

تحلیل خودمتشابه سری زمانی روزانه تابش خورشید با هدف طبقه بندی روزهای هواشناسی تیپ

فاطمه بی‌خوابی آرانی^۱، زهرا آقاشریعتمداری^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۳۰/۱۰/۱۳۹۵ - تاریخ بازنگری: ۷/۵/۱۳۹۶ - تاریخ تصویب: ۲۱/۵/۱۳۹۶)

چکیده

آگاهی از الگوهای غالب نوسانات تابش در یک منطقه از دیدگاه برنامه‌ریزی جهت استفاده از پتانسیل انرژی خورشیدی حائز اهمیت است. در این پژوهش سیگنال‌های سری زمانی تابش خورشید از دیدگاهی نوین و براساس مفهوم فرکتال (خودمتشابه) مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا با استفاده از داده‌های دو ثانیه‌ای تابش ثبت شده در ایستگاه کرج در فاصله سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۴ بعد خودمتشابه سری زمانی تابش خورشید با استفاده از روش مینکوفسکی-بولیگاند محاسبه شده و با در نظر گرفتن توأمان شاخص پاکی آسمان به منظور طبقه‌بندی روزهای مختلف سال از نظر ویژگی‌های تابشی به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از طبقه‌بندی نشان می‌دهد در سال‌های ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ بیشترین درصد احتمال وقوع مربوط به کلاس سه (آسمان کاملاً ابری) به ترتیب با ۵۲/۵۵، ۵۲/۰۷ و ۴۴/۸ درصد است و روزهای متعلق به کلاس یک (آسمان صاف) و کلاس دو (آسمان نیمه ابری) از نظر احتمال وقوع در هر سه سال آماری به ترتیب در رده دوم و سوم قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از این روش نوین که روزهای سال را براساس رفتار سری زمانی تابش طبقه بندی می‌کند می‌تواند به عنوان گامی اساسی در تصمیم‌گیری جهت نصب سلول‌های فتوولتائیک در یک منطقه و همچنین ارزیابی کارایی این سیستم‌ها به‌شمار رود.

واژه‌های کلیدی: تابش خورشیدی، بعد خودمتشابهی، طبقه‌بندی، تیپ روز.

مقدمه

تابش خورشیدی از متغیرهای مهم اقلیمی است که با بسیاری از فرآیندهای هیدرولوژی و هواشناسی ارتباط مستقیم و تنگاتنگی دارد. دانستن اطلاعات مربوط به تابش خورشید در بسیاری از کاربردهای صنعتی، سیستم‌های فتوولتائیک^۱، کشاورزی و طراحی کلکتورهای خورشیدی کاربرد دارد. انرژی خورشیدی بهترین راه‌حل اقتصادی و تکنولوژیکی تأمین برق در سراسر جهان است. مطالعه میزان تابش دریافتی از خورشید در هر محل و چگونگی تغییرات آن در روزهای مختلف سال یکی از مهمترین مراحل مورد نیاز جهت بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد. انتخاب مکان برای نصب سلول‌های خورشیدی و تجزیه و تحلیل عملکرد آنها نیازمند آگاهی از داده‌های تابش خورشیدی است (Badescu, 2014).

مدل‌سازی تغییرات تصادفی تابش‌های خورشیدی پیش از این در تحقیقات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. این

بررسی‌ها اغلب بر مبنای فرآیندهای تصادفی بوده‌اند که از آن جمله می‌توان به روش مارکف اشاره کرد که بصورت گسترده استفاده شده است (Brinkworth, 1977; Bartoli et al., 1981; Aguiar et al., 1988; Maafi, 1998). (Maafi (1998) طبقه‌بندی تابش روزانه را با در نظر گرفتن ارتباط آن با وضعیت آسمان (ابری، صاف و غیره) انجام داد. برای پاسخگویی به این نیاز باید برای انتخاب مکان، روزها با توجه به نوع‌شان دسته‌بندی شوند. بسیاری از مطالعات مسئله طبقه‌بندی تیپ روزانه را مورد بررسی قرار داده‌اند. مطالعات انجام شده براساس پارامترهایی که به‌عنوان معیاری برای طبقه‌بندی استفاده می‌شوند، متفاوتند (Harrouni and Maafi, 2002; Maafi and Harrouni, 2003; Harrouni et al., 2005). اغلب این مطالعات براساس روش‌های آماری با استفاده از پارامترهای هواشناسی مانند تابش خورشید، دما و باد است. تیپ‌بندی هوا از جمله زیر مجموعه‌های آب و هواشناسی سینوپتیک است. در واقع هر تیپ هوا، مجموعه‌ای سامان یافته از عناصر اصلی سازنده هوا در زمان‌های مختلف بوده که ویژگی‌های مشابهی را منعکس می‌سازند. برای تیپ‌بندی هوا، ویژگی‌های اقلیمی سطح زمین مانند دما، دمای نقطه شبنم،

