

بررسی خواص افت و خیزهای انرژی‌های خورشیدی و بادی

عطا معدنچی، محمدرضا آبسالان، مهرناز انواری و محمدرضا رحیمی‌تبار

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

پست الکترونیکی: rahimitabar@sharif.edu

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۳۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰)

چکیده

بررسی سری‌های زمانی از انرژی الکتریکی تولید شده توسط توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی نشان می‌دهد، که انرژی تولید شده با توجه به شرایط جغرافیایی افت و خیزهای زیادی به همراه خود دارد. این افت و خیزهای موجود باعث شده است که نه تنها سهم دریافتی از این منابع اندک باشد بلکه موجب ناپایداری نیروگاه‌های برقی شده است. با بررسی چندین داده مختلف از کشورها و نواحی متفاوت با بسامد ثانیه و دقیقه نشان می‌دهیم که رفتارهای مقیاسی متفاوتی در بازه‌های مختلف زمانی وجود دارد و دیگر خصوصیات تصادفی و غیرخطی آنها را آشکار می‌سازیم. همچنین به مقایسه رفتارهای غیرگوسی این مناطق با هم می‌پردازیم و نشان می‌دهیم که بررسی خواص بس بر خالی این داده‌ها به ما کمک می‌کند تا میزان ناپایداری این انرژی‌های دریافتی را بهتر بسنجیم.

واژه‌های کلیدی: فرایندهای تصادفی، سیستم‌های پیچیده، انرژی خورشیدی، انرژی بادی، بس بر خالی، تابع چگالی احتمال

۱. مقدمه

بهره‌برداری از آنها و همچنین پایدار نگه داشتن ولتاژ و بسامد شبکه‌های برقی نیز افزایش پیدا کند. البته این امر به علت ذات متلاطم جو زمین بسیار سخت‌تر از آن است که ابتدا تصور می‌شد. به همین منظور شناخت خصوصیات آماری داده‌های خورشیدی و بادی برای طراحی شبکه‌های برقی پیشرفته‌تر ضروری است.

در نیروگاه‌های برقی قدیمی، با تغییر سرعت ژنراتورها و مولدهای جریان برق سعی می‌کنند تا بسامد خروجی نیروگاه را در یک بازه مشخص نگه دارند. برای مثال در شبکه برق^۱ که برای بسامد خروجی ۵۰Hz طراحی شده است، اختلاف مجاز

امروزه انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی‌های خورشیدی و بادی به صورت گسترده در تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال در کشورهای اتحادیه اروپا پیش‌بینی می‌شود که انرژی‌های نو در سال ۲۰۲۰ سهمی حدود ۲۰٪ کل انرژی مصرفی و در سال ۲۰۵۰ تقریباً ۶۰٪ انرژی مصرفی را پوشش دهند [۱]. اما توان دریافتی از این منابع نوسانات زیادی را از خود نشان می‌دهند [۲-۵]. هر چقدر که سهم این گونه از انرژی‌ها در زندگی ما به سبب رهایی از سوخت‌های فسیلی افزایش پیدا کند انتظار می‌رود تا توانایی ما در کنترل و

۱. ENTSO_E

به معرفی داده‌های توان دریافتی از باد، خورشید و تابش خورشید می‌پردازیم. در قسمت ۳ نشان می‌دهیم که این داده‌ها همگی دارای خصوصیات غیرخطی کوتاه برد هستند و خواص غیرگوسی از خود نشان می‌دهند. در قسمت ۴ به تحلیل MF-DFA و تئوری آن می‌پردازیم و در قسمت ۵ نتایج حاصله که بیانگر رفتارهای توانی و خواص کوتاه برد غیرخطی تابش‌های خورشیدی هستند را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. خلاصه مقاله در قسمت ۶ آمده است و به یک مرور جامع بر نتایج می‌پردازیم.

۲. معرفی داده‌های توان باد و تابش خورشید با

بسامد بالا

حجم زیادی از داده‌های مربوط به توان دریافتی از باد، خورشید و شدت تابش خورشید از چند کشور مورد بررسی قرار گرفته است که جزئیات داده‌های آنها در جدول ۱ آمده است. سری اول داده‌ها مربوط به باد از شرکت WPD است که متشکل از ۱۲ توربین در یک زمین مستطیل شکل به ابعاد تقریبی $4 \times 4 \text{ km}^2$ قرار دارند [۲]. بخشی از این داده‌ها در [۹] قابل دسترس هستند. سری دوم این داده‌ها مربوط به شرکت تنت^۳ است که تمامی انرژی تولید شده توسط جریان‌های بادی در آلمان را ضبط می‌کند (در اینجا داده‌های بین سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ در نظر گرفته شده است) [۱۰]. همچنین داده‌های مربوط به شرکت ایرجید^۴ که کل انرژی تولیدی باد را در ایرلند ذخیره می‌کند (در اینجا نیز داده‌های بین ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ استفاده شده است) [۱۱]. اولین سری داده‌های مربوط به انرژی تولیدی تابش خورشید برای کشور هاوایی است، که با استفاده از ۱۷ تابش سنج^۵ مدل LI COR 200-LI که در جهت افقی گردش می‌کنند ثبت شده است. این تابش‌سنج‌ها در مساحتی به اندازه 750 m^2 در 750 m^2 متر مربع پخش شده‌اند و داده‌های مربوطه بین مارس ۲۰۱۰ تا مارس ۲۰۱۱ را با بسامد 1 Hz ثبت کرده‌اند [۱۲]. در این مقاله هم از داده‌های یک تک حسگر و هم از

برای بسامد نهایی شبکه از مرتبه $10 \pm \text{mHz}$ است [۶]. کنترل بسامد خروجی این گونه شبکه‌ها در بازه‌های محدود با ۳ محدوده زمانی انجام می‌شود [۷]. کنترل در طول چند ثانیه اول بعد از انحراف از بسامد اصلی اعمال می‌شود و یک توان اضافی را برای پایدار کردن بسامد ایجاد می‌کند (البته بسامد را لزوماً به بسامد f_0 نمی‌برد) [۸]. مرحله دوم حدود ۳۰ ثانیه پس از انحراف از بسامد اصلی انجام می‌شود و هم اختلال به وجود آمده را تصحیح می‌کند و هم سعی می‌کند که انحراف بسامد را در محدوده اشاره شده نگه دارد. کنترل سوم بسامد به صورتی عمل می‌کند که این انحراف بسامد را به مقدار اصلی یعنی 50 Hz بر می‌گرداند. این سیستم بسامد شبکه را هر ۱۵ دقیقه به روز رسانی می‌کند. در زمینه اینکه به جای نیروگاه‌های استاندارد انرژی‌های نو جایگزین شوند و چه تأثیراتی در شبکه می‌تواند داشته باشد، اخیراً کارهای زیادی انجام شده است [۹-۱۱]. ایده‌های مختلفی ابراز شده مثلاً می‌توان بعضی از نیروگاه‌های قدیمی را نگه داشت تا از اینرسی موتورهای آنها برای کنترل بسامد استفاده کرد. یا اینکه با سیستم‌های ذخیره انرژی از جمله باتری‌ها، افت و خیزهای شدید انرژی‌های نو را کنترل کرد [۱۲-۱۵]. به علت روش‌های گفته شده لازم است تا پایداری نیروگاه‌های برقی را در مقیاس‌های زمانی متفاوت بسنجیم. در این مقاله ما به بررسی سیگنال‌های خورشیدی و بادی در چند کشور مختلف دنیا با بسامد نمونه‌برداری^۱ از مرتبه ثانیه و دقیقه می‌پردازیم. این داده‌ها متشکل از توان خروجی یک و چند پایگاه در کشورهای مختلف هستند. برای درک بهتر افت و خیزهای موجود از آمار تفاضل دو نقطه‌ای $\Delta x(\tau) = x(t+\tau) - x(t)$ برای مثال نشان داده‌ایم که افت و خیزهای موجود با مقدارهای مشخص، به چه احتمالی در بازه‌های زمانی مختلف می‌توانند رخ بدهند. برای درک بهتر از خصوصیات غیرخطی و پی بردن به رفتار توانی این پدیده‌های آشوبناک به تابع ساختار^۲ $S(q, \tau) = \langle |\Delta x(\tau)|^q \rangle$ نگاه می‌کنیم تا شناخت بهتری از همبستگی‌های کوتاه برد و بلند برد غالب پی ببریم. مقاله پیش رو بدین ترتیب نوشته شده است: در قسمت ۲

