

بررسی رفتار توانی آستانه در شبکه‌ی شراره‌های خورشیدی

امین نجفی¹، حسین صفری²

¹ گروه فیزیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران
² گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زنجان، ایران

چکیده

نگرش الگوی ترکیبی برای ساخت شبکه پیچیده شراره‌های خورشیدی استفاده شد. قانون اصلاح شده گوتنبرگ-ریشتر به عنوان توزیع بسامد-شدت از داده‌های تجربی خورشیدی به دست آمد. توزیع بسامد-شدت داده‌های خورشیدی روی چندین مرتبه بزرگی از توزیع توانی پیروی می‌کنند. دلایل مختلفی برای انحراف توزیع بسامد-شدت از یک توزیع توانی وجود دارد. از زمره الگوهای مختلفی از تابع توانی، متوجه شدیم که توزیع توانی آستانه بهترین برازش را برای داده‌های تجربی خورشیدی برای مقادیر کوچک دارد. یک الگوی آماری بر پایه آزمون مربع کای با روش الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. در اینجا با استفاده از رویکرد الگوریتم ژنتیک مقادیر پارامترهای توزیع بسامد-شدت داده‌های تجربی را تخمین می‌زند.

Investigation of Threshold Power-Law Behavior in Solar Flare Network

Amin Najafi¹, Hossein Safari²

¹ Department of Physics, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

² Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan P.O. Box 45195-313, Zanjan, Iran

Abstract

The hybrid model approach is adopted to construct the solar are complex network. The modified form of Gutenberg-Richter law is obtained as the frequency- magnitude distribution of the empirical data. The frequency-magnitude distributions of positive-definite data are sometimes observed to follow a power-law over several orders of size. There are reasons to the deviation of the frequency-magnitude distribution from an ideal power distribution. Among many alternative forms of the power-law function, we found that the threshold power-law is well fitted with solar empirical

data at small values. A statistical method based on optimization of the χ^2 -test by application of the genetic algorithm has been used. Here, using the genetic algorithm approach, we calculate the parameters of the Frequency-Magnitude distribution of the empirical data sets. This method estimates the best parameters of the threshold power-law function as the frequency-magnitude distribution of the empirical data, as well.

مقدمه

شراره‌های خورشیدی انفجارهای عظیمی در سطح خورشید هستند که انرژی و نور را در فضا آزاد می‌کنند. زمان وقوع، مکان و انرژی ساختار شراره‌های خورشیدی تقریباً غیر قابل پیش بینی بوده، بنابراین از روش‌های احتمالی برای پیش‌بینی شراره‌های خورشید استفاده می‌شود [1]. قوانین تجربی مانند قانون آموری در شبکه پیچیده شراره‌های خورشیدی بررسی شده است [2]. بررسی نتایج به ما این واقعیت را ارائه می‌دهد که هر دو پدیده شراره‌های خورشیدی و رویدادهای زمین لرزه از یک قانون تجربی پیروی می‌کنند [3]. قانون گوتنبرگ-ریشتر پیچیدگی شبکه‌های شراره‌های خورشیدی را بیشتر نمایان می‌کند. رویکردی از الگوی ترکیبی برای هر دو قانون گوتنبرگ-ریشتر و آموری در پدیده‌های زمین لرزه توسعه داده شده است [4]. فرم‌های مختلفی از قانون گوتنبرگ-ریشتر در شبکه‌های زمین لرزه پیشنهاد شده است. در این مطالعات نیز اصلاحیه‌هایی از توزیع قانون گوتنبرگ-ریشتر برای رویدادهای بزرگ زمین لرزه ای انجام شده

است[5]. در رویکرد شبکه، قانون گوتنبرگ-ریشتر به عنوان توزیع بسامد-شدت داده های تجربی در نظر گرفته می شود. این توزیع را می توان به عنوان تابع توزیع تجمعی از بزرگی انرژی شراره های منتشر شده از خورشید در نظر گرفت[6]. روش تخمین احتمال بیشینه در چارچوب بیضیان و روش الگوریتم ژنتیک روش های مناسبی برای محاسبه پارامترهای توزیع بسامد-شدت داده های تجربی هستند. این روش ها بهترین مقادیر پارامترهای تابع توزیع توانی آستانه را به عنوان توزیع بسامد-شدت داده های تجربی را تخمین می زنند[7]. در پژوهش حاضر، روشی آماری مبتنی بر بهینه سازی آزمون مربع کای به وسیله کاربردهای الگوریتم ژنتیک توسعه داده می شود تا توزیعی با رفتار توانی آستانه را مطالعه کند.