* نویسنده مسئول: zaghera@ut.ac.ir

1. Photovoltaic
2. Collector

اصلی آسمان صاف، آسمان تا قسمتی ابری و آسمان کاملاً ابری تقسیم شدند. نتایج این مدل برای تحلیل کارایی سیستم‌های فتوولتائیک نصب شده در ایستگاه‌های مورد بررسی استفاده شد. (Harrouni (2008) از شاخص خودمتمشابه به دست آمده از

سری‌های زمانی تابش در پنج ایستگاه دو ایستگاه در الجزایر^۱: ایستگاه تهیفت^۲ (تمنراست^۳) و ایستگاه ایمورو^۴ (یلیزی^۵)، دو سایت در کلرادو^۶: گلدن^۷ و بولدر^۸ و آخرین ایستگاه پالو آلتو^۹ در کالیفرنیا^{۱۰}، با اقلیم‌های متفاوت به منظور طبقه‌بندی روزهای خاص هواشناسی استفاده نمود. همچنین در ایستگاه هواشناسی کرج طی مطالعه‌ای با استفاده از بعد خودمتمشابه داده‌های تابش در سه دسته روز با آسمان صاف، روز با آسمان نیمه ابری و روز با آسمان کاملاً ابری طبقه‌بندی گردیده‌اند. در این مطالعه با توجه به بررسی‌های پیشین تحلیل سری زمانی تابش با روشی نوین و از دیدگاه خودمتمشابه‌ی انجام گرفت و تغییرات تابش خورشیدی براساس بعد خودمتمشابه طبقه‌بندی شدند (Bikhabi et al., 1991).

خودمتمشابه‌ها موضوعاتی ارائه شده با درجه‌ی بسیار بالایی از پیچیدگی هندسی هستند، توصیف و مدل‌سازی آن‌ها با استفاده از شاخص قدرتمندی بنام بعد خودمتمشابه‌ی (Fractal Dimension) انجام شده است. این بعد شامل اطلاعاتی در مورد بی‌نظمی هندسی از اجرام خودمتمشابه در مقیاس‌های مختلف است. در مسایل خورشیدی، بعد خودمتمشابه بطور مستقیم با نوسانات زمانی سیگنال‌های تابش ارتباط دارد. (Havlin et al., 1999) اصول مقیاس‌گذاری را برای سیستم‌هایی نظیر

سکناس‌های DNA ضربان قلب و تغییرات هواشناسی بکار بردند و یک روش مقیاس‌گذاری نمایی جهت نوسانات آب و هوایی پیشنهاد نمودند. (Muselli et al., 2000) طبقه‌بندی روزهای تیپ هواشناسی را براساس داده‌های تابش بصورت ماهانه و سالانه انجام دادند.

سکانس‌های DNA ضربان قلب و تغییرات هواشناسی بکار بردند و یک روش مقیاس‌گذاری نمایی جهت نوسانات آب و هوایی پیشنهاد نمودند. (Muselli et al., 2000) طبقه‌بندی روزهای تیپ هواشناسی را براساس داده‌های تابش بصورت ماهانه و سالانه انجام دادند.

هدف از این مطالعه بررسی و ارائه روشی جدید جهت استخراج و دستیابی به ویژگی‌های خودمتمشابه‌ی پنهان در سری

زمانی تابش ایستگاه کرج و طبقه‌بندی روزهای مختلف سال از نظر رفتار تابشی در این ایستگاه می‌باشد. نتایج و روش کار در این مطالعه می‌تواند به عنوان الگویی جهت استفاده در سایر

برناکی، فشار، سمت و سرعت باد، به طور جامع و همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرند. مطالعه تیپ‌های هوا از نظر تاثیر آن‌ها بر محیط‌زیست، منابع آب و ارتباط با نوسانات آب و هوایی از جمله خشکسالی حائز اهمیت است (Nouri et al., 2014).

روش‌های آماری متعددی برای طبقه‌بندی روزهای خاص هواشناسی تعریف شده است مانند روش‌های تحلیل همبستگی و یا روش Ward که در آن‌ها ویژگی تصادفی بودن تابش خورشیدی به عنوان مبنا مد نظر قرار گرفته است (Sfetsos and Coonick, 2000). طبقه‌بندی روزهای مختلف براساس ویژگی‌های تابش خورشیدی در بسیاری از مطالعات مد نظر قرار گرفته (Muselli et al., 2000; Guessoum et al., 1998) اما مطالعات بسیار اندکی در زمینه طبقه‌بندی سیگنال‌های تابش خورشیدی با روش تحلیل خودمتمشابه انجام شده است (Louche et al., 1991).