۳. Tennet

۴. Eirgid

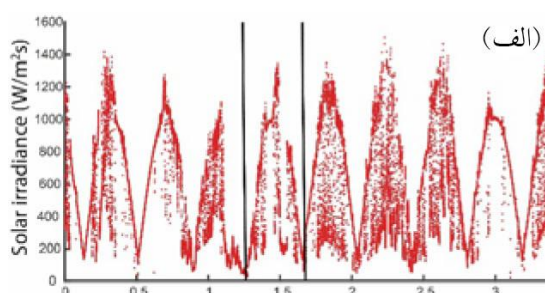
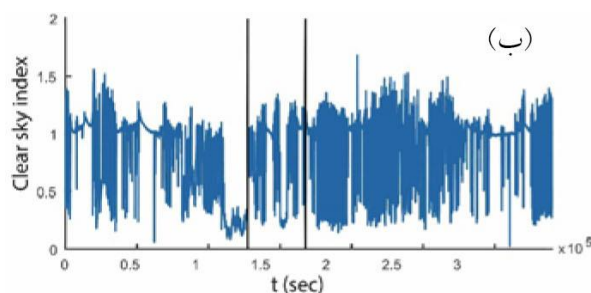
۵. Pyranometers

۱. Sample rate

۲. Structure function

جدول ۱. جزئیات داده‌ها.

داده	تعداد نقاط	زمان اندازه‌گیری (روز)	بسامد (Hz)
تابش خورشید، هاوایی	14×10^6	~ 365	۱ Hz
تابش خورشید، اسپانیا	13×10^6	~ 1331	$1/60$ Hz
تابش خورشید، الجزیره	37×10^6	~ 3740	$1/60$ Hz
تابش خورشید، آلمان	27×10^5	~ 430	$1/60$ Hz



نمودار ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) تابش اندازه‌گیری شده در کشور هاوایی برای یک تک حسگر و (ب) شاخص آسمان صاف برای همان حسگر (داده‌های مربوط به شب حذف شده است).

وجود دارد [۱۶]. در این مقاله از روشی که در [۱۷] ارائه شده، استفاده شده است. به عنوان مثالی از داده‌ها استفاده شده می‌توان در نمودار ۱ به سری‌های زمانی حاصل از هاوایی مشاهده کرد که داده‌های مربوط به شب حذف شده‌اند. همچنین یک روز را با کشیدن دو خط از بقیه روزهای جدا کرده‌ایم.

۳. رفتار غیرگوسی

در این قسمت ما به بررسی افت و خیزهای کوتاه برد می‌پردازیم و برای این کار از آمار تفاضل دو نقطه‌ای استفاده خواهیم کرد. اختلاف هر دو نقطه با فاصله زمانی τ را این گونه تعریف می‌کنیم: $\Delta x(\tau) = x(t+\tau) - x(t)$. بر اساس نظریه وینر-خنچین همبستگی تابع $x(t+\tau) - x(t)$ مستقیماً به طیف توانی سری زمانی ما مربوط می‌شود. از طرفی این احتمال وجود دارد که دو سری زمانی مختلف با خصوصیات تصادفی کاملاً متفاوت همبستگی زمانی مشابه هم از خود نشان بدهند. به همین منظور لازم است تا توابعی با مراتب بالاتر بسازیم. تابع $S(q, \tau)$ را به عنوان تابعی از مرتبه q تابع $\Delta x(\tau)$ معرفی می‌کنیم:

میانگین روی تمامی حسگرهای یک ناحیه استفاده شده است. دقت داده‌های موجود برای یک تک حسگر و مجموعه میانگین حسگرهای محاسبه شده، یک ثانیه و یک دقیقه است. دو سری دیگر از داده‌ها توسط BSRN^۱ است، که بین جولای ۲۰۰۹ و فوریه ۲۰۱۳ از شمال اسپانیا و بین مارس ۲۰۰۰ و دسامبر ۲۰۱۳ از الجزیره انتخاب شده‌اند [۱۳]. سومین داده‌های با میانگین دقت دقیقه در پشت بام دانشگاه اولدنبرگ توسط فتولتائیک کوچک به مساحت سطح 0.242 در 0.556 متر مربع ثبت شده است [۱۴]. در آخر سیگنال مربوط به کل انرژی خورشیدی در سال ۲۰۱۲ است که توسط ISE^۲ تهیه شده است. همچنین از نوع دیگری از داده‌ها نیز استفاده شده است که به اسم شاخص آسمان صاف (C-S)^۳ شناخته می‌شوند. ما برای ساخت چنین داده‌هایی، تابش خورشید را در یک آسمان بدون ابر تخمین می‌زنیم (I_c) و داده اصلی خود را نسبت به آن نرمال می‌کنیم $k = \frac{I}{I_c}$ که در واقع خود این عمل نوعی بدون روند کردن یک سری زمانی است و روش‌های مختلفی برای آن

۱. The global Baseline Surface Radiation Network

۲. Fraunhofer Institute Fur Solar Energiesysteme

۳. Clear-sky

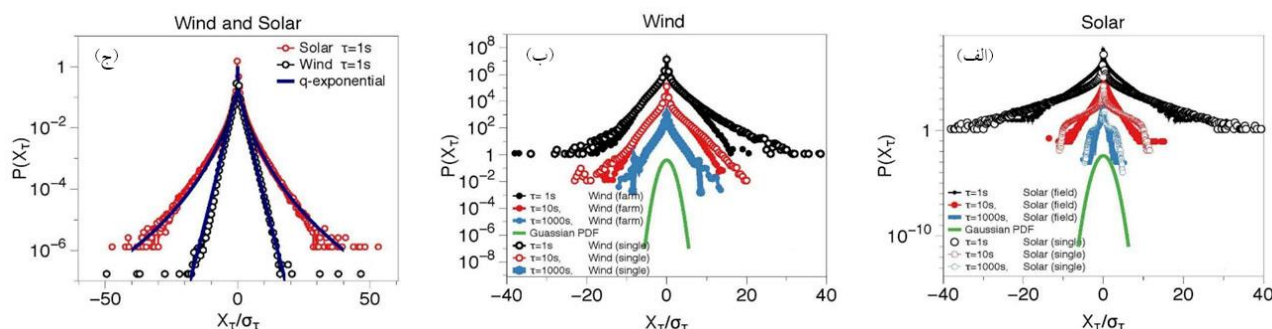
$$S(q, \tau) = \langle |\Delta x(\tau)|^q \rangle, \quad (1)$$

اگر چنین تابعی در فرایند مورد نظر ما رفتاری توانی بر حسب فاصله زمانی τ از خود نشان بدهد آنگاه چنین فرایندی را مقیاس ناوردا می‌نامیم [۱۵]. اگر q را نمای تابع این رابطه توانی در نظر بگیریم آنگاه خواهیم داشت:

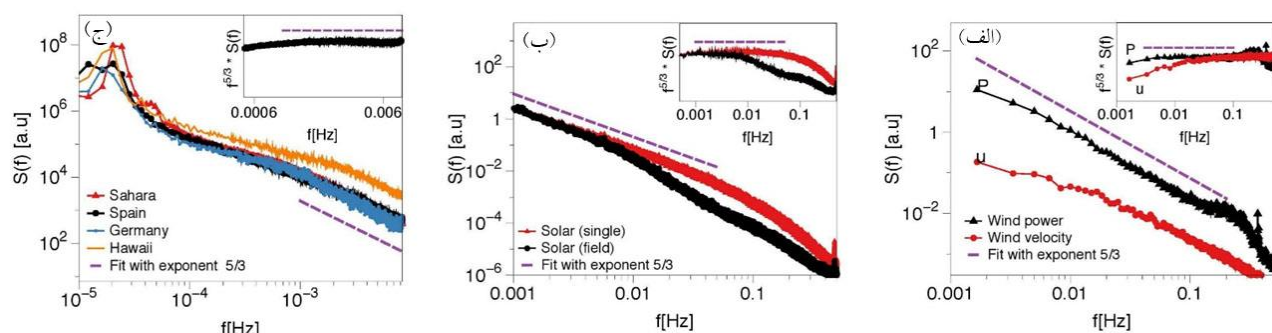
$$S(q, \tau) \cong C_q \tau^{\xi_q}, \quad (2)$$

