

## The effect of ELF Magnetic fields on Nonlinear features of Helix Aspersa's Neurons

H.Tavakoli <sup>1</sup>, A. Nasrabadi <sup>2\*</sup>, S.M.P Firoozabadi <sup>3</sup>, M. Kaviyani Moghaddam <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D Student, BioMedical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, tavakkoli@shahed.ac.ir

<sup>2</sup>Associate Professor, BioMedical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Professor, Medical Physics Department, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Pourmir@modares.ac.ir

<sup>4</sup>Medical Physics Department, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, kaviani\_mm@modares.ac.ir

### Abstract

During recent years, the environment has been enormously changed by the wide range of magnetic fields. Therefore, comprehensive studies are being done for investigating their biological effects. The effects such as inhibition of bioelectric activity of neurons which is shown by evidence, like decreasing in the firing frequency or decreasing in the amplitude of action potential, have been shown. To notify and investigate these effects, the theory of "biological windows" have been proposed and considered. The effects of amplitude and/or frequency of magnetic field have been pointed in some research. In this study, regarding the behavior of nervous system, which has non-linear dynamic behavior, we study the behavior of nervous system under exposure to magnetic field. We investigate whether the low frequency field is able to affect the dynamic of nerve cells and to have influence on non-linear features of signal. We used 6 environmental intensities and 6 cells have been used in each intensity, and by calculating some of non-linear features of action potential such as Higuchi Dimension and Return map of signal, during the time and in some different intensities of magnetic fields, It was observed that all intensities magnetic fields lead to increasing in Higuchi Dimension and increasing in the scattering of the Return map of signal. Of course these effects has been more observed in the middle band of frequency which has been confirmed by the theory of 'frequency window' effect of magnetic fields, which it has been noticed and discussed in last two decades.

**Key words:** Higuchi Dimension, Action Potential, Return Map, Low Frequency Magnetic Fields, Chaos

\*Corresponding author

Address: Biomedical Engineering Department, Faculty of Engineering, ShahedUniversity, Postal Code: 3319118651, Tehran, I.R. Iran  
Tel: +982151212075  
Fax: +982151212021  
E-mail: nasrabadi@shahed.ac.ir

## تأثیر میدانهای مغناطیسی کم فرکانس بر ویژگی های غیر خطی سلول عصبی حلزون باغی

هدی توکلی<sup>۱</sup>، علی مطیع نصرآبادی<sup>۲\*</sup>، سیدمحمد فیروزآبادی<sup>۳</sup>، مهری کاویانی مقدم<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی پزشکی، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران [tavakkoli@shahed.ac.ir](mailto:tavakkoli@shahed.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران

<sup>۳</sup> استاد، گروه فیزیک پزشکی، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران [pourmir@modares.ac.ir](mailto:pourmir@modares.ac.ir)

<sup>۴</sup> دانش آموخته دکتری، گروه فیزیک پزشکی، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران [kaviani\\_mm@modares.ac.ir](mailto:kaviani_mm@modares.ac.ir)

### چکیده

در سالهای اخیر طبیعت به شدت تحت تأثیر طیف وسیعی از میدانهای مغناطیسی، قرار گرفته است؛ لذا همواره مطالعات گسترده‌ای بمنظور بررسی آثار بیولوژیک این میدانها انجام می‌شود. آثاری نظیر مهار عملکرد سلول عصبی - که با شواهدی نظیر کاهش فرکانس یا کاهش دامنه پتانسیل عمل خود را نشان می‌دهد - نشان داده شده است. در توجیه و بررسی این آثار، اخیراً نظریه پنجره‌های بیولوژیک مطرح شده و به آن توجه شده است. در تعدادی از تحقیقات به آثار پنجره‌ای دامنه و یا فرکانس میدانهای مغناطیسی اشاره می‌شود. از سوی دیگر با توجه به رفتار غیرخطی سلول عصبی - که می‌تواند با معادلات  $HH$  بیان شود - می‌توان سلول عصبی را بعنوان سیستمی غیرخطی در نظر گرفت و تغییرات احتمالی دینامیک غیرخطی سلول را تحت تأثیر میدان مغناطیسی  $ELF$  بررسی کرد. در این تحقیق از ۶ شدت میدان بعنوان شدت میدانهای محیطی و در هر شدت میدان، از ۶ سلول عصبی حلزون باغی استفاده شده است و با محاسبه برخی ویژگی‌های غیرخطی پتانسیل عمل سلول نظیر بعد هیگوجی سیگنال و رسم نگاشت بازگشتی، در طول زمان و در شدت میدانهای مختلف، مشاهده شد که برای همه شدت‌های مورد بررسی، میدانهای مغناطیسی سبب افزایش بعد هیگوجی و همچنین افزایش میزان پراکندگی نگاشت بازگشتی ویژگی  $ISI$  از پتانسیل عمل حلزون می‌شوند. این نتایج به معنای افزایش پیچیدگی سیستم و بعبارتی افزایش درجه آزادی سیستم تحت تأثیر میدانهای مغناطیسی است و البته این آثار در باند میانی شدت‌های مورد آزمایش، بیشتر مشاهده می‌شود که مؤید اثر پنجره‌ای ذکر شده است.