برای کمی‌سازی مانایی بلند مدت در داده‌های تابش خورشید استفاده کردند. مانایی بیانگر میزان همبستگی بین مقادیر مجاور در یک سری زمانی است. مقادیر یک سری زمانی مانا می‌توانند بر سایر مقادیر موجود در آن سری که حتی از نظر زمانی با آن‌ها فاصله دارد نیز تاثیر بگذارند. بررسی‌ها نشان داد که داده‌های تابش ماهانه و سالانه مانایی ندارند. (Harrouni et al., 2005) به منظور برآورد شاخص خودمتمشابه و استفاده از آن در طبقه‌بندی تابش‌های روزانه از داده‌های تابش اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی ده دقیقه‌ای استفاده کردند و با بکار بردن شاخص شفافیت آسمان در کنار شاخص خودمتمشابه مدل طبقه‌بندی را ارائه نمودند که براساس آن روزها به سه طبقه

1. Algerian
2. Tahifet
3. Tamanrasset
4. Imehrou
5. Illizi
6. Colorado
7. Golden
8. Boulder
9. Palo Alto
10. California

مینکوفسکی - بولیگاندا^۲ برای اندازه‌گیری این نوسانات استفاده شد. یادآور می‌شود این روش بعد خودمتشابه را بصورت تقریبی برآورد می‌نماید. بولیگاندا نشان داد که بعد خودمتشابه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_M = 2 - \lambda(S) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن $\lambda(S)$ عامل تشابه و نشانگر مرتبه بسیار کوچک $S(\Delta\tau)$ است. که توسط رابطه زیر بدست می‌آید (Badescu, 2014):

$$\lambda(S) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\ln[S(\Delta\tau)]}{\ln(\Delta\tau)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

با جایگذاری این رابطه در رابطه (۱) بدست می‌آوریم:

$$D = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \left[2 - \frac{\ln \left[\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau} \right]}{\ln \left(\frac{1}{\Delta\tau} \right)} \right] \quad (\text{رابطه ۳})$$

و با استفاده از قوانین لگاریتم:

$$D = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \left\{ \frac{\ln \left[S \left(\frac{\Delta\tau}{\Delta\tau^2} \right) \right]}{\ln \left[\frac{1}{\Delta\tau} \right]} \right\} \quad (\text{رابطه ۴})$$

و درنهایت با بازآرایی:

$$\ln \left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2} \right) \cong D \cdot \ln \left(\frac{1}{\Delta\tau} \right) + \text{constant}, \quad (\text{رابطه ۵})$$

بنابراین، برای تخمین بعد خودمتشابهی D که نشان‌دهنده شیب خط مستقیم برازش شده بر نمودار لگاریتمی رابطه (۵) است، استفاده از مقیاس‌های زمانی گوناگون $\Delta\tau$ و اندازه‌گیری مساحت متناظر $S(\Delta\tau)$ لازم است.

محاسبه $S(\Delta\tau)$

برای محاسبه بعد خودمتشابه لازم است مساحت پوشیده شده توسط گام‌های زمانی $(\Delta\tau)$ محاسبه گردد. برای فواصل زمانی مختلف $\Delta\tau$ ، مساحت $S(\Delta\tau)$ پوشانده شده توسط این نمودار با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$S(\Delta\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} \Delta\tau |f(t_n + \Delta\tau) - f(t_n)| \quad (\text{رابطه ۶})$$

که N نشان‌دهنده طول سیگنال‌ها، $f(t_n)$ نشان‌دهنده مقدار تابع سیگنال در زمان t_n و $|f(t_n + \Delta\tau) - f(t_n)|$ نشان‌دهنده تغییرات تابع در فاصله زمانی $\Delta\tau$ است. پس از

ایستگاه‌های هواشناسی و به منظور برنامه‌ریزی و مکان‌یابی محل احداث سیستم‌های فتوولتائیک مورد استفاده قرارگیرد.

مواد و روش‌ها

ایستگاه مورد مطالعه

ایستگاه مورد مطالعه در این پژوهش ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرج با عرض جغرافیایی $35^{\circ}48'$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ}57'$ شرقی و ارتفاع $1292/9$ متر در شهر کرج واقع در استان البرز می‌باشد. طول ساعات آفتابی بطور متوسط در فصل زمستان ۷ ساعت و در فصل تابستان ۱۲ ساعت است.

داده‌های تابش

داده‌های تابش کل (GR)^۱ رسیده به یک سطح افقی طی سال‌های آماری ۲۰۱۴-۲۰۱۶ از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. ایستگاه کرج به‌عنوان ایستگاه مادر و پایلوت سنسور پیرانومتر سری CM7B با ضریب حساسیت 12.96×10^{-6} وات بر مترمربع انتخاب شده و از ماه اکتبر سال ۲۰۱۳ در این ایستگاه نصب گردیده است و برداشت داده تابش خورشیدی را انجام می‌دهد. داده‌ها در گام زمانی دو ثانیه‌ای و به‌صورت ۲۴ ساعته توسط دستگاه پیرانومتر برداشت شده است.

پس از بررسی داده‌های روزانه، روزهای دارای خلا آماری بیش از یک ساعت (بعبارت دیگر کمبود بیش از ۱۸۰۰ داده در روز) از روند مطالعات حذف گردید و در نهایت به ترتیب ۱۳۷، ۱۶۹ و ۱۲۵ روز-داده، برای سال‌های ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ انتخاب شد. گام زمانی داده‌های ثبت شده در هر روز دو ثانیه است یعنی در هر روز ۴۳۲۰۰ رکورد داده مورد بررسی قرار گرفت و در مجموع با توجه به طول دوره آماری مورد بررسی یعنی سه ساله و پس از کنترل کیفی داده‌ها، ۳۷۲۳۸۴۰۰ رکورد داده در این تحلیل بکار گرفته شده است.

