

s.ghassami@ph.iut.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۷/۲۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۹/۱۰)

:

خیز تصادفی نوفه‌های پس زمینه سیناپسی هستند که از ورودی‌های افت خیز کننده که از هزاران نورون دیگر که به نورون داده شده متصل می‌شوند ایجاد می‌شوند.

رفتارهای دینامیکی جمعی برای مثال همگام‌سازی با سیستمی از نوسانگرهای خطی جفت شده شبیه‌سازی می‌شوند و به طور گسترده‌ای در شبکه‌های پیچیده مورد مطالعه قرار می‌گیرند. برای بررسی رفتارهای دینامیکی به‌هنگرد نیازمندیم.

یکی از مدل‌ها کوراموتو نام دارد که شامل یک مجموعه از نوسانگرهای فاز جفت شده با دامنه ثابت است [۱]. مدل کوراموتو بر روی شبکه‌های تصادفی، منظم، کامل و جهان کوچک مطالعه شده است [۱]. نتایج تحلیلی برای شبکه کامل نشان داده‌اند که با فرض توزیع فرکانس ذاتی برای نوسانگرها برای همگام‌سازی کمترین مقدار جفت‌شدگی نیاز است. استخراج حالت کاملاً همگام

پیشرفت‌های اخیر در تحلیل کمی شبکه‌های پیچیده بر پایه نظریه گراف به سرعت به مطالعه شبکه مغز منجر شدند [۱]. سیستم عملکردی و ساختاری مغز خواص شبکه‌های پیچیده را دارد. توپولوژی جهان کوچک، وجود رئوسی با بیشترین درجه در مقیاس سلولی برای بشر و در مقیاس ماکروسکوپی برای حیوانات از خواص شبکه‌های پیچیده هستند.

نوفه معمولاً به صورت یک منبع اصلی اختلال در مقابل علامت^۱ اصلی در آزمایشگاه هم‌چنین در طبیعت است. تشدید تصادفی [۱] و تشدید همدوس [۱] مثال‌هایی از پدیده‌های جدید هستند که با اثر نوفه داده می‌شوند. نورون‌های مغز مثال‌هایی از سیستم‌های بیولوژیکی هستند که در آن منبع افت و

۱. signal

منظم شروع کنیم و با احتمال p یال‌ها را جابه‌جا کنیم به شبکه جهان کوچک می‌رسیم، این شبکه با ضریب خوشگی بزرگ و میانگین طول مسیر کوچک در بین دو شبکه منظم و تصادفی قرار دارد. شبکه جهان کوچکی از نوسانگرهای فاز را به عنوان مدل ساده‌ای برای دینامیک نورون‌ها در نظر می‌گیریم [۵].

برای دینامیک نوسانگرهای فاز در سیستمی که از نورون‌ها تشکیل شده است [۶] و به منظور شبیه سازی از مدل ارائه شده توسط کوراموتو استفاده می‌کنیم که در آن تغییرات زمانی فاز نوسانگر j ام به صورت زیر داده می‌شود:

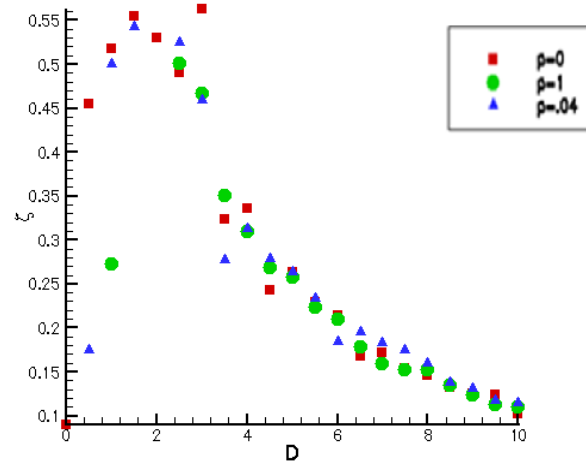
$$\frac{d\phi_j}{dt} = \omega_j - \sin(\phi_j) + \frac{C}{N} \sum_k \sin(\phi_j - \phi_k) + \sqrt{D} \xi_j, \quad (1)$$