کلیدواژگان: بعد هیگوجی، پتانسیل عمل، نگاشت بازگشتی، میدانهای مغناطیسی کم فرکانس، آشوب.

\*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، بزرگراه خلیج فارس، روبروی حرم امام خمینی (ره)، دانشگاه شاهد، کدپستی: ۳۳۱۹۱۱۸۶۵۱

تلفن: ۰۲۱-۵۱۲۱۲۰۷۵، ۰۲۱-۵۱۲۱۲۰۲۱، پیام‌نگار: [nasrabadi@shahed.ac.ir](mailto:nasrabadi@shahed.ac.ir)

## ۱- مقدمه

امروزه قرارگیری در معرض میدانهای مغناطیسی و خطرهای احتمالی ناشی از این میدانها، به مسأله‌ای نگران‌کننده تبدیل شده است و تحقیقات در بررسی این پدیده و مضرات احتمالی آن، فعالانه انجام می‌شود [۱-۳]. علیرغم مطالعات گسترده‌ای که در زمینه آثار بیولوژیک میدانهای مغناطیسی کم فرکانس انجام شده است، مکانیسم این آثار در سطح سلولی مشخص نیست و مطالعات متعددی در زمینه آثار این میدانها بر نوروهای خاصی انجام شده است که هنوز به نتیجه واحدی نرسیده است [۴-۷].

اعمال بیولوژیک در رفتارهای انسانی از فعالیتهای نوروبیولوژیکی می‌شود که خود از طریق عملکرد کانالهای یونی انجام پذیر است. اختلاف پتانسیل القا شده با میدان مغناطیسی کم فرکانس، کانالهای یونی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و از آنجایی که فعالیت یونها در نورونها دارای فرکانس طبیعی است، در صورت تداخل با سیگنالهای میدان مغناطیسی، پدیده رزونانس<sup>۱</sup> اتفاق می‌افتد که می‌تواند رفتار سلول را تغییر دهد [۸]. بنابراین مطالعه تغییراتی که در حین اعمال میدان ایجاد می‌شود گام بزرگی در فهم آثار بیولوژیک این میدانها هستند. برای بررسی این تغییرات در "سطح سلولی"، مهم‌ترین نشانه عملکردی سلول یعنی پتانسیل عمل، را بعنوان شاخص در نظر می‌گیریم و چگونگی تغییرات آن را هنگام اعمال میدان بررسی می‌کنیم.

بیشتر مطالعاتی که پیش از این در سطح سلولی و در زمینه بررسی آثار میدانهای مغناطیسی بر عملکرد سلول انجام شده‌اند، بر وجود تأثیر این میدانها بر عملکرد سلول، تأکید کرده‌اند و نشان داده‌اند که میدانهای مغناطیسی تأثیر "مهاری" بر عملکرد سلول دارند [۹]. آثاری نظیر مهار عملکرد سلول عصبی به اثبات رسیده‌اند که با شواهدی همچون کاهش فرکانس یا کاهش دامنه پتانسیل عمل همراه هستند. در توجیه و بررسی این آثار، اخیراً نظریه پنجره‌های بیولوژیک مطرح شده و به آن توجه شده است [۱۰]. در تعدادی از تحقیقات به آثار پنجره‌ای دامنه و

یا فرکانس میدانهای مغناطیسی اشاره می‌شود. در این مطالعه، با توجه به رفتار سیستم عصبی- که بر طبق معادلات  $HH$  رفتار دینامیک غیر خطی دارد [۱۱]- به مطالعه رفتار دینامیک سیستم عصبی تحت تأثیر میدانهای مغناطیسی پرداخته؛ بررسی می‌کنیم که آیا میدانهای مغناطیسی کم فرکانس می‌توانند بر دینامیک سلول تأثیرگذار باشند و ویژگی‌های غیرخطی سیگنال را تحت تأثیر قرار دهند؟

## ۲- مجموعه دادگان

در انجام این پژوهش، از مجموعه سیگنال‌های ثبت شده از فعالیت خودبخودی سلول عصبی حلزون باغی- که کایمانی مقدم آنها را ثبت کرده است- استفاده شده است. دلیل انتخاب حلزون آن است که این حیوان ضمن داشتن سیستم عصبی ساده، دارای بزرگترین نورون‌ها در سلسله جانوران است؛ از اینرو برای مطالعه فرایندهای سلولی و مولکولی، بخصوص در ثبت داخل سلولی از مناسب‌ترین نمونه‌ها به شمار می‌آید. اندازه بزرگ نورون‌ها، شناسایی و ورود الکتروود به سلول را تسهیل می‌کند و خونسرد بودن، مشکلات نگهداری آنها را در شرایط *in vitro* کاهش می‌دهد [۹، ۱۲].

آزمایش‌ها برای سلول عصبی  $FI$  انجام شده است و این سلول بر اساس اندازه و موقعیت و همچنین بر اساس ویژگیهای الکتروفیزیولوژیک آن، شناسایی می‌شود.