اگر q رابطه خطی ای با q داشته باشد، $S(q, \tau)$ را تک برخال می‌خوانیم و در غیر این صورت آن را بس برخال به شمار می‌آوریم. در قسمت بعدی مقاله به بررسی این ویژگی از داده‌های خورشیدی اشاره خواهیم کرد. در این بخش به بررسی وابستگی بین τ و تابع چگالی احتمال $P(X_\tau, \tau)$ می‌پردازیم. یکی از نکات قابل توجه این است که تابع $S(2, \tau)$ همان خود همبستگی $\langle x(t+\tau)x(t) \rangle$ محسوب می‌شود و بدین ترتیب می‌توان نوشت $\sigma_\tau^2 = \langle |\Delta x(\tau)|^2 \rangle$ یک خصوصیت مهم $P(X_\tau, \tau)$ این است که برای بسیاری از فرایندها به خصوص فرایندهای متلاطم تفاوت قابل توجهی نسبت به تابع گوسی نشان می‌دهد. اگر توزیع مورد نظر ما از جنس توابع دم سنگین باشد، که این دسته از توابع نشانگر وجود رخداد های مخرب و نادر با احتمال نسبتاً زیاد هستند، آنگاه شاهد پدیده‌های غیرخطی و آشوبناک هستیم [۱۸]. از طرفی می‌توان از همین روش به کمک مراتب بالاتر تابع ساختار بهره برد [۱۸-۲۳]. در این قسمت به کمک طیف توان و تابع چگالی احتمال به تحلیل انرژی‌های دریافتی از خورشید و باد می‌پردازیم و برای این کار، داده‌های خود را به شکل X_τ / σ_τ نرمال می‌کنیم. طیف توانی محاسبه شده مربوط به تابش خورشیدی، سرعت باد و همچنین توان دریافتی از باد، که همگی داده‌هایی با بسامد بالا (۱Hz) هستند، در محدوده $0.001 \text{ Hz} < f < 0.01 \text{ Hz}$ یک رفتار توانی با نمای (۵/۳) نمای کولموگروف [۲ و ۲۴] از خود نشان می‌دهد و این آشوبناک بودن انرژی‌های دریافتی از این منابع را نشان می‌دهد [۲۴-۲۶]. در نمودارهای ۲. الف و ۲. ب همین رفتار را به ترتیب برای داده‌های خورشید مربوط به هاوایی و داده‌های باد مربوط به کشور آلمان نشان داده‌ایم. همان طور که

مشخص است در ۱. ب نوسانات میانگین داده‌ها در بسامدهای بالا در مقایسه با داده تک حسگر فیلتر شده و مقدار طیف توانی آن کاهش پیدا کرده است. همچنین داده‌های با بسامد ۱ دقیقه در نواحی مختلف در دنیا این رفتار توانی (۳/۵) را برای بازه $0.001 < f < 0.01 \text{ Hz}$ از خود نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که یک قانون مقیاسی برای این گونه از سری‌های زمانی با بسامد بالا وجود دارد (همان طور که قبلاً هم این گونه مطالعه‌ها چنین چیزی را نشان داده‌اند [۲۷] و نیروگاه‌های انرژی از منابع متلاطم انرژی‌های بادی و خورشیدی تغذیه می‌شوند). در قدم بعدی به بررسی نحوه رفتار و شکل $P(X_\tau, \tau)$ آمار تفاضل دو نقطه‌ای این داده‌ها که نسبت به انحراف معیار مربوطه بهنجار شده‌اند می‌پردازیم. نتایج برای داده‌های خورشیدی و برای پله زمانی‌های τ برابر با ۱، ۱۰ و ۱۰۰۰ در نمودار ۲ ترسیم شده‌اند. طبق آنچه که از فرایندهای تصادفی و متلاطم انتظار داریم تابع چگالی احتمال آنها تفاوت زیادی از تابع گوسی دارند و دم سنگین بودن توابع مربوطه حاکی از همین واقعیت است. پهنای این توزیع‌ها به مرتبه σ_τ^{20} و یا حتی بیشتر از آن می‌رسد. از آنجا که چنین رخدادهایی را از یک توزیع نرمال و گوسی انتظار نداریم آنها را «رخداد های نادر» می‌نامیم. در نمودار ۳ می‌توان مشاهده کرد که نه تنها سری‌های زمانی یک تک حسگر چنین رفتاری را در خود دارند بلکه داده میانگین حسگرها نیز کماکان چنین خصوصیتی را از خود بروز می‌دهند. برای آن که دید شهودی تری به «رخداد های نادر» پیدا کنیم می‌توان به داده‌های خورشید در σ_τ^{20} نگاه کنیم. چنین اتفاق‌هایی اگر برای داده‌های خورشید ۱۰۰۰ بار در ماه اتفاق بیافتد برای یک فرایند گوسی هر ۳ میلیون سال قابل مشاهده هستند. در نمودار ۳. ج می‌توان پهنای توزیع را برای انرژی خورشیدی و بادی با بسامد یکسان و پله زمانی ۱ ثانیه مقایسه کرد. برای انرژی بادی این پهنای σ_τ^{20} می‌رسد، این در حالی است که احتمال مشاهده چنین پهنایی در سیگنال‌های خورشیدی ۳ برابر بیشتر از سیگنال‌های بادی می‌باشد. بنابراین سیگنال‌های خورشیدی رخداد های نادر به مراتب بیشتر هستند و این نکته



نمودار ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) و (ب) تابع چگالی احتمال آمار تفاضل دو نقطه‌ای $P(X_T)$ برای توان دریافتی از باد و خورشید یک تغییر پیوسته از توزیع این نقاط را می‌توان برای پله زمانی‌های ۱۰۰۰ و ۱۰،۱۰ مشاهده کرد. برای نمایش بهتر توابع چگالی احتمال یک انتقال به سمت بالاداده شده است. در (ج) مقایسه دو تابع چگالی احتمال برای داده‌های خورشید و باد با با دقت ثانیه است.

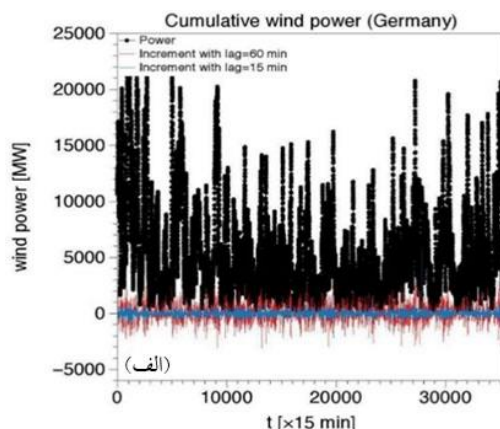
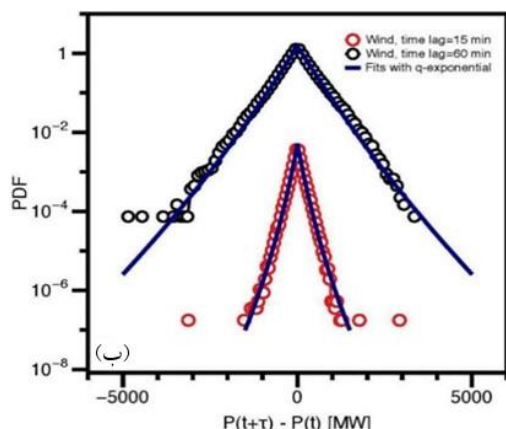


نمودار ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) طیف توان سرعت باد و توان دریافتی از باد در مقیاس log-log برای داده‌های با دقت ۱ هرتز که نمای کولموگروف با شیب ۵/۳ با خط چین نمایش داده شده است. (ب) طیف توان تابش خورشید برای تک حسگر (قرمز) و همچنین میانگین ۱۶ حسگر (سیاه) با دقت ۱ هرتز است. (ج) طیف توان تابش خورشید برای داده‌های با دقت دقیقه مربوط به چند کشور مختلف (هاوایی، الجزیره، اسپانیا و آلمان) که باز هم نمای کولموگروف در آنها مشهود است.