قانون گوتنبرگ-ریشتر

قانون گوتنبرگ-ریشتر یک قانون تجربی بوده که ارتباط بین شدت و تعداد رویدادهای با شدت بیشتر از یک مقدار آستانه را بیان می کند. این قانون به وسیله رابطه زیر بیان می شود:

$$\log_{10}(N_{>M}) = a - bM \quad (1)$$

ریشتر توزیع نمایی را برای شدت رویدادهای خورشیدی بیان می کند. این قانون در واقع آمار رویدادهای شراره ای خورشیدی و زمین لرزه ای را بیان می کند. همچنین، قانون گوتنبرگ-ریشتر خود تشابهی را در شبکه پیچیده شراره های خورشیدی بیان می کند[6].

داده های خورشیدی و مدل شبکه خورشیدی

از اطلاعات 14395 دادهی شرارهی خورشیدی از اول ژانویه 2006 تا 21 ژوای 2016 استفاده میکنیم. زمان وقوع، نوع رویداد، موقعیت رویداد در روی سطح خورشید، زمان قلهی شرارهها، زمان پایان رویداد و انرژی شرارههای خورشیدی از اطلاعات موجود در داده های خورشیدی می باشد[8]. از الگوی ترکیبی بر اساس نگرش مدل آبه سوزوکی و روش گراف پدیداری را برای ساخت شبکهی خورشیدی استفاده می کنیم. مطابق با الگوی ترکیبی، نگرش مدل آبه سوزوکی برای شبکهی شراره های خورشید مبتنی بر مکان و زمان وقوع شرارهها بوده و از نگرش الگوی گراف پدیداری برای زمان وقوع و انرژی شراره های خورشیدی استفاده می شود [6].

توزیع توانی آستانه و روش الگوریتم ژنتیک برای برازش دادهها

مطالعهی داده های تجربی در زمینههای مختلف تحقیقی مثل فیزیک، ستاره شناسی، زمین شناسی، زیست شناسی، اقتصاد و جامعه شناسی حضور رفتار توانی آستانه را در توزیع های تجربی آشکار کرده است. تابع توزیع توانی آستانه به صورت زیر معرفی میشود:

$$P(S)dS = P_0 (S + S_0)^{-\gamma} dS, \quad (2)$$

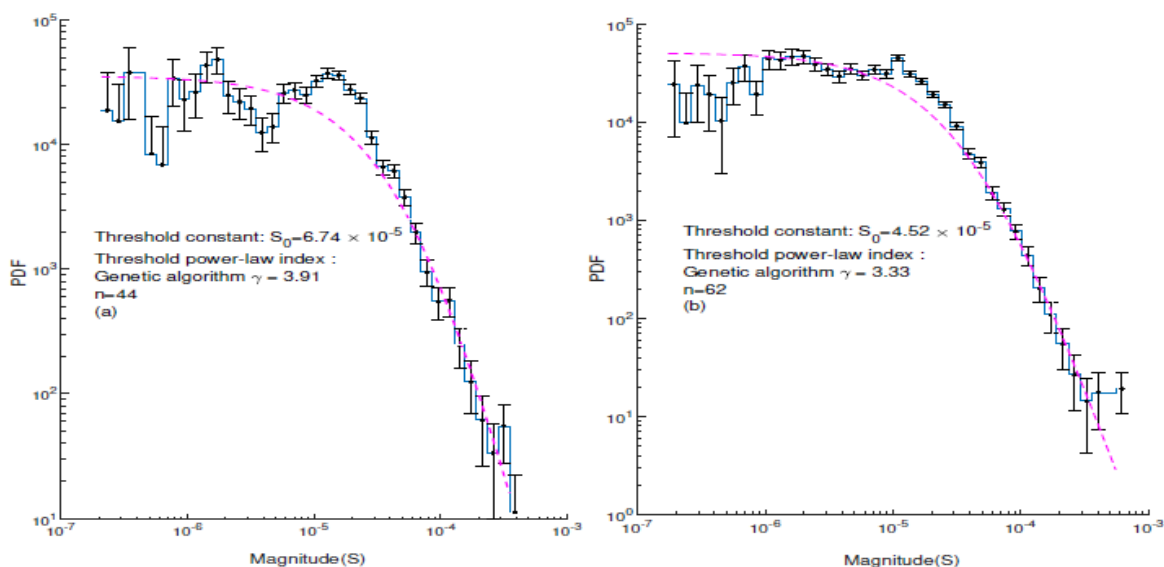
بطوریکه S_0 ، P_0 به ترتیب، مقادیر ثابت آستانه و ثابت بهنجارش میباشند. تابع در بازه محدودی از مقادیر دادهها بهنجار میشود. روش الگوریتم ژنتیک برای برازش داده ها در توزیع توانی در این مرجع به طور کامل معرفی و بررسی شده است. [7]