که در آن ω_j فرکانس ذاتی نوسانگر j ام و ϕ_j فاز نوسانگر j ام، C ضریب جفت شدگی و N تعداد رئوس است. ξ_j نوفه موجود در رأس یا نوسانگر j ام و D شدت نوفه نامیده می‌شود [۲]. نوفه علامتی است که به طور تصادفی با زمان تغییر می‌کند. برای مقایسه حل‌های مدل کوراموتو در این شبکه‌های منظم، جهان کوچک و تصادفی باید تعداد یال‌ها و رأس‌ها را در این سه شبکه برابر بگیریم. ضریب جفت‌شدگی در شبکه جهان کوچک به صورت نسبت C به درجه رأس تعریف می‌شود. برای ساخت شبکه جهان کوچک از شبکه منظم با N رأس شروع می‌کنیم و با احتمال p هر یال را جابه‌جا می‌کنیم. با قرار دادن $p=0.04$ از شبکه منظم اولیه به شبکه پیچیده‌ای با میانگین طول مسیر کوچک و ضریب خوشگی بزرگ می‌رسیم که خصوصیت شبکه جهان کوچک است. برای محاسبه ϕ_j در هر لحظه و برای تعیین تحریک در بین نورون‌ها به ازای نوفه و فاز اولیه صفر از روش اویلر استفاده می‌کنیم. سپس پارامتر نظم را به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۲]

$$\rho(t) \exp(i\psi(t)) = \frac{1}{N} \sum_k \exp(i\phi_k(t)), \quad (2)$$

که در آن $\psi(t)$ میانگین فاز نوسانگرهای موجود در سیستم و ρ پارامتر نظم نامیده می‌شود.

گام زمان $dt = 0.01$ است. در حالت برانگیخته دو رژیم استاتیکی و دینامیکی منجر به $\rho=1$ می‌شوند. در رژیم استاتیکی تمام واحدها در یک نقطه ثابت در حال سکون هستند و در



شکل ۱. نمودار پارامتر تحریک در شبکه منظم، جهان کوچک و تصادفی.

به وسیله نوفه سفید غیرهمبسته باعث می‌شود همگامی بین نوسانگرها با افزایش قدرت نوفه به طور یکنواخت کاهش یابد [۱]. شبیه سازی عددی با مدل کوراموتو بر روی شبکه جهان کوچک و تصادفی نیز این مطلب را تأیید می‌کند.

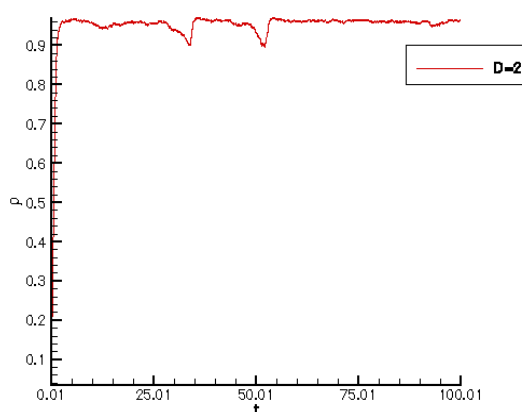
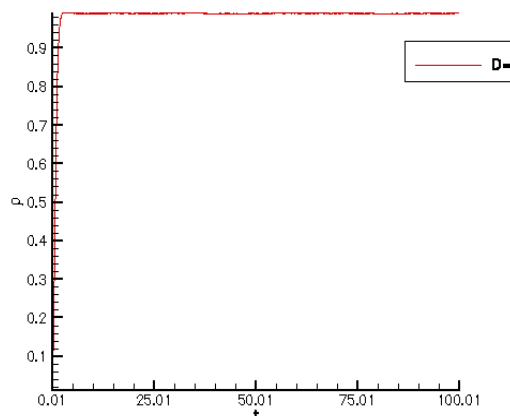
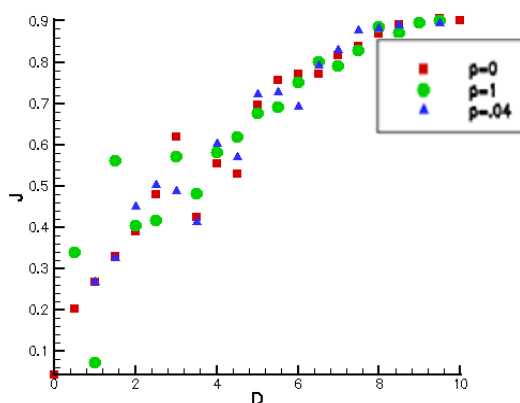
بسیاری از سیستم‌های فیزیکی شیمیایی و بیولوژیکی با رفتارهایی که با یک پاسخ غیر خطی مشخص می‌شود داده می‌شوند [۲].

هم‌گام‌سازی به صورت تنظیم آهنگ اجسام نوسانی در دو جسم در حال نوسان به دلیل برهم‌کنش ضعیف آنها تعریف می‌شود [۳].