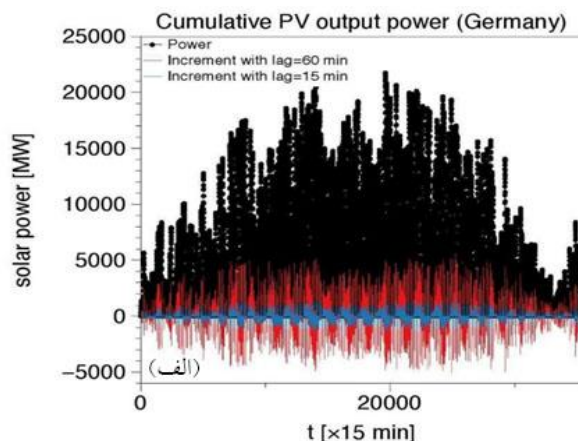
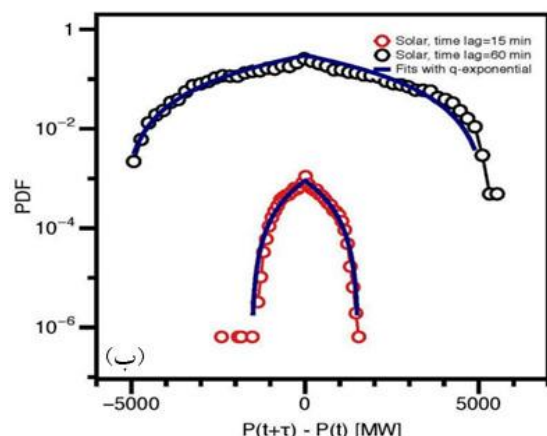
انرژی‌های دریافتی یک کشور وجود دارد و نوساناتی در حدود (۱۵۰ MV) (۲۰۰ MV) و (۳۰۰ MV) (۴۰۰ MV) برای پله زمانی‌های ۱۵ و ۶۰ دقیقه برای کشور آلمان (ایرلند) مشاهده می‌شوند. این نتیجه مستقیم وجود همبستگی‌های بلند در سرعت باد و بزرگی ابرهاست که طول این همبستگی‌ها به ترتیب ۶۰۰ km و ۲۱۰۰ km هستند [۲۹-۳۰]. در نتیجه قضیه حد مرکزی که توزیع گوسی را برای رفتارهای تصادفی پیش‌بینی می‌کند در این موارد کاربردی ندارد. برای مقایسه بیشتر می‌توان توزیع‌های غیرگوسی سیگنال‌های خورشیدی با بسامد ۱ دقیقه و میانگین گرفته شده را با پله زمانی ۱ ثانیه برای کشورهای مختلف در نمودار ۷ مشاهده کرد. تمامی این داده‌ها

مهمی در طراحی و اتصال شبکه‌های انرژی است. حال به بررسی خواص غیرگوسی آمارهای تفاضلی انرژی‌های تجدیدپذیر باد و خورشید در سراسر یک کشور می‌پردازیم.

برایند خروجی‌های دریافتی از این انرژی‌ها در کشور آلمان (همچنین تفاضل‌های دو نقطه‌ای آنها) در نمودارهای ۴. الف و ۵. رسم شده‌اند که دارای نوسانات و تغییرات بسیاری هستند. در نمودارهای ۴. ب، ۵. ب و ۶ تابع احتمال چگالی تفاضل‌های دو نقطه‌ای برای پله زمانی‌های ۱۵ و ۶۰ دقیقه برای کشور آلمان با توان ۳۰ گیگا وات و برای ایرلند با توان ۱ گیگا وات رسم شده اند [۲۸]. یک ایده مهم غالب در این نتایج این است که رفتار غیرگوسی همچنان برای کل



نمودار ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) کل انرژی دریافتی از باد و همچنین تفاضل دو نقطه‌ای آن برای پله زمانی‌های ۱۵ دقیقه و ۱ ساعت در آلمان در سال ۲۰۱۲. (ب) تغییرات تابع چگالی احتمال تفاضل دو نقطه‌ای برای پله زمانی‌های دقیقه $\tau = 15/60$ در نمودار نیمه لگاریتمی، برای توان دریافتی کشور آلمان (با نرخ توان ۳۰ گیگاوات) است. رخداد های نادر تا حدود تقریبی $\pm 2000 \text{ MV}$ و $\pm 4000 \text{ MV}$ به ترتیب برای پله زمانی‌های ۱۵ و ۶۰ دقیقه وجود دارند.



نمودار ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) کل انرژی دریافتی از خورشید و همچنین تفاضل دو نقطه‌ای آن برای پله زمانی‌های ۱۵ دقیقه و ۱ ساعت در آلمان در سال ۲۰۱۲. (ب) تغییرات تابع چگالی احتمال تفاضل دو نقطه‌ای برای پله زمانی‌های دقیقه $\tau = 15/60$ در نمودار نیمه لگاریتمی، برای توان دریافتی کشور آلمان (با نرخ توان ۳۰ گیگاوات) است. رخداد های نادر تا حدود تقریبی $\pm 6000 \text{ MV}$ به ترتیب برای پله زمانی‌های ۶۰ دقیقه وجود دارند.

۴. تحلیل بس برخالی

برای بررسی و مطالعه خواص غیرخطی فرایندهای تصادفی از روش استاندارد MF-DFA استفاده می‌کنیم. سری زمانی $x(t_i) \equiv x(i)$ را در نظر می‌گیریم به صورتی که $\{i=1, \dots, N\}$ میانگین x این گونه تعریف می‌شود:

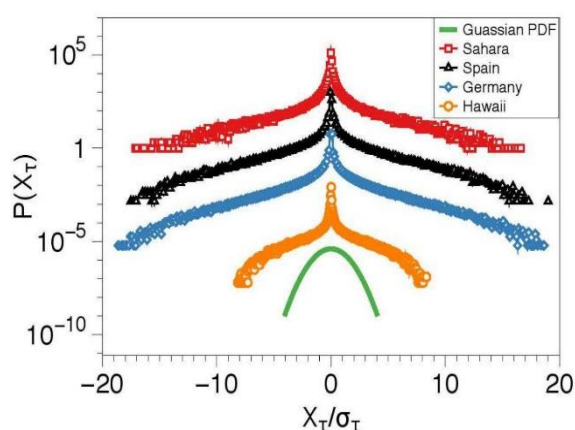
$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (3)$$

و برای $\bar{x}_i$ داریم

رفتار غیرگوسی با رخداد های نادری با پهنای از مرتبه ۱۰ تا $20\sigma_{\tau=1}$ نشان می‌دهند. به جهت پیش‌بینی احتمال نوسانات بزرگ و همچنین برآزش توابع چگالی احتمال از تابع زیر استفاده شده است [۳۱]:

$$P(X_{\tau}) = A[1 - \beta(1 - q)|X_{\tau}|]^{1/(1-q)},$$

که در آن β و q پارامترهای برآزش و $A = 1/2(2 - q)\beta$ ضریب بهنجارش است.

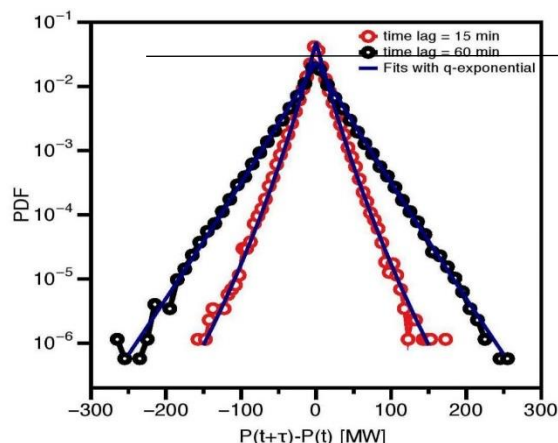


نمودار ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تابع چگالی احتمال آمار تفاضل دو نقطه‌ای $P(X_T)$ در نمودار نیمه لگاریتمی برای پله زمانی ۱ دقیقه. داده‌های استفاده شده همگی میانگین حسگرهای موجود بوده و با دقت ۱ دقیقه گزارش شده‌اند. توابع رسم شده همگی یک انتقال به سمت بالا داده شده‌اند تا مقایسه پهنای آنها مقدورتر باشد.

داده‌ها پایا است [۳-۲]. این گونه بررسی همبستگی به کمک تابع همبستگی برای داده‌های بلند و بدون روند^۲ مناسب و کاربردی است، اما در صورت وجود روند دیگر نتایج درست نخواهند بود. اغلب داده‌های تجربی تحت تأثیر روندها می‌باشند که باعث غیرپایا^۳ شدن سری‌های زمانی داده‌ها می‌شود و برای بررسی افت و خیزهای درونی خود سری داده‌ها باید وجه تمایز برایشان قائل شد تا درک درستی از رفتار مقیاسی افت و خیز داده‌ها داشته باشیم. DFA روش بسیار مناسبی برای بررسی رفتار مقیاسی داده‌های پر افت و خیز در حضور روندها است و در این روش نیازی به دانستن منشاء و نوع روندها نیست [۳۵].