برآورد بعد خودمتشابه (خودمتشابه)

برآورد نظری بعد خودمتشابه

خودمتشابه‌ها می‌توانند انواع سیگنال‌های طبیعی را مدل‌سازی نمایند. بعد خودمتشابهی پارامتری مهم در مدل‌سازی خودمتشابهی و شامل اطلاعاتی راجع به بی‌نظمی شکل سیگنال‌هاست. چندین الگوریتم برای محاسبه بعد خودمتشابهی سیگنال‌ها (Dubuc et al., 1989; Maragos and Sun, 1993) ارائه شده است. در این مطالعه به دلیل آن‌که تابش کل روزانه، سری زمانی گسسته یک بعدی است از بعد

محاسبه $s(\Delta\tau)$ ، با محاسبه شیب خط رابطه بعد خودمتشابه D ، بدست می‌آید (Badescu, 2014).

$$D = \frac{\ln\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right)}{\ln\left(\frac{1}{\Delta\tau}\right)} \quad (\text{رابطه ۷})$$

سپس چندین نقطه $(\Delta\tau_i, S(\Delta\tau_i))$ برای ترسیم خط باید محاسبه گردد. برآورد بعد خودمتشابه D نیازمند برازش مناسبی بر نمودار لگاریتمی تعریف شده براساس رابطه (۵) است. یکی از نکات مهم، تعداد نقاط در ترسیم نمودار است. این تعداد با استفاده از $\Delta\tau_{\max}$ که بیشترین فاصله بین خطوط برازش داده شده بر نمودار لگاریتمی است، بدست می‌آید. همانطور که ذکر شد، برای برآورد بعد خودمتشابه اغلب از روش‌های تجربی برای تعیین $\Delta\tau_{\max}$ استفاده می‌شود. این روش نیازمند زمان و دقت بالاست. در اینجا یک روش بهینه، برای برآورد $\Delta\tau_{\max}$ معرفی می‌نماییم.

روش بهینه

تجربه نشان داده که برای محاسبه $\Delta\tau_{\max}$ یک برازش مناسب بر D لازم است. این برازش به چندین پارامتر بویژه طول زمانی سیگنال N ، وابسته است. $\Delta\tau$ نباید خیلی کوچک باشد، از خط برازش داده شده انحراف نداشته باشد، و از $\frac{N}{2}$ بیشتر نباشد. $\Delta\tau$ همچنین باید شرایط خطی بودن خط برازش داده شده را فراهم سازد. در این مطالعه انتخاب $\Delta\tau_{\max}$ اولیه یک است، زیرا تعداد نقاط تشکیل دهنده نمودار به‌عنوان سیگنال‌های زمانی، نباید بسیار کوچک باشند؛ سپس $\Delta\tau_{\max}$ با گام ۱ تا $\frac{N}{2}$ افزایش پیدا کرد و چندین خط مستقیم لگاریتمی که با استفاده از برآورد حداقل مربعات برازش داده شده بود، بدست آمد. $\Delta\tau_{\max}$ بهینه، با برازش یک خط مستقیم به نمودار لگاریتمی با حداقل مربعات خطا بدست می‌آید، که با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد:

$$E_{quad} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این رابطه n مشخص کننده تعداد نقاط مورد استفاده برای برازش خط مستقیم لگاریتمی، d_i نمایانگر فاصله‌ی بین نقاط $\left(\ln\left(\frac{1}{\Delta\tau}\right), \ln\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right)\right)$ و خط مستقیم لگاریتمی است. در این مطالعه برای $\Delta\tau$ ، ۷ گام زمانی یک، دو، پنج، هفت، ده، ۱۴ و ۳۵ دقیقه در نظر گرفته شد.

طبقه‌بندی خودمتشابهی تابش خورشیدی

طبقه‌بندی با استفاده از بعد خودمتشابهی به عنوان معیاری برای طبقه‌بندی تابش خورشیدی و عملکرد مختلف تیپ روزها، مانند روز با آسمان صاف، ابری، نیمه ابری و غیره می‌باشد. مطالعات Harrouni (2008) نشان می‌دهد بسیاری از سیگنال‌های روزانه تابش خورشید بعد خودمتشابهی مشابه دارند درحالیکه مربوط به روزهایی با شرایط آب و هوایی کاملاً متفاوت از نظر ابرناکی می‌باشند لذا در کنار بعد خودمتشابهی می‌بایست شاخص شفافیت آسمان K_T به همراه D به‌عنوان معیار دوم در الگوریتم طبقه‌بندی بکار گرفته شود.