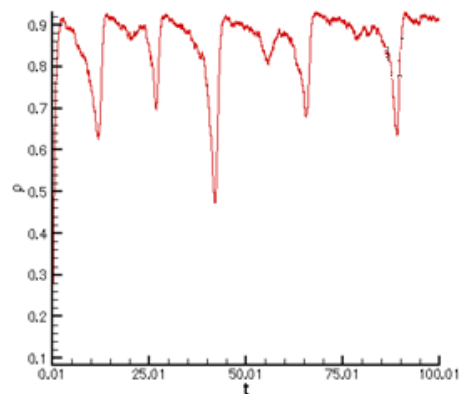
از خواص شبکه‌های پیچیده مانند شبکه مغز به توپولوژی جهان کوچک و رئوسی با بیشترین درجه در مقیاس سلولی برای حیوانات و در مقیاس ماکروسکوپی برای بشر می‌توان اشاره کرد [۴].

در این مقاله به مطالعه اثر نوفه با در نظر گرفتن مدل کوراموتو بر روی شبکه جهان کوچک، که از نوسانگرهای فازی که به هم جفت شده‌اند تشکیل شده است می‌پردازیم. ابتدا نتایج شبیه‌سازی مدل کوراموتو را بر روی شبکه جهان کوچک مطالعه می‌کنیم و به مطالعه اثر نوفه سفید می‌پردازیم.

برای ساخت شبکه جهان کوچک در صورتی که از یک شبکه

شکل ۳. پارامتر نظم برحسب زمان به ازای شدت نوفه $D=2$.شکل ۲. پارامتر نظم برحسب زمان به ازای شدت نوفه $D=1$.

شکل ۵. نمودار جریان در شبکه‌های منظم جهان کوچک و تصادفی.

شکل ۴. نمودار پارامتر نظم برحسب زمان به ازای شدت نوفه $D=3$.

واحد از سیستم نورونها به صورت همگام تحریک می‌شوند و در نهایت چند واحد به طور ناهمگام تحریک انجام می‌دهند. یک شبکه از نوسانگرها می‌تواند تحت تأثیر نوفه سفید گاوسی قرار بگیرد. با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ و ۴ با افزایش نوفه سفید گاوسی روی سیستم، میزان افت و خیزها افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴ در شبکه جهان کوچک با افزایش نوفه داخل سیستم افت و خیزها در سیستم افزایش می‌یابد. پارامتر ρ که انحراف از معیار سیستم را نشان می‌دهد در این حالت مقداری غیر صفر خواهد داشت. با توجه به شکل ۵ با افزایش نوفه، جریان یا فعالیت نوسانگرها افزایش می‌یابد و به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند. با محاسبه پارامتر نظم به ازای سه مقدار p در شکل‌های ۶ و ۷

رژیم دینامیکی تمام واحدها به طور همگام تحریک انجام می‌دهند. برای مشخص کردن حالت دینامیکی از استاتیکی در حالت برانگیخته از پارامتر تحریک استفاده می‌کنیم که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]

$$\zeta = \langle |\rho(t) \exp(i\psi(t)) - \langle \rho(t) \exp(i\psi(t)) \rangle| \rangle, \quad (3)$$

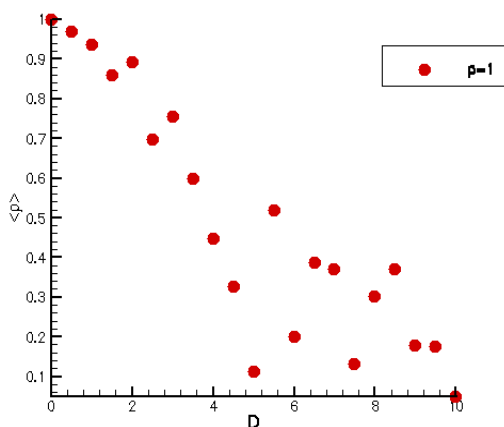
که در آن $\langle \rangle$ میانگین روی زمان است.