۴.۱. DFA

تحلیل افت و خیزهای بدون روند DFA یا روشی است که می‌توان از آن برای مطالعه ویژگی‌های مقیاسی و یافتن همبستگی‌های بلندبرد در سری‌های زمانی غیرپایا استفاده کرد. این روش به صورت زیر است [۳۳ و ۳۶-۴۰]: در قدم اول انتگرال حول تمام سری زمانی $x(i)$ را محاسبه می‌کنیم:



نمودار ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات تفاضل دو نقطه‌ای برای τ های ۱۵ و ۶۰ دقیقه در نمودار نیمه لگاریتمی، برای توان دریافتی از باد در کشور ایرلند (با نرخ توان ۱ گیگا وات). رخداد‌های نادر تا حدود تقریبی $\pm 150 \text{ MV}$ و $\pm 300 \text{ MV}$ به ترتیب برای پله زمانی‌های ۱۵ و ۶۰ دقیقه وجود دارند.

$$\bar{x}_i = x_i - x, \quad (4)$$

برای داده‌های پایا (stationary) تابع همبستگی $C(s)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C(s) = \langle \bar{x}_i \bar{x}_{i+s} \rangle = \frac{1}{N-s} \sum_{i=1}^{N-s} \bar{x}_i \bar{x}_{i+s}, \quad (5)$$

که اگر $x(i)$ غیرهمبسته باشد، مقدار تابع $C(s)$ برای $s > 0$ صفر خواهد بود. همبستگی‌های کوتاه برد به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند [۳۲].

$$C(s) \sim \exp\left(-\frac{s}{s_{\max}}\right), \quad (6)$$

که با یک زمان مشخصه $s_{\max}$ است. اما زمان مشخصه برای همبستگی‌های بلندبرد با افزایش N زیاد می‌شود که تابع همبستگی آن به توانی و به صورت زیر است،

$$C(s) \sim s^{-\gamma}. \quad (7)$$

که $0 < \gamma < 1$ است. همبستگی بلند برد با تعریف نمای هارست $H = 1 - \gamma/2$ مطالعه می‌شود [۳۳-۳۴] که طیف قدرت^۱ را می‌توان به صورت

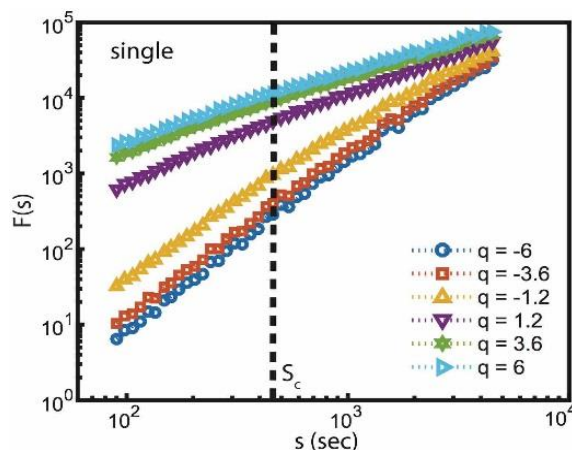
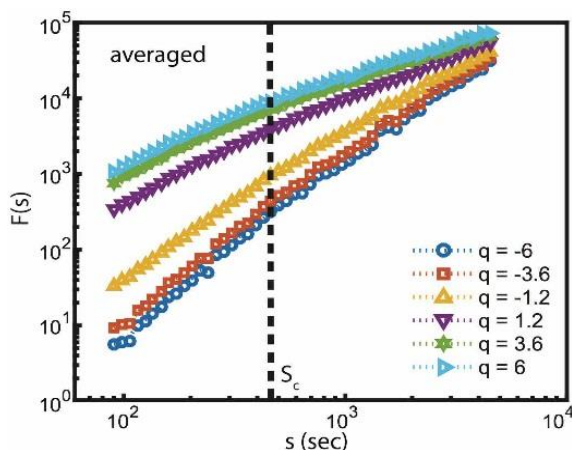
$$S(\omega) \sim \omega^{-\beta}, \quad (8)$$

که ω بسامد زاویه‌ای و نمای آن به صورت $\beta = 2H - 1$ برای

^۲. Trend

^۳. Nonstationary

^۱. Power spectra



نمودار ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) $F_q(s)$ بر حسب S برای مقادیر مختلف q که به استفاده از روش MF - DFA برای تک حسگر و میانگین حسگرهای کشور هاوایی نمایش داده شده است .

۲.۴. MF-DFA

تابع عمومی افت و خیز به صورت

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{N_S} \sum_{v=1}^{N_S} [F_s^v(v)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}, \quad (13)$$

تعریف می‌شود، که q می‌تواند هر عدد غیر صفر باشد که $q = 2$ همان تابع استاندارد (DFA) را به ما می‌دهد. برای $q = 0$ تابع افت و خیز توسط فرایند میانگین گیری لگاریتمی به دست می‌آید [۳۸]:

$$F_q(s) = \exp \left\{ \frac{1}{N_S} \sum_{v=1}^{N_S} \ln F_s(v) \right\}, \quad (14)$$

$F_q(s)$ با s به صورت توانی زیاد می‌شود

$$F_q(s) \sim s^{h(q)}, \quad (15)$$

که $h(q)$ نمایانگر نمای عمومی هارست است که به q وابستگی دارد [۳۴، ۳۹-۴۱]. با توجه به نمودار ۸ در ناحیه خطی نمودار $\ln F_q(s)$ بر حسب $\ln s$ برای یک q دلخواه، می‌توانیم مقدار $h(q)$ را با محاسبه شیب به دست آوریم. همان گونه که گفته شد، نمای هارست برای فرایندهای پایا $H = h(q=2)$ و برای فرایندهای غیرپایا $h(q=2) > 1$ است [۳۳] که نمای هارست را برای پروسه غیرپایا به صورت $H = h(q=2) - 1$ باز تعریف و محاسبه می‌کنیم [۳۹، ۴۱ و ۴۲]. در این خصوص اگر نمای هارست $H = 0.5$ حاکی از غیرهمبسته بودن سری زمانی باشد، در حالی که $0.5 < H < 1$ نشان از همبستگی نزدیک برد و

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i x_k - \langle x \rangle \quad (9)$$

که $i = 1, \dots, N$ است. سپس نتیجه حاصله از انتگرال سری زمانی را بر تعداد قسمت‌های ناهمپوشان N_S تقسیم کرده که طول هر قسمت s است ($N_S = N/S$). به دلیل آن که برخی از قسمت‌های داده‌ها به دلیل تقسیم کردن کل داده بلا استفاده می‌مانند، همین فرایند را از طرف دیگر سری زمانی نیز انجام می‌دهیم و در این صورت تعداد قسمت‌ها $2N_S$ خواهند بود. حال با روش کمترین مربعات می‌توانیم یک چند جمله‌ای را بر قسمت v ام برازش کنیم و آن را P_v بنامیم [۳۴-۳۹، ۴۱].

برای هر بخش را بر قسمت $Y_S(i)$ را به صورت

$$Y_S(i) = Y(i) - P_v(i), \quad (10)$$

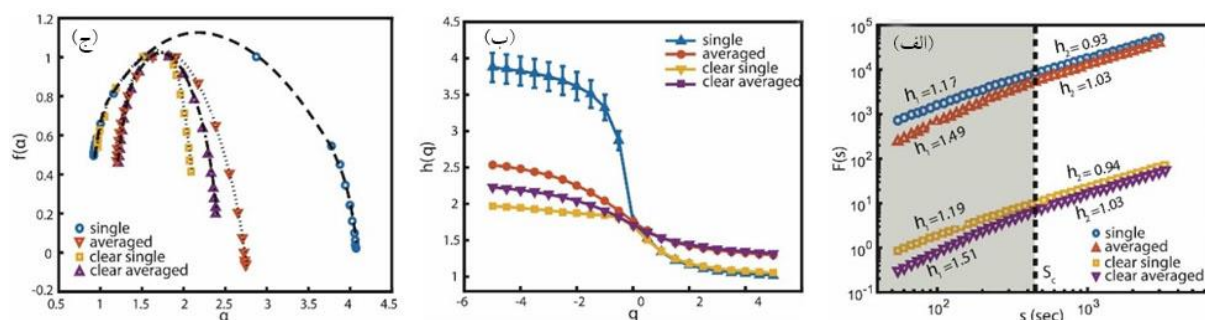
تعریف می‌کنیم. در قدم بعدی از افت و خیز $Y_S(i)$ برای محاسبه $F_s^v(v)$ استفاده می‌کنیم

$$F_s^v(v) = Y_S^v(i) = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \{Y((v-1)s+i) - P_v(i)\}^2, \quad (11)$$

برای هر قسمت v که $v = 1, \dots, N_S$ است. حال تابع استاندارد افت و خیز با میانگین گیری روی $2N_S$ به صورت

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_S} \sum_{v=1}^{2N_S} [F_s^v(v)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}} \sim s^{h(q)} \quad (12)$$

می‌شود که برای داده‌های پایا $h(2)$ به نمای هارست معروف است [۴۲].