## ۲-۱- گروه‌های آزمایشی

دادگانی که در اختیار قرار دارند، در دو گروه مجزا تقسیم‌بندی می‌شوند:

- گروه کنترل

- گروه تحریک (تجربی)

گروه کنترل، سلول‌هایی هستند که تحت تابش میدان مغناطیسی نبوده‌اند و در شرایط کنترل از فعالیت خودبخودی

<sup>۱</sup>Resonance

### ۲-۳- شدت میدان‌های مورد استفاده

در مطالعه کاویانی و همکاران- که با هدف بررسی تأثیر میدان‌های مغناطیسی با شدت‌های محیطی انجام شده است- ۶ شدت میدان بعنوان شدت میدان‌های محیطی بررسی شده‌اند که این شدت‌ها، عبارتند از:

- ۲/۸۳ میکروتسلا

- ۶/۰۲ میکروتسلا

- ۱۴/۹۱ میکروتسلا

- ۴۵/۸۷ میکروتسلا

- ۱۰۹/۳۴ میکروتسلا

- ۲۰۷/۲۰ میکروتسلا

### ۲-۴- روش کار و گروه‌بندی دادگان

برای هر شدت میدان و برای هر یک از سلول‌ها، بازه زمانی ۳۰ دقیقه‌ای ثبت را به ۷ بازه زمانی تقسیم کردیم تا آثار گذشت زمان را بهتر مشاهده کنیم. بازه‌های زمانی به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

- ۱۲-۰ دقیقه

- ۱۴-۱۲ دقیقه

- ۱۶-۱۴ دقیقه

- ۱۸-۱۶ دقیقه

- ۲۰-۱۸ دقیقه

- ۲۰ - ۳۰ دقیقه

- ثبت متعاقب

در مطالعات قبلی، کاویانی و همکاران، با اعمال میدان در فواصل ۲ دقیقه‌ای از زمان صفر و بررسی ویژگی‌های فیزیولوژیک سلول، نشان داده‌اند که اعمال میدان در ۱۲ دقیقه اول هیچ تغییر معنی‌داری را از لحاظ آماری در ویژگی‌های فیزیولوژیک سلول ایجاد نمی‌کند. بنابراین در این تحقیق، از ابتدا ۱۲ دقیقه به صورت متوالی سلول‌ها را با میدان تابش داده‌اند و بعد از ۱۲ دقیقه تابش، اولین ثبت را انجام داده‌اند.

آنها، به روش جریان محدود شده، ثبت بعمل آمده است و در واقع بعنوان مرجع رفتار طبیعی سلول استفاده می‌شوند.

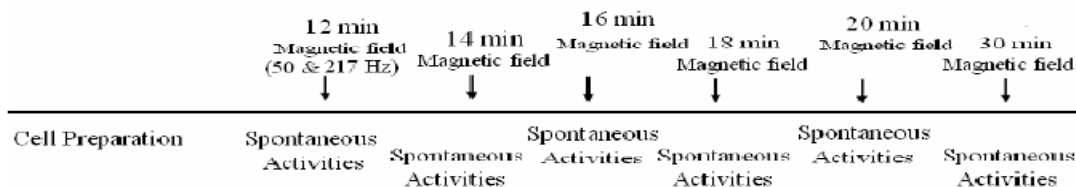
گروه تحریک، سلول‌هایی هستند که در شدت‌های مختلف میدان و در بازه‌های زمانی متوالی تحت تابش میدان قرار گرفته‌اند و از فعالیت خودبخودی آنها به روش جریان محدود شده، ثبت بعمل آمده است.

پس از انجام مراحل آماده‌سازی سلول‌های عصبی در شرایط کنترل و قبل از اعمال میدان مغناطیسی، ابتدا ثبت پایه انجام می‌شد. در صورتی که نوری از نظر ویژگی‌های الکتریکی غشا، دارای وضعیت مناسب و پایدار بودند، ثبت پتانسیل‌های غشایی به روش جریان محدود شده، در شرایط کنترل و متعاقب آن در شرایط اعمال میدان مغناطیسی، انجام می‌شد. سیگنال‌ها با آهنک نمونه‌برداری  $40\text{ kHz}$  ثبت شدند و با استفاده از مبدل  $A/D$  دیجیتال شده و به کمک نرم‌افزار  $chart5$  در رایانه ذخیره شدند.

### ۲-۲- زمان‌بندی تابش میدان

نحوه زمان‌بندی تابش میدان در شکل (۱) نشان داده شده است. ابتدا سلول به مدت ۱۲ دقیقه متوالی تحت تابش میدان مغناطیسی قرار گرفت. سپس به مدت ۱ دقیقه از سلول ثبت سیگنال انجام شد. در مرحله بعدی، به مدت ۲ دقیقه سلول مجدداً تحت تابش میدان قرار گرفت و ثبت بعدی انجام شد. به همین ترتیب تا زمان ۲۰ دقیقه، ثبت‌های متوالی، هر بار به مدت ۱ دقیقه از فعالیت خودبخودی سلول انجام شد. بعد از ۲۰ دقیقه، تابشی طولانی، بمدت ۱۰ دقیقه داده شد و در نهایت پس از قطع میدان و سپری شدن مدت زمان مشخصی ثبت متعاقب<sup>۲</sup> انجام شد تا نحوه برگشت به حالت عادی بررسی شود. در گروه تحریک از ۶ شدت میدان استفاده شد و در هر شدت میدان از ۶ سلول، با روش جریان محدود ثبت خودبخودی، انجام شد.