شاخص شفافیت آسمان K_T

شاخص شفافیت آسمان K_T عبارتست از نسبت تابش کل دریافتی از خورشید بر رویه افقی در سطح زمین (H) به تابش کل دریافتی از خورشید بر رویه افقی در بالای جو زمین (H_0). بنابراین:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (\text{رابطه ۹})$$

شاخص شاخص شفافیت آسمان در بازه $0 < K_T \leq 1$ قرار دارد. بر این اساس تابش روزانه در سه دسته با توجه به طبقه‌بندی زیر، مرتب سازی گردید:

کلاس I: آسمان صاف

$$K_T \geq (K_T)_I \text{ و } 1 \leq D \leq D_I$$

کلاس II: آسمان نیمه ابری

$$K_T \geq (K_T)_I \text{ و } D_I < D \leq D_{II}$$

کلاس III: آسمان کاملاً ابری

$$K_T < (K_T)_I \text{ یا } D > D_{II} \text{ یا } D \leq D_{II}$$

D_I و D_{II} آستانه‌های D و $(K_T)_I$ یک مقدار مناسب برای K_T به منظور کلاس‌بندی‌های متفاوت می‌باشد. آستانه‌های D و K_T پارامترهای جدیدی هستند که در طبقه‌بندی تابش مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقدار انتخابی ۰/۵ برای $(K_T)_I$ آستانه تعیین کننده کلاس یک روز با آسمان ابری از یک روز با آسمان صاف است.

طبقه‌بندی خودمتشابه روزانه

برای برآورد آستانه بعد خودمتشابهی D_I و D_{II} دو روش وجود دارد، یک روش ابتکاری که شامل تجزیه و تحلیل کلیه اشکال تابش روزانه خورشید و بعد خودمتشابهی متناظر با آن‌هاست. در این شیوه برای هر روز از سال هیستوگرام سیگنال‌های تابش تهیه می‌شود و براساس آن بعد خودمتشابهی برآورد و طبقه‌بندی روزانه انجام می‌گیرد این روش بعلاوه زمان‌بر بودن و

محور عمودی انرژی خورشیدی دریافت شده روی یک سطح کاملاً افقی (بر حسب وات بر مترمربع) است. همچنین بعد خودمتشابه محاسبه شده با استفاده از روابط بیان شده، برای هر روز در بالای هر نمودار نوشته شده است. در واقع شکل (۱) نشان‌دهنده نمونه شکل سیگنال‌های تابش روزانه خورشیدی برای هر سه تیپ کلاس (آسمان صاف، نیمه ابری و کاملاً ابری) به همراه بعد خودمتشابه محاسبه شده برای همان روزها می‌باشد. شکل (a) سمت راست دارای بعد خودمتشابه ۱/۳۶ است که طبق طبقه‌بندی انجام شده در جدول (۱) تابش در این روز در کلاس دو واقع می‌باشد اما با تاثیر دادن شاخص شفافیت آسمان به همراه بعد خودمتشابه در طبقه‌بندی روزها، این روز در کلاس سه واقع شد.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود بین مقادیر بعد خودمتشابهی و شکل سیگنال‌ها رابطه خوبی برقرار است. با توجه به شکل (۱) اگر شکل سیگنال تابش روزانه مانند نمودارهای سمت چپ بدون هرگونه نوسان باشد تابش منظم و تابش روزانه براساس این شکل سیگنال، در کلاس یک قرار می‌گیرد. بطور مثال برای سال ۲۰۱۵ بعد خودمتشابه برابر ۱/۰۵ است که با توجه به دسته‌بندی بعد خودمتشابه انجام شده برای سال ۲۰۱۵ یعنی $1 \leq D \leq 1/11$ در کلاس یک قرار دارد. اگر سیگنال تابش همانند دومین نمودارهای سیگنال در شکل (۱)، دارای اندکی نوسان باشد تابش روزانه در کلاس دو قرار می‌گیرد. بطور مثال برای سال ۲۰۱۵ در این شکل بعد خودمتشابه محاسبه شده برای این روز برابر ۱/۳۲ است که با توجه به دسته‌بندی بعد خودمتشابه انجام شده برای کلاس دو در سال ۲۰۱۵ یعنی $1/34 < D \leq 1/11$ قرار دارد. همین‌طور برای نمودارهای سمت راست شکل (۱) سیگنال دارای نامنظمی و نوسانات بسیاری می‌باشد بطور مثال برای نمودار ترسیم شده برای سال ۲۰۱۵ بعد خودمتشابه محاسبه شده با استفاده از روابط برای این روز برابر با ۱/۶۴ است که با توجه به دسته‌بندی بعد خودمتشابه انجام شده برای کلاس سه در سال ۲۰۱۵ در بازه $D > 1/34$ قرار دارد. با توجه به مطالب بیان شده مبرهن است که بین بعد خودمتشابه محاسبه شده و شکل سیگنال تابش هماهنگی بسیار مناسبی وجود دارد.