نمودار ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) نمودار تابع افت و خیز $F_q(s)$ بر حسب مقیاس s ، (ب) نمودار مقیاس بس برخالی $h(q)$ بر حسب q و (ج) طیف تکنیکی $f(a)$ که با مقایسه پهنای α خصوصیات بس برخالی قدرت‌های مختلف را برای تک حسگر، میانگین حسگرها و شاخص c-s را نشان می‌دهد.

۵. بررسی نتایج

با توجه به توضیحاتی که در بخش قبلی در رابطه با روش MF-DFA و توابع توزیع احتمال نحوه بررسی افت خیزهای بلند برد و کوتاه برد سری‌های زمانی داده شد، حال می‌خواهیم با به کارگیری این روش‌ها به تحلیل داده‌های مورد نظر بپردازیم. با توجه به قسمت مقدمه، داده‌های تابش خورشید افت و خیز زیادی دارند و غیرپایای هستند که به دلیل شرایط هوایی متفاوت در مقیاس‌های زمانی متفاوت روی می‌دهند. با محاسبه $F_q(s)$ می‌توانیم رفتار غیرپایای تابش خورشید را مورد بررسی قرار دهیم و همچنین با استفاده از نمودار لگاریتمی از $F_q(s)$ بر حسب مقیاس s می‌توان معیاری برای بررسی رفتار مقیاسی و در مدت یک روز را به دست آورد. نمودار ۹ نتایج MF-DFA1 برای داده‌های هواپی (تک حسگر و میانگین حسگرها) با بسامد ۱ هرتز است. تحلیل نشان می‌دهد که در نمودار لگاریتمی یک شکستی در زمان دقیقه ۷/۵ = ثانیه $s_c \approx 450$ وجود دارد و به همین علت نمودار را به دو بخش $s > s_c$ و $s < s_c$ تقسیم می‌کنیم. این نوع بخش‌بندی به این خاطر است که رفتار افت و خیز در مقیاس‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد [۳۶-۳۷، ۴۵]. تحلیل‌های یکسان برای داده‌های مربوط به شاخص c-s تک حسگر و میانگین حسگرها مورد بررسی قرار گرفته است که در نمودار ۹ الف نشان داده شده است. برای $s > s_c$ و $s < s_c$ ما نمای هارست عمومی را برای تک حسگر

$1 < H < 5/5$ نمایانگر همبستگی دوربرد باشد [۴۳]، با توجه به معادلات ۵ و ۶ برای داده‌های غیرپایا، نمای همبستگی و مقیاس طیف توان به ترتیب $\gamma = -2H$ و $\beta = 2H + 1$ هستند [۳۳، ۳۴-۳۹]. به علاوه q های مثبت، رفتار افت و خیزهای بلند و مقادیر منفی q ، رفتار افت و خیزهای کوتاه برد را توصیف می‌کنند [۳۳].

رابطه‌ای مستقیم بین نمای عمومی هارست در MF-DFA و نماهای مقیاسی بس برخالی کلاسیک $\tau(q)$ وجود دارد [۳۳]

$$\tau(q) = qh(q) - 1, \quad (16)$$

دیمنسیون $D(q)$ به صورت:

$$D(q) \equiv \frac{\tau(q)}{q-1} = \frac{qh(q)-1}{q-1}, \quad (17)$$

تعریف می‌شود. تبدیل لژاندر از $\tau(q)$ به $f(a)$ به طیف تکنیکی معروف است [۴۲-۴۳]

$$f(a) = qa - \tau(q) \quad (18)$$

و

$$\alpha = \tau'(q) \quad (19)$$

معیاری برای قدرت تکنیکی یا نمای هولدر و

$$\tau'(q) = \frac{d}{dq} \tau(q) \quad (20)$$

$$f(a) = q[\alpha - h(q)] + 1, \quad (21)$$

$$\alpha = h(q) + qh'(q).$$

یک سری زمانی برای $h(q)$ خطی برخال و برای $h(q)$ غیرخطی چند بس برخالی است و یک طیف $f(a)$ وجود خواهد داشت [۴۴].

جدول ۲. نتایج عددی تحلیل بس برخالی برای تک حسگر و میانگین حسگرها و همچنین شاخص c-s مربوط به این داده‌ها.

داده	$(s < s_c)h_1(q)$	$(s > s_c)h_2(q)$	$\Delta\alpha$
تابش خورشید، تک حسگر	$1/17 \pm 0/01$	$0/93 \pm 0/02$	$3/22 \pm 0/21$
تابش خورشید، متوسط	$1/49 \pm 0/01$	$1/03 \pm 0/03$	$1/56 \pm 0/03$
تک حسگر شاخص c-s	$1/19 \pm 0/01$	$0/94 \pm 0/01$	$1/17 \pm 0/02$
متوسط شاخص c-s	$1/51 \pm 0/01$	$1/03 \pm 0/01$	$1/18 \pm 0/02$

۶. بررسی سهم همبستگی‌ها در بس برخال بودن

تابش خورشید

به منظور بررسی نقش همبستگی‌های موجود در داده‌های اندازه‌گیری شده تحلیل بس برخالی را بر روی داده‌های بُر خورده انجام دادیم. بر زدن داده‌ها بدین جهت است که همبستگی‌های خطی و غیرخطی موجود را از بین برده و تأثیر چنین تغییری را در نماهای قسمت قبل بررسی کنیم. شکل ۱۰. الف و ۱۰. ج به مقایسه $h(q)$ برای داده‌های اصلی و برخوردی مربوط به تک حسگر و میانگین حسگرها می‌پردازد. همان طور که مشاهده می‌شود در هر دو نمودار، داده‌های برخوردی رفتار کاملاً متفاوتی از داده‌های اصلی نشان می‌دهند و می‌توان استدلال کرد که همبستگی‌های موجود در داده‌های خورشیدی نقش مهمی در بس برخال بودن آنها دارد. نمودار ۱۰. ب و ۱۰. د) مربوط به $f(a)$ تک حسگر و میانگین حسگرها است. همان طور که مشخص است پهنای $f(a)$ برای داده‌های برخوردی نزدیک صفر است که با نمودارهای $h(q)$ همخوانی کامل دارد. در جدول ۳ مقادیر عددی نمودارهای ۱۰ گزارش شده است.

۷. بس برخالی بودن تابش خورشید برای کشورهای

مختلف

بررسی‌های آماری قبلی را برای داده‌های تابش خورشیدی اندازه‌گیری شده در الجزیره، آلمان، هاوایی و اسپانیا مورد استفاده قرار دادیم تا به بررسی رفتار مقیاسی و بس برخالی در ناحیه‌های مختلف بپردازیم. بسامد داده‌گیری $1/60\text{Hz}$ و طول