برای اندازه‌گیری فعالیت واحدها به تعریف جریان به

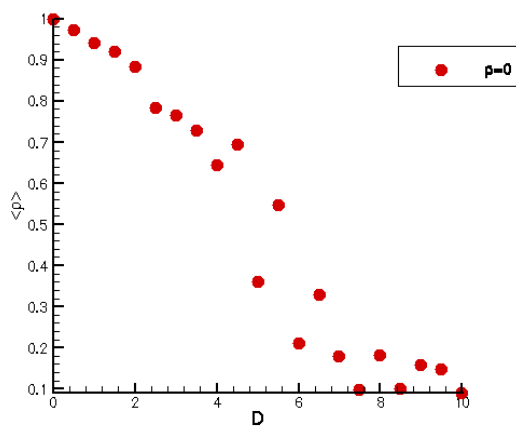
صورت زیر می‌پردازیم [۲]

$$J = \frac{1}{N} \sum_k^N \langle d\phi_k / dt \rangle.$$

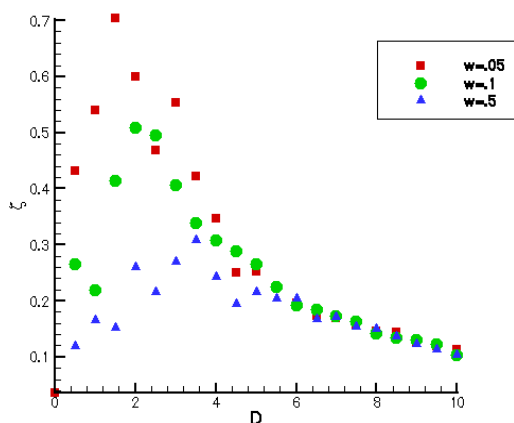
در شکل ۱ با افزایش نوفه روی سیستم مجموعه نورونها به سرعت وارد ناحیه تحریک می‌شود به این معنی که در یک



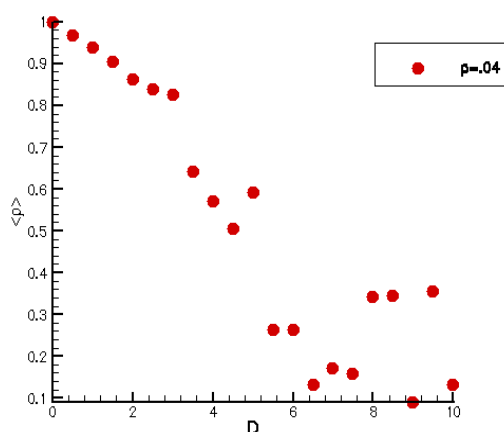
شکل ۷. نمودار پارامتر نظم بر حسب نوفه به ازای $p=1$.



شکل ۶. نمودار پارامتر نظم بر حسب نوفه به ازای $p=0$.



شکل ۹. نمودار پارامتر تحریک بر حسب نوفه به ازای پهنای مختلف در شبکه جهان کوچک.



شکل ۸. نمودار پارامتر نظم بر حسب نوفه به ازای $p=0.04$.

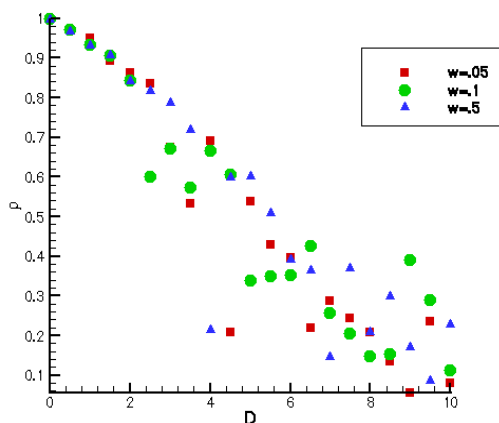
توزیع محاسبه شده‌اند.

با اعمال توزیع فرکانس یکنواخت با گستره σ روی سیستم و با در نظر گرفتن نوفه گاوسی در صورتی که شدت نوفه $D=0.3$ باشد، می‌توان نمودارهای سه کمیت تعریف شده را بر حسب σ به کمک شبیه سازی محاسبه نمود. در حالتی که σ برابر صفر است برای این توزیع عددی تصادفی بین منهای یک و یک انتخاب می‌شود. در واقع σ گستره تغییرات توزیع فرکانس را نشان می‌دهد.

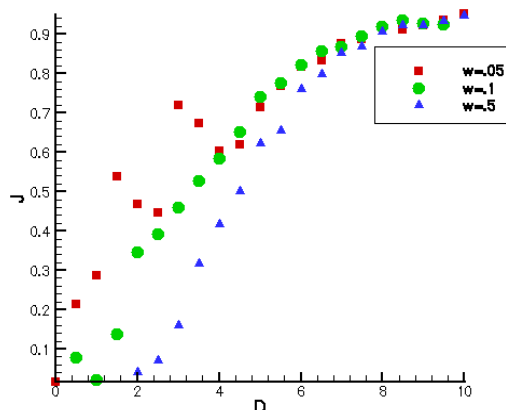
در نمودار شکل ۱۲ با افزایش σ سیستم دچار تحریک جمعی می‌شود، که با توجه به قله نمودار قابل تشخیص است. به همین ترتیب با توجه به شکل ۱۳ پارامتر نظم با افزایش σ کاهش می‌یابد.