تجزیه و تحلیل سالانه

جهت انجام بررسی‌های دقیق‌تر طبقه‌بندی بعد خودمتشابه در دوره آماری مورد بررسی به صورت سالانه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین این نوسانات میانگین سالانه بعد

عدم دقت کافی در این مطالعه مورد استفاده قرار نگرفت. روش دیگر، روش آماری است که در ادامه به بررسی آن می‌پردازیم.

روش آماری

روش آماری براساس تابع توزیع تجمعی (CDF)، $F_X(x)$ می‌باشد. $F_X(x)$ توزیع احتمالی از مقادیر واقعی متغیر تصادفی X است. برای هر مقدار واقعی عدد x ، $CD \#(X)$ مقدار متغیر تصادفی X از مقادیر کمتر یا مساوی x تعیین می‌شود. بنابراین، تابع توزیع تجمعی $F_X(x)$ برای دو آستانه D بعد خودمتشابه به ترتیب مطابق با روابط (۱۰) و (۱۱) است.

$$D_1 = \frac{\max(F_x(x)) - \min(F_x(x))}{3} \quad (\text{رابطه } 10)$$

$$D_2 = \frac{2(\max(F_x(x)) - \min(F_x(x)))}{3} \quad (\text{رابطه } 11)$$

که در آن $\max(x)$ و $\min(x)$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار x می‌باشند.

نتایج و بحث

مقادیر حاصل از دو رابطه (۱۰) و (۱۱) همان آستانه‌های بعد خودمتشابه هستند که برای کلاس‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مقادیر برای هر سال در جدول (۱) آمده است. پس از تعیین بعد خودمتشابه تابش در هر روز طبقه‌بندی روزها براساس مقادیر آستانه بعد خودمتشابه ذکر شده در جدول (۱) برای هر سال آماری، انجام گرفت.

جدول ۱- آستانه‌های بعد خودمتشابه برای سال‌های آماری موجود

سالهای آماری	D_1	D_2
۲۰۱۴	۱/۲۴	۱/۴
۲۰۱۵	۱/۱۱	۱/۳۴
۲۰۱۶	۱/۲۱	۱/۳۷

مشاهده گردید که برخی از روزها با داشتن وضعیت متفاوت از نظر ابرناکی، دارای کلاس‌های یکسان بودند، برای رفع این مشکل از شاخص شفافیت آسمان K_T بعنوان معیار دوم در الگوریتم طبقه‌بندی استفاده شد. شکل (۱) نمونه‌ای از مقادیر تابش روزانه و بعد خودمتشابهی در سال‌های آماری موجود در ایستگاه مورد نظر را نشان می‌دهد. در این شکل سیگنال‌های روزانه تابش خورشیدی ثبت شده در بازه زمانی دو ثانیه‌ای نشان داده شده است. محور افقی نمودار زمان (بر حسب ساعت)،