نتایج

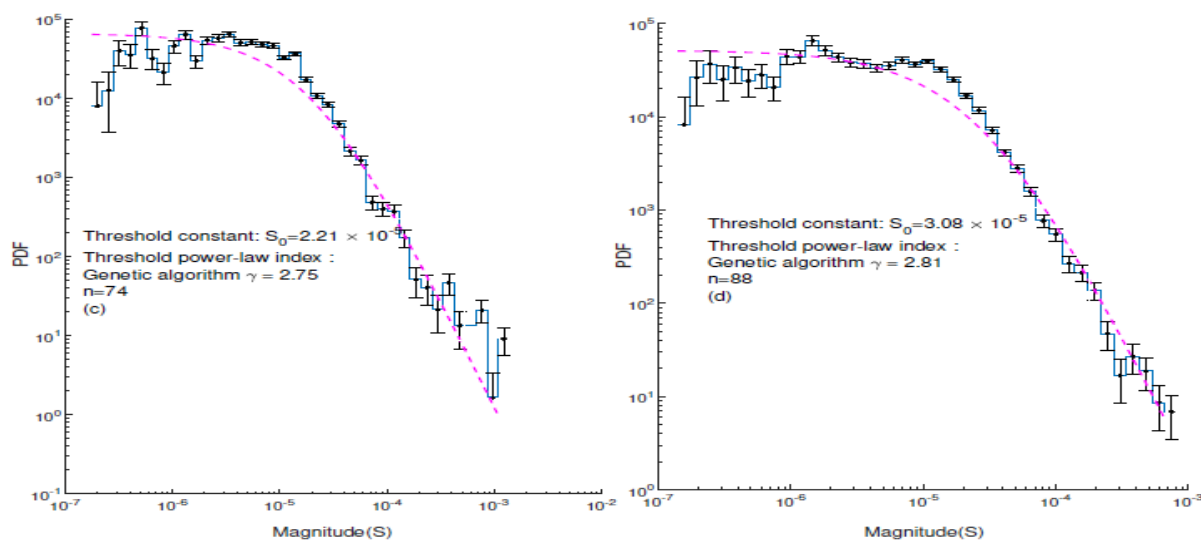
ما الگوی ترکیبی آبه-سوزوکی و شرایط گراف پدیداری را برای شبکه شراره های خورشیدی توسعه می دهیم. شرط گراف پدیداری برای شدت و زمان وقوع شراره ها اعمال می شود. قانون گوتنبرگ-ریشتر با بررسی رفتار تابع توزیع احتمال¹ (PDF) بر حسب شدت انرژی شرارههای خورشیدی به خوبی بیان می-شود، (به شکل 1 و شکل 2 مراجعه کنید). این نتیجه برای وضوحهای مختلف انجام گردیده است. این قانون

¹ Probability Distribution Function

به خوبی با استفاده از مدل توزیع توانی آستانه و همچنین الگوی مکانیک آماری نافزونور بیان می شود. الگوریتم ژنتیک برای کمینه کردن تابع مربع کای برای بدست آوردن پارامترهایی که توصیف کننده توزیع بسامد-شدت هستند استفاده می شود، (خط چین قرمز رنگ در شکل های 1 و 2) [7]. بهترین مقادیر پارامترهای الگوی توزیع توانی آستانه (ثابت آستانه و نمای درجه) توسط الگوریتم ژنتیک برازش داده شده و محاسبه گردیدند. نمای توانی آستانه با اعمال روش تست مربع کای برای پارامترهای وضوح مختلف $n=44$ ، $n=62$ ، $n=74$ و $n=88$ محاسبه شده اند. همانطور که در شکل های 1 و 2 مشخص است توزیع بسامد-شدت رویدادهای خورشیدی برای شدت های بزرگ تر از 10^{-5} دارای رفتار توانی هستند. این موضوع ارتباط بین احتمال وقوع رویدادهای خورشیدی و شدت بیشتر از یک مقدار آستانه را بیان می کند. همانطور که در شکل-ها مشخص است هر چقدر که شدت رویدادهای خورشیدی افزایش یابد بسامد آنها کاهش پیدا می کند. ارتباط لگاریتمی بین شدت و بسامد رویدادهای خورشیدی به فرم توانی می باشد. به طور خلاصه، در این مطالعه یک الگوی آماری مبتنی بر کمینه سازی آزمون مربع کای با رویکرد الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوی توزیع توانی آستانه برای برازش داده های تجربی خورشیدی نیز استفاده شده است، (شکلهای 1 و 2).