<sup>2</sup>Follow Up



شکل (۱) - نحوه تابش میدان در سلول‌های تحریک [۹]

در ایمن روش از سری داده‌های ورودی  $x(1), x(2), \dots, x(N)$  سری جدیدی بصورت رابطه (۱) ساخته می‌شود، که در آن  $m$  نشان‌دهنده نقطه اولیه هر سری و  $k$  نشان‌دهنده جزء صحیح عدد است. برای هر  $x_m^k$  طول از رابطه (۲) بدست می‌آید که در آن  $N$  نشان‌دهنده تعداد  $L_m(k)$  نمونه‌ها و  $Nc$  نیز، ضریب هنجارسازی است.

$$x_m^k = \begin{cases} x(m), x(m+k), \dots, \\ x\left(m + \left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor k\right) \end{cases}$$

for  $m = 1, 2, \dots, k$

$$L_m(k) = \frac{1}{k} \left\{ \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor} |x(m+ik) - x(m+(i-1)k)| * Nc \right\},$$

$$Nc = \frac{(N-1)}{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor k}$$

برای هر  $k$  تعداد  $k$  طول بدست می‌آید و سپس میانگین آنها بعنوان طول میانگین محاسبه می‌شود. این عمل به تعداد  $k_{max}$  مرتبه تکرار می‌شود. بعد هیگوجی، شیب بهترین خط تقریب زده شده با روش کمترین مربعات خطا، برای  $\ln(L(k))$  برحسب  $\ln(1/k)$  است.

#### ۲-۵-۲- نگاشت بازگشتی<sup>۴</sup>

یکی دیگر از ابزارهای پردازش غیرخطی، بررسی رفتار بازگشتی سیستم در فضای فاز آن است. نگاشت تکرارشونده (بازگشتی) یک بعدی از سیستمی بر پایه تابعی تک متغیره از یک متغیر سیستم و بصورت زیر بیان می‌شود:

برای هر سلول از هر شدت میدان و برای هر یک از بازه‌های زمانی ذکر شده فوق، ویژگی‌های مورد نظر را - که در ادامه توضیح داده خواهند شد - محاسبه کرده؛ در نهایت نتایج مقایسه زمان‌های مختلف و شدت‌های مختلف میدان ارائه خواهد شد.

#### ۲-۵-۲- استخراج ویژگی از سیگنال پتانسیل عمل

سلول عصبی - همانگونه که با معادلات  $HH$  نیز مدل می‌شود - دارای ساختاری غیرخطی است [۱۳] و این احتمال وجود دارد که در اثر قرارگیری تحت تابش میدان مغناطیسی، همانطور که ویژگی‌های فیزیولوژیک سلول تحت تأثیر قرار می‌گیرند [۱۴]، ساختار غیرخطی سلول نیز دستخوش تغییر شود. برای بررسی ساختار غیرخطی یک سیستم و بررسی اینکه آیا سیستم در شرایط خاص مورد نظر دچار تغییر می‌شود یا خیر، می‌توان ویژگی‌های غیرخطی سیستم (یا سیگنال خروجی آن) را محاسبه کرده؛ نحوه تغییرات آن را هنگام اعمال شرایط مورد نظر بررسی کرد. به منظور بررسی ویژگی‌های غیرخطی سیگنال مورد نظر، دو ویژگی غیرخطی بعد هیگوجی<sup>۳</sup> و نگاشت بازگشتی سیگنال را محاسبه کرده؛ تغییرات آن را در طول بازه‌های زمانی تابش میدان بررسی می‌کنیم.

#### ۲-۵-۲-۱- بعد هیگوجی

ابعاد فرکتال از معیارهای کمی‌کننده کیاس و نشان‌دهنده ویژگی‌های هندسی بستر جذب هستند که سرعت محاسبه نسبتاً زیادی نیز دارند. تعاریف و روش‌های مختلفی برای محاسبه بعد فرکتال وجود دارد [۱۵، ۱۶]. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها تعریف هیگوجی است که بصورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

<sup>۳</sup>Higuchi Dimension

<sup>۴</sup>Return Map

آنتروپی مفهومی نسبی است؛ بنابراین این "تغییرات" آنتروپی وضعیت دینامیک سیستم را مشخص می‌کند نه میزان مطلق آن. به همین دلیل سراغ تعاریفی از آنتروپی می‌رویم که تغییرات را نشان می‌دهند. آنتروپی کولموگروف-سینایی از جمله این تعاریف است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N\tau} \sum_{n=0}^{N-1} (s_{n+1} - S_n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N\tau} [S_N - S_0] \quad (4)$$