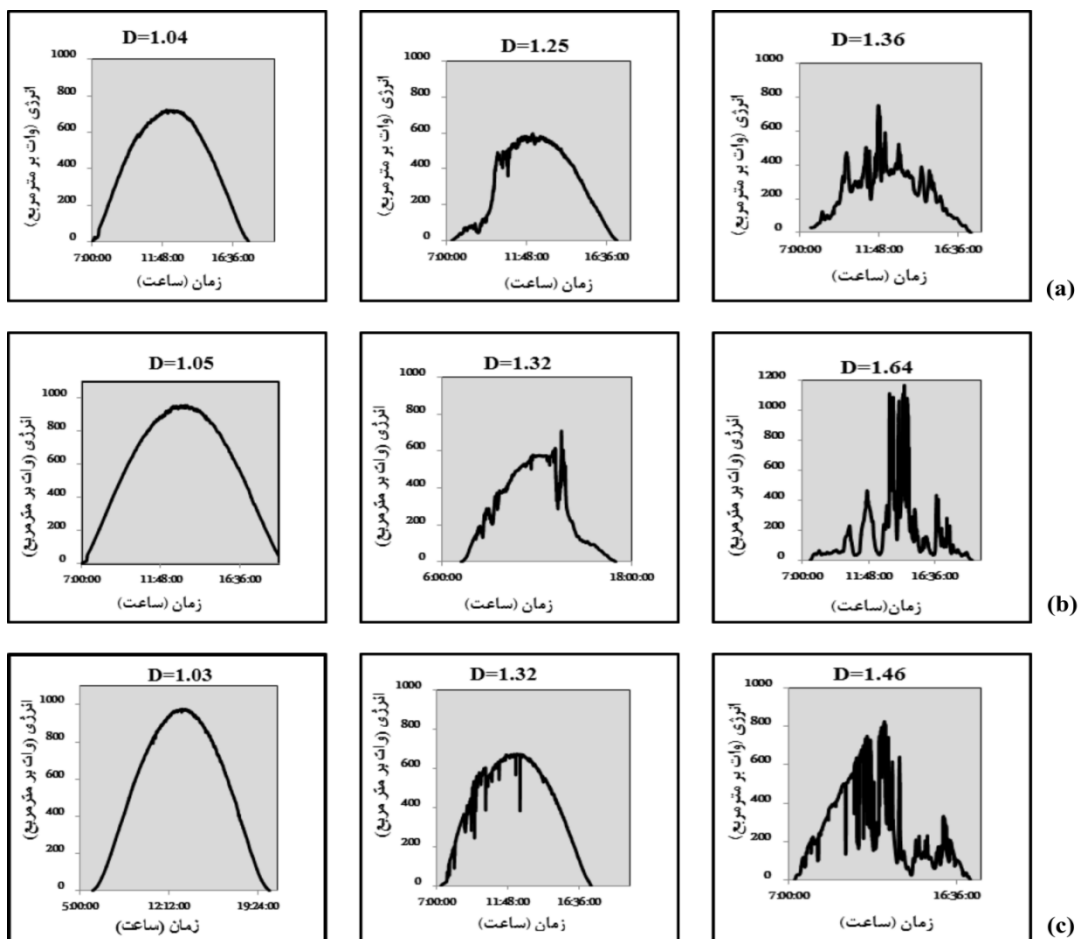
تجزیه و تحلیل میانگین ماهانه $\langle D \rangle$ امکان بررسی نوسانات تابش در ماه‌های مختلف را می‌دهد. ماه‌هایی که میانگین بعد خودمتشابه آن‌ها واقع در کلاس یک بود در گروه تابش منظم، ماه‌هایی که میانگین بعد خودمتشابه آن‌ها واقع در کلاس دو بود در گروه تابش اندکی نوسانی و ماه‌هایی که میانگین بعد خودمتشابه آن‌ها واقع در کلاس سه بود در گروه تابش نوسانی دسته‌بندی شدند. با توجه به شکل (۲) تابش در تمام دوره آماری نوسانی است، ماه آوریل در سال ۲۰۱۴، ماه مارس در سال ۲۰۱۵ و ماه ژوئیه در سال ۲۰۱۶ تابش خورشید دارای حداکثر نوسان است. همچنین در سایر ماه‌ها تابش خورشیدی نوسانی است و در هیچ یک از ماه‌ها تابش منظم مشاهده نگردید. این اطلاعات برای تنظیم اندازه سیستم‌های فتوولتائیک بسیار مفید و ضروری است. به کمک این اطلاعات می‌توان جهت بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتائیک و ذخیره انرژی در ماه‌هایی که میزان انرژی دریافتی تابش خورشیدی زیاد است برای ماه‌هایی که دریافت انرژی در آن‌ها پایین اما درخواست انرژی بالا می‌باشد برنامه‌ریزی جامع و مناسب انجام داد.

خودمتشابهی $\langle D \rangle$ و همچنین انحراف استاندارد σ محاسبه گردید که در جدول (۲) دسته‌بندی شده است. این مقادیر بیانگر آن است که در هر سه سال آماری تابش در ایستگاه مورد نظر دارای مقادیر نوسانی بوده و نوسانات مشابهی داشته است. با استفاده از مقادیر $\langle D \rangle$ می‌توان میزان نوسانات تابش خورشیدی را بررسی نمود.

جدول ۲- میانگین سالانه $\langle D \rangle$ و انحراف استاندارد σ برای بعد

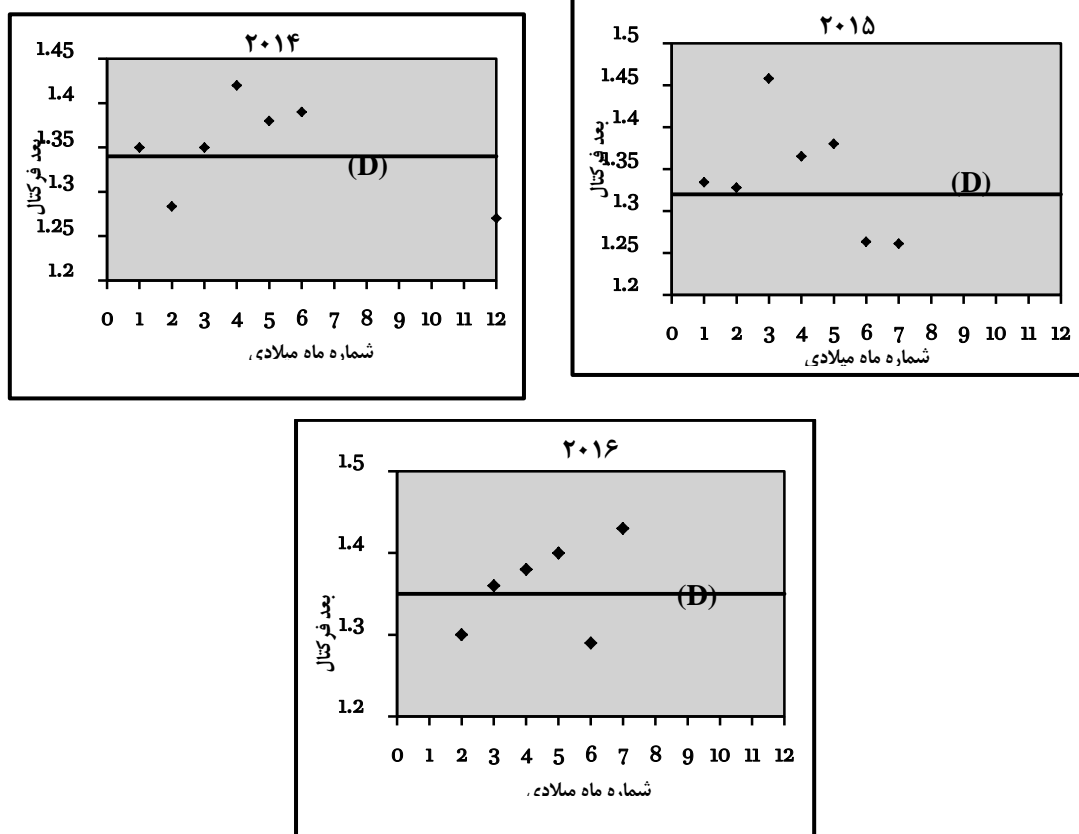
خودمتشابهی محاسبه شده		
سال	$\langle D \rangle$	$\sigma(\%)$
۲۰۱۴	۱/۳۴	۱۷/۸
۲۰۱۵	۱/۳۲	۱۹/۷
۲۰۱۶	۱/۳۶	۱۹/۸

