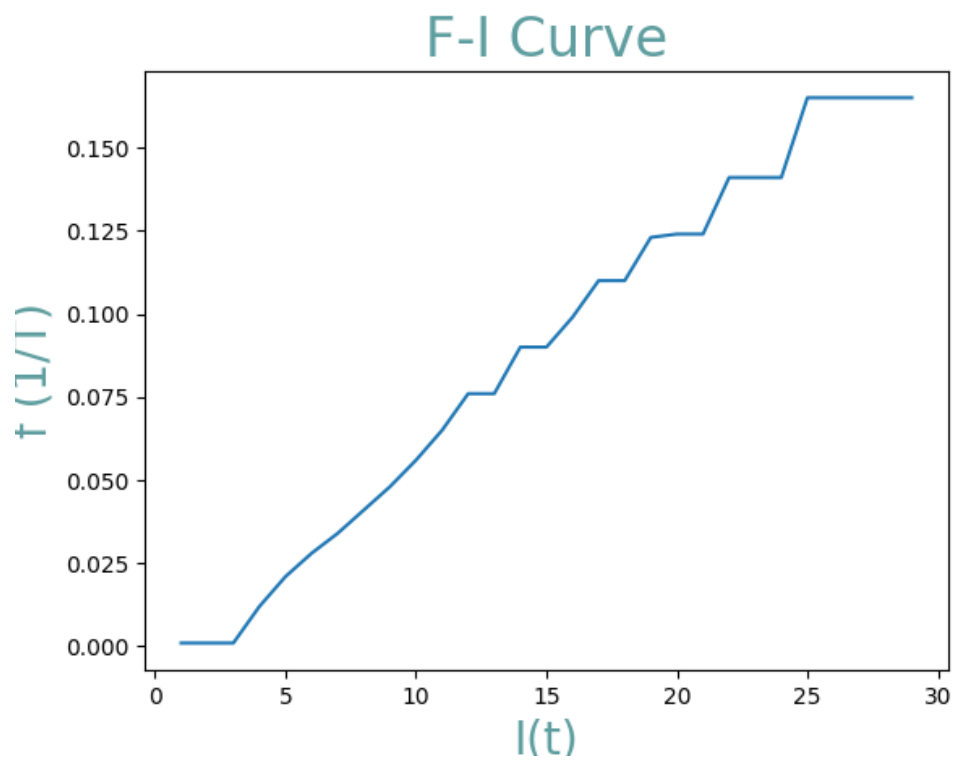


Figure 19: Fast Spiking F-I curve in 1000ms