بنابراین آنتروپی کولموگروف-سینایی را می‌توان از اختلاف آنتروپی اولیه و آنتروپی بعد از گذشت  $N$  تکرار بخش بر زمان  $N$  تکرار حساب کرد. این تغییر آنتروپی می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در روش محاسبه، با استفاده از ویولت سیگنال به باندهای مختلف تجزیه و سپس در بازه زمانی توزیع انرژی محاسبه و آنتروپی بر مبنای آن تعریف می‌شود.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- نتایج محاسبه بعد هیگوجی

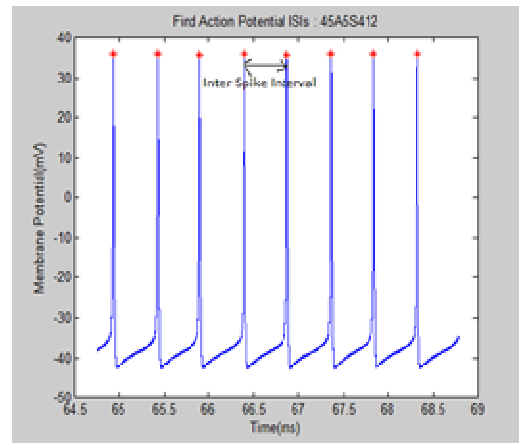
با محاسبه بعد هیگوجی برای ۶ شدت میدان ذکر شده و ۶ سلول در هر گروه و ۷ بازه زمانی برای هر سلول مشاهده شد که در هر شدت میدان مغناطیسی، با گذشت زمان، یعنی از بازه زمانی ۰-۱۲ دقیقه تا بازه زمانی ۲۰-۳۰ دقیقه، بعد هیگوجی سیگنال افزایش می‌یافت. این افزایش بعد در همه شدت‌های میدان مشاهده شد؛ اما با استفاده از روش تحلیل واریانس ANOVA تنها در شدت‌های ۱۴/۹۱، ۴۵/۸۷ و ۱۰۹/۳۴ میکروتسلا، افزایش در زمان ۲۰-۳۰ دقیقه در مقایسه با زمان ۱۰-۱۲ دقیقه، از لحاظ آماری معنادار بوده؛ بیشترین افزایش بعد در شدت میدان ۱۴/۹۱ میکروتسلا مشاهده شد [شکل (۳)].

#### ۳-۲- نتایج رسم نگاشت بازگشتی

برای بررسی تأثیر گذشت زمان بر نگاشت بازگشتی سیگنال، نگاشت بازگشتی زمان ۰-۱۲ و زمان ثبت متعاقب را برای هر سلول رسم کردیم و همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود

$$X_{n+1} = f(X_n) \quad (3)$$

برای بررسی رفتار بازگشتی یا تکرارشونده سیگنال، یکی از ویژگی‌های سیستم را بعنوان متغیر حالت سیستم در نظر می‌گیریم و مقدار این ویژگی را در زمان حال و لحظه بعد بر حسب یکدیگر رسم می‌کنیم. در تحقیق حاضر، ویژگی  $ISI^5$  (فاصله زمانی بین دو قله متوالی پتانسیل عمل) را بعنوان متغیر در نظر می‌گیریم و نگاشت بازگشتی  $ISI(n+1)$  بر حسب  $ISI(n)$  را رسم می‌کنیم.



شکل (۲)- نمایش متغیر ISI برای سیگنال پتانسیل عمل

#### ۳-۵-۲- آنتروپی

یکی دیگر از معیارها در بررسی دینامیک سیستم‌ها، آنتروپی است. این معیار به بررسی تعداد حالات سیستم و متناظر با آن میزان بی‌نظمی در سیستم می‌پردازد. اگر سیستمی دارای  $N$  حالت ممکن<sup>۶</sup> باشد، طبق تعریف شانون<sup>۷</sup>، آنتروپی (بی‌نظمی) آن متناسب با لگاریتم  $N$  است. بدین معنا که اگر تعداد حالت‌های ممکن که پاسخ سیستم می‌تواند در آنها قرار داشته باشد زیاد شود، احتمال وقوع هر کدام از این حالت‌ها کمتر شده؛ در نتیجه عدم قطعیت سیستم بیشتر می‌شود. هر اندازه در سیستمی احتمال وجود این حالات افزایش یابد، رفتار سیستم به رفتار یقینی نزدیک‌تر می‌شود.

استخراج آنتروپی به دو صورت یکی از زمان و بر اساس هیستوگرام و دیگری از فرکانس و بر اساس موجک<sup>۸</sup> است.