و ۸ به مشاهده یک رفتار نزولی در این نمودارها پی می‌بریم. با اعمال توزیع فرکانس دوقله‌ای داخل سیستم به صورت تابعی از W یا پهنای تغییر این پارامتر به ازای سه مقدار مختلف به محاسبه روابط تعریف شده می‌پردازیم.

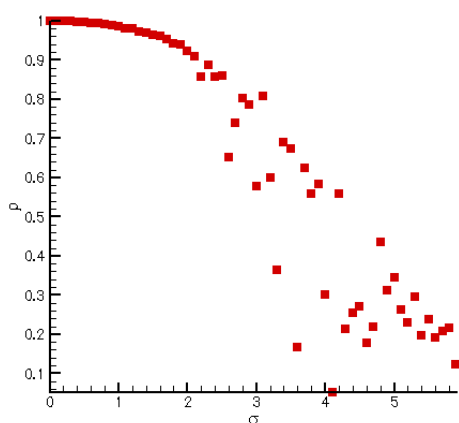
با توجه به شکل ۹ با افزایش پهنای قله نمودار به سمت پایین افت می‌کند و تحریک به ازای نوفه بزرگتری رخ می‌دهد. مقادیر ثابت در این سه حالت متفاوت است. برای ایجاد توزیع فرکانس دوقله‌ای برای مثال نصف رأس‌ها را به صورت تصادفی انتخاب می‌کنیم و به آنها فرکانس $1-W$ و به رأس‌های باقی‌مانده فرکانس $1+W$ را نسبت می‌دهیم. W در این نمودارها، پهنای نامیده می‌شود. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ پارامترهای جریان یا فعالیت نوسانگرها و پارامتر نظم با در نظر گرفتن این



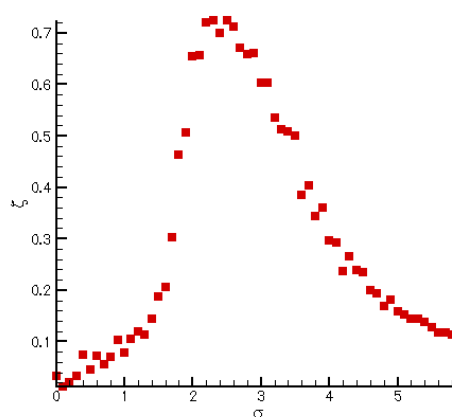
شکل ۱۱. نمودار پارامتر نظم برحسب نوفه به ازای پهنای مختلف در جهان کژوچک.



شکل ۱۰. نمودار جریان برحسب نوفه به ازای پهنای مختلف در جهان کوچک.



شکل ۱۳. نمودار p برحسب σ در شبکه جهان کوچک.



شکل ۱۲. پارامتر تحریک برحسب σ در شبکه جهان کوچک.

ایجاد می‌شود. ابتدا نورون‌ها در حالت تحریک همگام به سر می‌برند و با افزایش نوفه وارد تحریک ناهمگام می‌شوند. با در نظر گرفتن توزیع فرکانس باز هم تحریک، جمعی در سیستم دیده شد. با توجه به نمودار تحریک شبکه جهان کوچک بین دو شبکه منظم و تصادفی قرار دارد.

در شبکه جهان کوچک با تحریک نوسانگرهای فاز حالت همگام را بررسی کرده و به محاسبه پارامتر نظم کوراموتو می‌پردازیم. همگامی کامل بدون در نظر گرفتن نوفه در سیستم دیده شد. به وجود سه ناحیه در این مدل پی می‌بریم. نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش نوفه تحریک جمعی در سیستم

Neuroscience **10** (2009) 186.

5. Susan Standring "Gray's Anatomy" The Anatomical basis of clinical practice, Elsevier, Thirty ninth edition (2005).
6. Richard S Snell "Snell's Anatomy" Clinical Anatomy by Regions, Goerge Washington University, Eighth edition (2004).

1. R Kouhi Esfahani, F Shahbazi, and K Aghababaei Samani, *Phys. Rev. E* **86** (2012) 036204.
2. C J Tessone, A Scire, R Toral, and P Colet, *Phys. Rev. E* **75** (2007) 016203.
3. A Pikovsky, M Rosenblum, and J Kurths "Synchronization" Cambridge Univ. press (2001).
4. E Bullmore and O Sporns, *Nature Reviews*