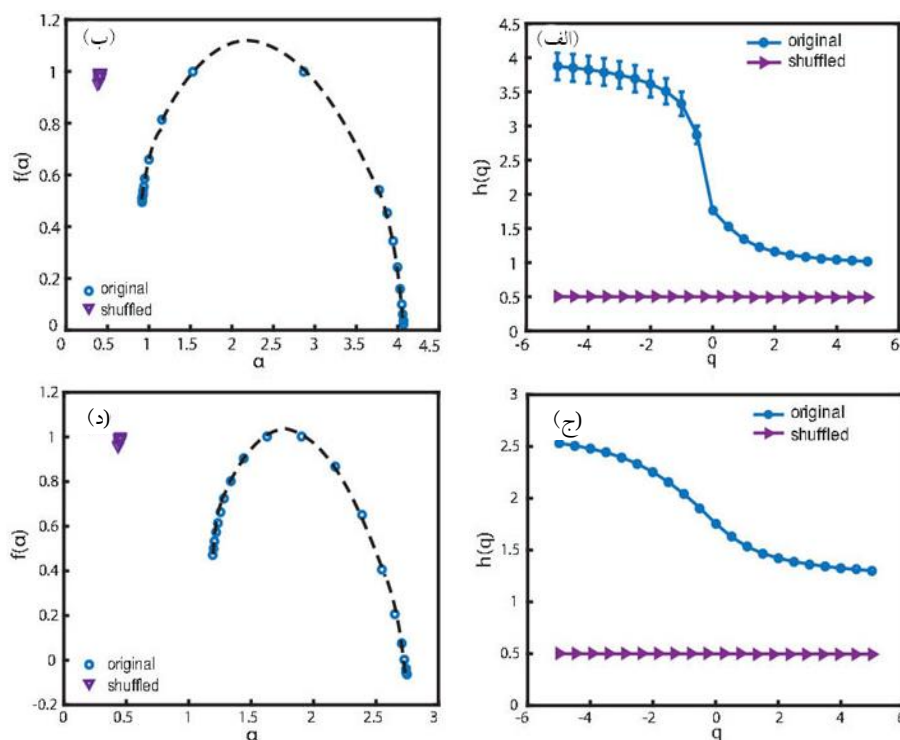
میانگین حسگرها $h_1(q=2) = 1/17 \pm 0/01$ و $h_2(q=2) = 0/93 \pm 0/02$ برای میانگین حسگرها $h_1(q=2) = 1/49 \pm 0/01$ و $h_2(q=2) = 1/03 \pm 0/03$ به دست آوردیم که نشان دهنده پایداری کوتاه برد سری‌های زمانی است. بنابراین تابش خورشید و شاخص c-s برای بازه $s < s_c$ خصوصیات غیرپایا ($h(q=2) > 1$) دارند. برای مطالعه رفتار غیرخطی تابش خورشید در مقیاس‌های زمانی کوچک، برای مثال $s < s_c$ توجه خود را معطوف به ناحیه $450 < s < 900$ ثانیه کردیم چرا که $F_q(s)$ رفتار نمایی خوبی داشت و همینطور برای این فاصله زمانی نتایج نشان می‌دهد که $h(q)$ وابستگی قوی به q دارد که حاکی از رفتار بس برخالی داده‌ها است (نمودار ۹).

نمودار ۹. ج نمودار طیف تکینگی $f(a)$ بر حسب a برای تک حسگر، میانگین حسگرها و شاخص c-s است. پهنای طیف تکینگی $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ و دامنه $h(q)$ معیاری برای کمی کردن درجه بس برخالی است [۴۶]. مقادیر کوچک $f(a)$ مربوط به اتفاقات نادر (مقادیری در انتهای دم تابع توزیع) و بزرگ‌ترین مقادیر $f(a)$ دیمانسیون ظرفیت است که با فرض توزیع بکنواخت در تمامی بخش‌ها به دست می‌آید [۴۷]. ما پهنای طیف تکینگی را برای تک حسگر $3/22 \pm 0/21$ و برای میانگین حسگرها $1/56 \pm 0/03$ به دست آوردیم. از این‌رو، نشان دادیم که تابش اندازه‌گیری شده توسط تک حسگر ویژگی‌های غیرخطی بیشتر و قوی‌تری نسبت به میانگین حسگرها دارد.

نتایج حاصله از محاسبه $\Delta\alpha$ و نمای هارست برای مقیاس $s > s_c$ ($h_1(2)$) و $s < s_c$ ($h_2(2)$) در جدول ۲ به صورت خلاصه نشان داده شده است.

جدول ۳. داده‌های اصلی و برخورد حاصله برای تک حسگر و میانگین حسگرها.

مکان	$h(q=2)$	$\Delta\alpha$
تابش خورشید، تک حسگر	1.61 ± 0.02	۳.۲۲
تابش خورشید، تک حسگر، برخورد	0.49 ± 0.01	۰.۰۱
تابش خورشید، متوسط حسگرها	1.49 ± 0.01	۱.۵۶
تابش خورشید، میانگین متوسط، برخورد	0.49 ± 0.02	۰.۰۱

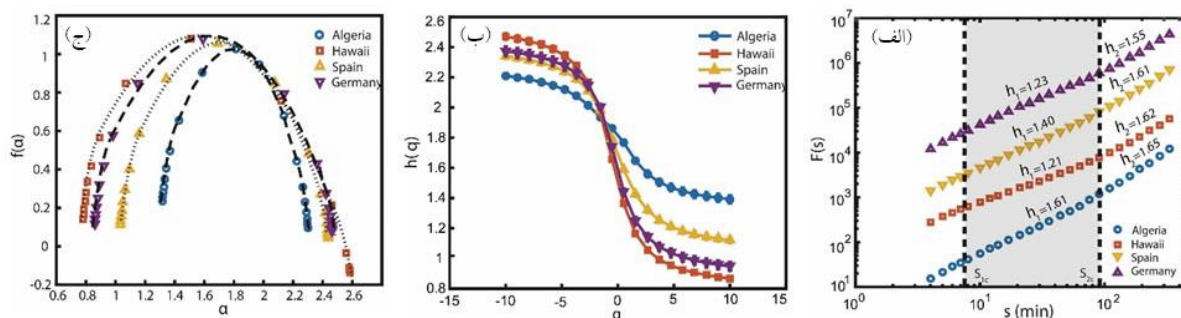


نمودار ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه پارامترهای مختلف $f(\alpha)$ و $h(q)$ برای سری داده‌های اصلی و برخورد حاصل از آن برای تک حسگر (الف) و (ب) و میانگین حسگرها (ج) و (د).

معطوف کنیم. با توجه به نمودار ۱۰، الف، رفتار غیرپایا را برای این بازه زمانی ($h > 1$) پیدا کردیم، هر چند بزرگی شیب کشورهای مختلف کمی تفاوت دارد. آلمان بلندترین همبستگی دوربرد افت و خیزها را دارد که پس از آن به ترتیب الجزیره، اسپانیای و هاوایی است. نمودارهای ۱۱. ب و ۱۱. ج تمامی داده‌های طبیعت بس برخالی را با وابستگی $f(\alpha)$ و $h(q)$ نسبت به q نشان می‌دهند. در نمودار ۱۱. ج پهنای طیف تکنیکی به ترتیب برای الجزیره، هاوایی، اسپانیا و آلمان 1.05 ± 0.03 ، 1.82 ± 0.03 ، 1.42 ± 0.03 و 1.63 ± 0.05 هستند.

هر سری داده حدود ۳۰۰ روز داده است. در نمودار ۱۰، نتایج را برای تمامی داده‌های کشورها نشان می‌دهد. با توجه به نمودار $F(s)$ بر حسب s در نمودار ۱۱. الف کشورها دو همگذری^۱ دارند که یکی در دقیقه $s_c \approx 7$ و دیگری در دقیقه $s_c \approx 90$ از سری زمانی است. در قسمت‌های قبلی همگذری در دقیقه $s_c \approx 7$ را برای داده‌های با بسامد ۱ Hz مشاهده کرده بودیم. در این بخش بر خلاف بخش‌های قبلی که به بررسی رفتار بس برخالی در مقیاس زمانی $s_c < s$ پرداختیم، می‌خواهیم توجه خود را به بخشی از مقیاس زمانی که $s_c < s < s_c$ است

۱. Cross-over



نمودار ۱۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) تابع استاندارد افت و خیز بر حسب مقیاس برای چهار کشور است که دو همگذاری را در S_C و S_{FC} نشان می‌دهد، (ب) نمای مقیاس بس برخالی $h(q)$ و (ج) طیف تکنیکی $f(a)$ است که اندازه‌گیری‌ها برای کشورهای مختلف قدرت بس برخالی متفاوتی از یکدیگر را نشان می‌دهند. میزان بس برخالی برای سری زمانی مربوط به هاوایی قوی‌ترین و سپس برای آلمان، اسپانیا و الجزیره به ترتیب کمتر است.

زمانی مشخص (۷، ۵ و ۹۰ دقیقه) هستند و درک بهتری از رفتار توانی آنها را در بروز می‌دهد. همچنین دریافتیم که میزان بس برخالی برای کشورهای متفاوت، فرق می‌کند به طوری که کشور هاوایی قوی‌ترین بس برخالی و کشور الجزیره کمترین حد را در بین ۴ ناحیه موجود نشان می‌دهد. از طرفی با توجه به رفتار تابع چگالی احتمال تفاضل‌های دو نقطه‌ای می‌بینیم که کمترین پهنا مربوط به ایالت هاوایی و بیشتری مربوط به کشور الجزیره می‌شود. بر خلاف آن چیزی که قبلاً تصور می‌شده است، رابطه بین قدرت بس برخالی و پهنای تابع چگالی احتمال که معیاری از وجود «رخداد‌های نادر» است چندان بدیهی نیست. به عنوان مثال در [۴۸-۵۱] آمده است که حذف «رخداد‌های نادر» از یک سری زمانی می‌تواند موجب افزایش پهنای تابع تکنیکی و در نتیجه رفتار مقیاسی شود و همین طور مثال‌های دیگری وجود دارد که خلاف این امر را اثبات می‌کند [۵۲-۵۳]. نتایج ما امکان درک بهتر افت و خیزهای انرژی‌های خورشیدی و بادی را فراهم می‌سازد که برای طراحی و کنترل شبکه‌های برق که توسط این منابع تغذیه می‌شوند کمک خواهد کرد.