<sup>۵</sup>Inter Spike Interval

<sup>۶</sup>Possible State

<sup>۷</sup>Shanon

<sup>۸</sup>Wavelet

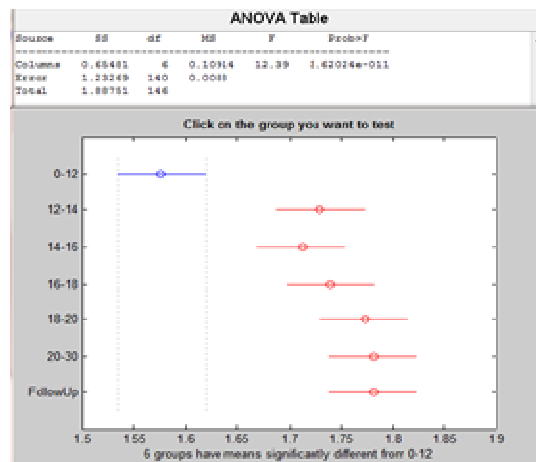
مشاهده شد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر سلول در باندهای میانی میدان‌های مغناطیسی مشاهده می‌شود که این مسأله مؤید اثر پنجره‌ای میدان‌های مغناطیسی است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

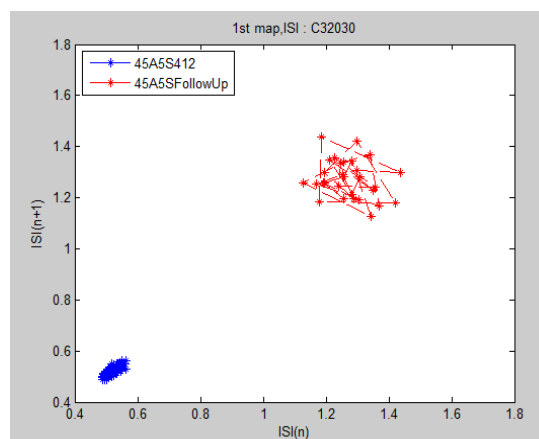
بعد هیگوجی سیگنال در واقع بیانگر میزان پیچیدگی سیگنال در فضای فاز است. افزایش بعد هیگوجی در اثر تابش میدان مغناطیسی و با گذشت زمان، افزایش پیچیدگی سیستم را در اثر قرارگیری در معرض میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. همچنین در رسم نگاهت بازگشتی برای ویژگی *ISI* از سیگنال، مشاهده شد که با تابش میدان و با گذشت زمان، پراکندگی نقاط در فضای افزایش می‌یابد و این بیانگر افزایش درجه آزادی سیستم تحت تابش میدان مغناطیسی است این نتیجه با افزایش بعد هیگوجی دقیقاً در یک راستاست؛ چرا که افزایش بعد به معنای افزایش پیچیدگی و در واقع بیانگر افزایش درجه آزادی سیستم است. علاوه بر این، افزایش پراکندگی نقاط در فضای فاز، تغییر در رفتار متناوب سیگنال را نشان می‌دهد.

در زمان ۰-۱۲ دقیقه نگاهت *ISI* بسیار متراکم‌تر است و این رفتار متناوب سیگنال را نشان می‌دهد؛ اما در زمان ثبت متعاقب پراکندگی نقاط بسیار بیشتر شده و بیانگر آن است که با قرارگیری در معرض میدان مغناطیسی و با گذشت زمان، رفتار متناوب سیگنال تحت تأثیر قرار گرفته و عبارتی در مقایسه با زمان ۰-۱۲ دقیقه، مقداری بی‌نظمی در رفتار سلول مشاهده می‌شود. در نهایت می‌توان گفت تحت تأثیر تابش میدان مغناطیسی، دینامیک غیرخطی سلول، متأثر شده؛ بعد سیستم یا درجه آزادی سیستم افزایش می‌یابد. در فضای فاز نیز افزایش بعد و درجه آزادی، و همچنین افزایش بی‌نظمی با پراکندگی بیشتر نقاط در فضا نمود پیدا می‌کند.

پراکندگی نقاط در زمان ثبت متعاقب در مقایسه با بازه زمانی ۰-۱۲ دقیقه بیشتر شده است و این بیانگر افزایش درجه آزادی سیستم و همچنین تغییر در رفتار متناوب سیگنال است.



شکل (۳)- نتایج محاسبه بعد هیگوجی، شدت میدان ۱۴/۹۱، بازه‌های زمانی مختلف



شکل (۴)- مقایسه نگاهت بازگشتی بازه زمانی ۰-۱۲ و ثبت متعاقب، شدت میدان ۴۵/۸۷ میکروتسلا

#### ۳-۳- نتایج محاسبه آنتروپی

با بررسی نتایج محاسبه آنتروپی در شدت‌های مختلف میدان و در طول زمان، ملاحظه شد در تمام شدت‌ها آنتروپی سیگنال در گذر زمان، افزایش داشته است؛ اما مثل بعد هیگوجی، میزان این افزایش در شدت‌های مختلف میدان متفاوت بوده؛ به طوری که دوباره بیشترین اختلاف، برای شدت میدان ۱۴/۹۱ میکروتسلا