شکل 1- بررسی رفتار تابع توزیع احتمال بر حسب شدت انرژی آزاد شده رویدادهای خورشیدی (توزیع بسامد-شدت) با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک. نمای توانی آستانه محاسبه شده برای وضوحهای $n=44$ ، $n=62$ ، به ترتیب برابر با مقادیر 3.91 و 3.33 می باشد. مقادیر ثابت آستانه نیز در شکل برای وضوح های مختلف نمایش داده شده است.



شکل 2- بررسی رفتار تابع توزیع احتمال بر حسب شدت انرژی آزاد شده‌ی رویدادهای خورشیدی (توزیع بسامد-شدت) با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک. مقادیر ثابت شبکه و نمای توانی آستانه محاسبه شده برای وضوحهای $n = 74$ و $n = 88$ به ترتیب برابر با مقادیر 2.75 و 2.81 میباشند. مقادیر ثابت آستانه نیز در شکل برای وضوح های مختلف نمایش داده شده است.

نتیجه گیری

در این مطالعه، با استفاده از الگوی ترکیبی برای شبکه پیچیده شراره های خورشیدی، فرم اصلاح شده قانون گوتنبرگ-ریشتر از توزیع بسامد-شدت رویدادهای خورشیدی بررسی گردید. به دلیل محدودیت سخت افزاری ابزارهای رصد خورشیدی و محاسباتی مرتبط، امکان ثبت مکان، زمان و انرژی رویدادهای کوچک خورشیدی (برای مثال رویدادهای نوع A) وجود نداشت. بنابراین در سری زمانی موقعیت های ثبت شده از این رویدادها وجود ندارد. در نتیجه، الگوی توزیع توانی آستانه در مقایسه با الگوی توانی توانست تفسیر بهتری از توزیع واقعی داده های خورشیدی بیان کند. یک نگرش گرافیکی مبتنی بر کمینه سازی تابع مربع کاری با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک ارائه گردید. آزمون مربع کای تخمین بسیار دقیق را برای محاسبه پارامترهای توزیع داده های تجربی بیان کرد. این تابع یک الگوی توزیع توانی آستانه را برای برازش داده های تجربی خورشیدی پیشنهاد کرد. عوامل تاثیرگذاری همانند اثر اندازه محدود و اشباع برای شدتهای کوچک و خطاهای محاسباتی در رویدادهای با شدتهای کوچک باعث ایجاد انحراف از رفتار توانی خالص شد. بنابراین به منظور به دست آوردن یک تقریب بهتری از برازش برای داده های تجربی، باید از توزیع توانی آستانه استفاده کرد.

مرجع ها

- [1] Raboonik, Abbas, et al. "Prediction of solar flares using unique signatures of magnetic field images." *The Astrophysical Journal* **834**.1 (2016): 11.
- [2] Najafi, Amin. "Omori's Law in the Occurrence of Solar Flare: Approach of Hybrid Model." *Iranian Journal of Astronomy and Astrophysics* **7**, No. 1 (2020): 11.
- [3] de Arcangelis, et al. "Universality in solar flare and earthquake occurrence." *Physical review letters* **96**, No. 5 (2006): 051102.
- [4] Rezaei, Soghra, Amir Hossein Darooneh, Nastaran Lotfi, and Nazila Asaadi. "The earthquakes network: Retrieving the empirical seismological laws." *Physica A* **471** (2017): 80-87.
- [5] Darooneh, Amir H., et al. "A nonextensive modification of the Gutenberg–Richter law: q-stretched exponential form." *Physica A*: **389**, No. 3 (2010): 509-514.
- [6] Najafi, Amin, et al. "Solar Flare Modified Complex Network." *The Astrophysical Journal* **894**, No. 1 (2020): 66.
- [7] Farhang, Nastaran, Michael S. Wheatland, and Hossein Safari. "Energy Balance in Avalanche Models for Solar Flares." *The Astrophysical Journal* **883**, No. 1 (2019).
- [8] Gheibi, Akbar, Hossein Safari, and Mohsen Javaherian. "The solar flare complex network." *The Astrophysical Journal* **847**, No. 2 (2017): 115.