جدول ۴. نتایج عددی نمای تعمیم یافته هارست و پهنای تابع تکنیکی.

مکان	$h(q=2)$	$\Delta\alpha$
الجزیره	$1/61 \pm 0/02$	$1/05 \pm 0/03$
هاوایی	$1/21 \pm 0/02$	$1/82 \pm 0/03$
اسپانیا	$1/40 \pm 0/01$	$1/42 \pm 0/03$
آلمان	$1/23 \pm 0/02$	$1/63 \pm 0/05$

نتایج برای هاوایی نشان از قوی‌ترین بس برخالی را دارد که پس از آن آلمان، اسپانیا و الجزیره می‌باشند. با توجه به دلایل ذکر شده در قسمت‌های پیشین، نتیجه ای که می‌توان گرفت این است که جنبه‌های غیرخطی تابش خورشید بستگی به شرایط جغرافیایی و آب و هوایی دارد، به جدول ۴ رجوع شود.

همان طور که گفته شد انرژی‌های نو در حال حاضر از منظر اقتصادی به علت افت و خیزهای موجود در انرژی‌های دریافتی ما، منابع قابل اطمینانی نیستند، چون که به وجود آمدن افت و خیزهایی که شبکه برق یک کشور را مختل می‌کنند چندان هم غیرقابل انتظار نیستند. اما نتایج ما از تحلیل بس برخالی نشان می‌دهند که این سیگنال‌ها دارای مقیاس‌های

مراجع

- 110 (2013) 138701.
3. A Woyte, R Belmans, and J Nijs, *Analysis and Statistics, Sol. Energy*, **81** (2007) 195.

1. A Schavan, Germanyffs Energy Research Plan, Science (2010) 330295.
2. P Milan, M Wächter, and J Peinke, *Phys. Rev. Lett.*

- Power Production by Multi-Time Statistics Wind Energy—Impact of Turbulence*”, ed M Hölling *et al.*, Berlin: Springer (2014).
29. R Baïle and J-F Muzy, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 254501
 30. R Wood and P R Field, *J. Clim.* **24** (2011) 4800
 31. C Tsallis, *J. Stat. Phys.* **52** (1988) 479.
 32. J W Kantelhardt, “*Mathematics of Complexity and Dynamical Systems*”, New York, Springer (2011) 463.
 33. A Eke, P Herman, L Kocsis, L R Kozak, *Physiol. Meas.* **23** (2002) R1-38
 34. C K Peng, S V Buldyrev, S Havlin, M Simons, H E Stanley, A L Goldberger, *Phys. Rev. E* **49** (1994) 1685.
 35. L Xu, P C h Ivanov, K Hu, Z Chen, A Carbone, H E Stanley, *Phys. Rev. E* **71** (2005) 051101.
 36. Z Chen, P C h Ivanov, K Hu, H E Stanley, *Phys. Rev. E* **65** (2002) 041107.
 37. K Hu, P C h Ivanov, Z Chen, P Carpena, H E Stanley, *Phys. Rev. E* **64** (2001) 011114.
 38. J W Kantelhardt, S A Zschiegner, E Koscielny-Bunde, 601 S Havlin, A Bunde, and H E Stanley, *Physica A* **316**, 87 (2002) 441.
 39. S M Ossadnik, S B Buldyrev, A L Goldberger, S Havlin, R N Mantegna, C K Peng, M Simons, and H E Stanley, *Biophys. J.* **67**(1994) 64.
 40. M S Taqqu, V Teverovsky, and W Willinger, *Fractals* **3** (1995) 785.
 41. A Bunde, S Havlin, J W Kantelhardt, T Penzel, and J H Peter, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 564 (2000) 3736.
 42. J Feder, “*Fractals*”, Plenum Press, New York (1988).
 43. H O Peitgen, H Jurgens, and D Saupe, “*Chaos And Fractals*”, Springer-Verlag, New York (1992) 659.
 44. M S Movahed, G Jafari, F Ghasemi, S Rahvar, and M R Rahimi, *J. Stat. Mech. Theory* (2006) P02003.
 45. J W Kantelhardt, E Koscielny-Bunde, and H H A Rego, *Physica A* **599****295** (2001) 441.
 46. Y Ashkenazy, D R Baker, H Gildor, and S Havlin, *Geophys. Res. Lett.* **30** (2003) 2146.
 47. A Biswas, T B Zeleke, and B C Si, *Nonlin. Processes Geophys.* **19** (2012) 227.
 48. D Sornette, *Phys. Rep.* **378** (2003) 1.
 49. V S L’vov, A Pomyalov, and I Procaccia, *Phys. Rev. E* **63** (2001) 056118.
 50. D Sornette, *Int. J. Terraspace, Sci. Eng.* **2** (2009) 1.
 51. Ł Czarnecki and D Grech, *Acta, Phys. Pol. A* **117** (2010) 623.
 52. W X Zhou, *Europhys. Lett.* **88** (2009) 28004.
 53. G Oh, C Eom, S Havlin, W S Jung, F Wang, H E Stanley, and S Kim, *Eur. Phys. J. B* **85** (2012) 214.
 4. A Madanchi, M Absalan, G Lohmann, M Anvari and M R Rahimi Tabar, *Solar Energy*, **144** (2017) 1.
 5. M Anvari *et al.*, *New J. Phys.*, **18** (2016) 063027.
 6. <http://entsoe.eu/>
 7. G Andersson., Modeling and analysis of electric power systems ETH Zurich (2008) (<http://eeh.ee.ethz.ch>)
 8. German TSOs Internet platform for control reserve tendering, 2015ff (<https://regelleistung.net/>)
 9. Data can be downloaded under <http://unioldenburg.de/fileadmin/>
 10. www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichung/en/netzkennzahlen/tatsaechlicheund-prognostiziertewindenergieeinspeisung.
 11. www.eirgridgroup.com/operations/systemperformance/data/windgeneration/.
 12. M Sengupta and A Andreas, Oahu Solar Measurement Grid (1-Year Archive):1-Second Solar Irradiance DA-5500- 56506 Oahu, Hawaii (Data); NREL(2010), (<http://dx.doi.org/10.5439/1052451>).
 13. The data set are available at <http://ftp.bsrn.awi.de/> see also <http://bsrn.awi.de/data/data-retrievalvia-ftp.html>
 14. H G Beyer, A Hammer, J Luther, J Poplawska, K Stolzenburg, and P Wieting, *Sol. Energy*, **52** (1994) 379.
 15. R Friedrich, J Peinke, M Sahimi and M R Rahimi Tabar, *Phys. Rep.* **506** (2011) 87.
 16. P Ineichen, *Solar Energy* **80** (2006) 468.
 17. A Hammer, D Heinemann, A Westerhellweg, H G Beyer, and C Reise, 9th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography No. 2 (1998).
 18. U Frisch, “*Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov Cambridge*”, Cambridge University Press (1996).
 19. B Castaing, Y Gagne, and E Hopfinger, *Physica D*, **46** (1990) 177
 20. F Chilla, J Peinke, and B Castaing, *J. Phys. II* **6** (1996) 455.
 21. L Chevillard and C Meneveau, *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 174501.
 22. K R Sreenivasan, *Rev. Mod. Phys.* **71** (1999) S383.
 23. G Falkovich, K Gawedzki, and M Vergassola, *Rev. Mod. Phys.* **73** (2001) 913.
 24. J Apt, *J. Power Sources*, **169** (2007) 369.
 25. M R Rahimi Tabar, M Anvari, G Lohmann, D Heinemann, M Wächter, P Milan, E Lorenz, and J Peinke, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **223** (2014) 2637.
 26. R Calif and F G Schmitt, *J. Wind Eng.Ind. Aerodyn.* **109** (2012) 1.
 27. A E Curtright and J Apt, *Res. Appl.* **16** (2008) 241.
 28. O Kamps, “*Characterizing the Fluctuations of Wind*