ویژگی‌های غیرخطی بکار رفته و محاسبه شده در این تحقیق در تحقیق‌های دیگر بکار گرفته نشده است؛ اما در بحث مقایسه می‌توان به مقالات و تحقیقاتی اشاره کرد که با این تحقیق در یک راستا هستند. بعنوان مثال در مطالعه کاویانی و همکاران نشان داده شده است که در اثر قرارگیری در معرض میدان‌های مغناطیسی کم فرکانس، فرکانس پتانسیل عمل کم می‌شود، که این در واقع بیانگر همان اثر افزایش فاصله بین اسپایک‌ها است و در شکل (۴) قابل مشاهده است. مطالعات دیگری نیز وجود دارند که به بررسی ویژگی‌های غیرخطی سلول و بررسی پدیده‌های آشوبگونه پرداخته‌اند که البته ویژگی‌ها و پدیده‌های دیگری را بررسی کرده‌اند در اغلب آنها احتمال وقوع پدیده‌های آشوبگونه نظیر بایفورکاسیون و البته در مقاله‌های مختلف با در نظر گرفتن پارامترهای متفاوت بعنوان پارامتر کنترلی بایفورکاسیون، بررسی شده است و نشان داده شده که در اثر تغییر برخی پارامترهای کنترلی از مدل  $HH$  پدیده بایفورکاسیون<sup>۱۰</sup> در رفتار سلول عصبی قابل مشاهده است. این پدیده نوعی تغییر را در رفتار غیرخطی سیستم نشان می‌دهد که در این تحقیق نیز با محاسبه کمی‌کننده‌های دیگر کیاس، نشان دادیم میدان مغناطیسی، رفتار غیرخطی سلول را تغییر می‌دهد.

اما در توجیه دلیل افزایش بعد و آنتروپی تحت تابش میدان، با توجه به اینکه افزایش بعد افزایش پیچیدگی<sup>۹</sup> سیستم مورد بررسی را نشان می‌دهد؛ می‌توان بیان کرد که تحت تأثیر میدان بعنوان عاملی خارجی و مؤثر بر سلول، رفتار سلول تحت تأثیر ورودی قرار گرفته و یک عامل خارجی دیگر، سبب افزایش درجه آزادی سیستم تولیدکننده این سیگنالها (یعنی سلول)، شده است. به هر حال با وجود اینکه میزان افزایش ویژگی‌های محاسبه شده یکسان نیست؛ روند افزایشی هر دو ویژگی، مؤید افزایش پیچیدگی و عدم قطعیت سیگنال است. ویژگی‌های بعد هیگوجی و آنتروپی دو ویژگی متفاوت، اما با مفهوم مشابه هستند. بعد هیگوجی، پیچیدگی هندسی بستر جذب را نشان می‌دهد و افزایش بعد در اثر تابش میدان، نشان می‌دهد که تابش میدان، به نحوی بر دینامیک غیرخطی سیستم مؤثر بوده است.

هرچه سیستمی بی‌نظم‌تر باشد، قطعیت در آن کمتر بوده و قابلیت پیش‌بینی آن کمتر است و هر چه سیستمی یا سیگنالی قابلیت پیش‌بینی کمتری داشته باشد، اطلاعات بیشتری در آن نهفته است. به هر حال افزایش آنتروپی سیگنال در اثر تابش میدان مغناطیسی نشان می‌دهد که بی‌نظمی یا عدم قطعیت سیستم افزایش می‌یابد و این با مفهوم افزایش بعد - که در واقع، افزایش درجه آزادی سیستم را نشان می‌دهد - در یک راستاست. مسأله دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد مشاهده آثار پنجره‌ای میدان‌های مغناطیسی بر رفتار سلول است [۱۸]. همانطور که در نتایج محاسبه بعد هیگوجی ذکر شد؛ در شدت‌های کم، افزایش معنادار بعد مشاهده نشد. با افزایش شدت میدان، افزایش بعد هیگوجی مشاهده شد و این افزایش بعد دارای بیشترین مقدار در شدت میدان  $14/91$  میکروتسلا بود. مجدداً با کاهش شدت میدان، آثار میدان کمتر شد تا اینکه در نهایت در شدت میدان  $20/207$  میکروتسلا، اختلاف معنادار در افزایش بعد از بین رفت و این در واقع همان نظریه اثر پنجره‌ای میدان‌های مغناطیسی را بیان می‌کند.

<sup>9</sup>Complexity<sup>10</sup> Bifurcation



جدول (۱) - نتایج محاسبه بعد هیگوجی برای شدت‌های مختلف میدان و ۷ بازه زمانی در هر شدت. مشاهده می‌شود که در هر شدت میدان با گذشت زمان، بعد هیگوجی افزایش می‌یابد و میزان این افزایش در شدت‌های مختلف میدان، متفاوت است

| FollowUp | بعد هیگوجی |         |         |         |         |        | زمان (دقیقه)<br>شدت میدان (میکروتسلا) |
|----------|------------|---------|---------|---------|---------|--------|---------------------------------------|
|          | ۲۰ - ۳۰    | ۱۸ - ۲۰ | ۱۶ - ۱۸ | ۱۴ - ۱۶ | ۱۲ - ۱۴ | ۰ - ۱۲ |                                       |
| ۱/۷۱     | ۱/۷۱       | ۱/۷۰    | ۱/۶۸    | ۱/۶۸    | ۱/۶۵    | ۱/۵۹   | ۲/۸۳                                  |
| ۱/۶۲     | ۱/۶۴       | ۱/۶۴    | ۱/۶۷    | ۱/۶۵    | ۱/۶۳    | ۱/۵۲   | ۶/۰۲                                  |
| ۱/۷۸     | ۱/۷۸       | ۱/۷۷    | ۱/۷۴    | ۱/۷۱    | ۱/۷۳    | ۱/۵۷   | ۱۴/۹۱                                 |
| ۱/۶۸     | ۱/۷۰       | ۱/۶۹    | ۱/۶۹    | ۱/۶۷    | ۱/۶۷    | ۱/۶۰   | ۴۵/۸۷                                 |
| ۱/۶۸     | ۱/۷۰       | ۱/۶۸    | ۱/۶۵    | ۱/۶۵    | ۱/۶۴    | ۱/۵۷   | ۱۰۹/۳۴                                |
| ۱/۶۶     | ۱/۶۵       | ۱/۶۶    | ۱/۶۵    | ۱/۶۶    | ۱/۶۵    | ۱/۵۶   | ۲۰۷/۲۰                                |

## ۵- مراجع

باغی؛ پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده

علوم پزشکی، ۱۳۸۷.

- [10] Marko S.M., Myosin phosphorylation –A plausible tool for studying “Biological window; Proceeding of the 3rd International Workshop of Biological Effects of Electromagnetic Fields, 2004; Oct 4-8; Kos, Greece, p.1-9.
- [11] Hodgkin A.L., Huxley A.F., A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve; J. Physiol 1952; 117: 500-44.
- [12] Calvo A.C., Azanza M.J., Electrophysiological responses of snail brain neurons under applied 50 Hz alternating magnetic fields; Electro and Magneto, 1999; 8(3): 305-315.
- [13] Hodgkin A.L., Huxley A.F.A., Quantitative description of membrane and its application to conduction and excitation in nerve; Physiol, 1952; 117: 500-44
- [14] Calvo A.C., Azanza M.J., Electrophysiological responses of snail brain neurons under applied 50 Hz alternating magnetic field; Electro-Magnetobiology, 1999; 18: 305-312.
- [15] Katz M., Fractals and the analysis of waveforms; Comput. Biol Med., 1988; 18(3):145-156.
- [16] Petrosian A., Kolmogorov Complexity of Finite Sequences and Recognition of Different Preictal EEG Patterns; in Proc. IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems, 1995: 212-217.
- [17] Higuchi T., Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory; Physica D, 1988; 31: 277-283.
- [18] Marko S.M., Myosin phosphorylation –A plausible tool for studying “Biological window; Proceeding of the 3rd International Workshop of Biological
- [1] Takebe H., Shiga T., Kato M., Masada E., Biological and health effect from exposure to power – line frequency electromagnetic fields; IOS press, 2000.
- [2] BENER Digest Update, Biological Effects of Nonionizing Electromagnetic Radiation; Philadelphia, Pa., 1994; 4(3).
- [3] Goodman R., Henerson A.S., Transcription and translation in cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields; Bioelectrochem Pioneer, 1991; 25: 335-355.
- [4] Lai H., Singh N.P., Acute exposure to 60 Hz magnetic field increases DNA strand breaks in rat brain cells; Bioelectromagnetics, 1997; 18(2):156-165.
- [5] Azanza M., Isolated neuron amplitude spike decrease under static magnetic field; J Magnetism and Magnetic Material, 1996; 157-158:593-594.
- [6] Calvo A.C., Azanza M., Synaptic neurone activity under applied 50 Hz alternating magnetic field; Comparative Biochemistry and Physiology, 1999; 124: 99-107.
- [7] Calvo A.C., Azanza M.J., Electrophysiologic Responses of Snail Brain Neurons under applied 50-Hz alternating magnetic fields; Electro and Magnetobiology, 1999; 18(3): 305-312.
- [8] Morelli A., Ravera S., Effect of extremely low frequency electromagnetic fields on membrane-associated enzymes; Biochemistry and Biophysics, 2005; 441: 191-198.

[۹] کاویانی مقدم م.، بررسی تأثیر میدان‌های مغناطیسی (ELF)

القاء شده در فرکانس‌های ۵۰ و ۲۱۷ هرتز با شدت‌های

محیطی بر فعالیت بیوالکتریک سلول‌های عصبی حلزون

- [21] Jiang W., Multi-parameter Hopf-bifurcation in Hodgkin-Huxley model exposed to ELF external electric field; *Chaos, Solitons and Fractals*, 2005; 26: 1221-1229.
- Effects of Electromagnetic Fields; 2004 Oct 4-8; Kos, Greece.p.1-9.
- [19] Jiang W., Hopf bifurcation in the Hodgkin-Huxley model exposed to ELF electrical field; *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004; 20: 759-764.
- [20] Jiang W., Two-parameters Hopf bifurcation in the Hodgkin-Huxley model; *Chaos, Solitons and Fractals*, 2005; 23: 973-980.