شکل (۲) رژیم سالانه‌ی میانگین ماهانه D برای ایستگاه مطالعاتی را نشان می‌دهد. در این شکل برای ماه‌هایی که داده موجود بود میانگین بعد خودمتشابه محاسبه و در نمودار مقادیر میانگین بعد خودمتشابه این ماه‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمونه‌ای از شکل سیگنال‌های روزانه تابش و بعد خودمتشابه روزانه متناظر با آن‌ها، برای هر سه سال آماری موجود: اولین تصویر سمت چپ

کلاس یک، دومین تصویر کلاس دو و سومین تصویر کلاس سه. (a) ۲۰۱۴، (b) ۲۰۱۵، (c) ۲۰۱۶



شکل ۲- رژیم سالانه بعد خودمتشابه D ، خط توپر مستقیم نشانگر میانگین سالانه بعد خودمتشابهی D است.

خودمتشابهی $\langle D \rangle$ ، همچنین شاخص پاکی آسمان $\langle K_T \rangle$ و انحراف معیار $\sigma(D)$ و $\sigma(K_T)$ برای هر طبقه محاسبه شد. در جدول (۴) این محاسبات آمده است.

طبق جدول (۴) در هر سه سال انحراف معیار استاندارد $\langle D \rangle$ و $\langle K_T \rangle$ برای کلاس‌های یک و دو کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. انحراف کم داده‌های $\langle D \rangle$ و $\langle K_T \rangle$ از میانگین، نشان‌دهنده گروه‌بندی همگن روزهای مورد مطالعه با استفاده از روش طبقه‌بندی بکاررفته در این پژوهش می‌باشد. مقدار انحراف معیار $\langle D \rangle$ و $\langle K_T \rangle$ در مورد کلاس سه در هر سه سال بیش از ۱۰٪ می‌باشد، که به دلیل وجود روزهای بارانی که در آن سیگنال‌های تابش دارای شکل منظم و بعد خودمتشابهی نزدیک یک، می‌باشد، اما بعلت تاثیر شاخص شفافیت آسمان $\langle K_T \rangle$ در این طبقه‌بندی این روزها در دسته سه واقع شدند.

در جدول (۳) درصد توزیع احتمال تابش روزانه خورشید برای هر طبقه آمده است. با توجه به این جدول در هر سه سال آماری درصد وقوع کلاس سه بیشتر از دو کلاس دیگر است و نشان‌دهنده غالب بودن روزهای ابری در ایستگاه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین احتمال وقوع کلاس یک بیشتر از احتمال وقوع کلاس دو است که در مجموع نشان‌دهنده نوسانی بودن آب و هوای منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۳- توزیع احتمال وقوع هر یک از کلاس‌های تابش کل روزانه خورشید

سال	کلاس ۱ (%)	کلاس ۲ (%)	کلاس ۳ (%)
۲۰۱۴	۲۴/۰۹	۲۳/۳۶	۵۲/۵۵
۲۰۱۵	۲۸/۴	۱۹/۵۳	۵۲/۰۷
۲۰۱۶	۲۹/۶	۲۵/۶	۴۴/۸

به منظور اعتباربخشی نتایج طبقه‌بندی، میانگین بعد

جدول ۴- میانگین و انحراف استاندارد $\langle D \rangle$ و $\langle K_T \rangle$ برای هر طبقه‌بندی

	2014			2015			2016		
	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3
میانگین $\langle D \rangle$	۱/۱۲	۱/۳۴	۱/۴۶	۱/۰۷	۱/۲۶	۱/۴۹	۱/۱	۱/۳	۱/۵۴
میانگین $\langle K_T \rangle$	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۴۸	۰/۷۳	۰/۷	۰/۵۴	۰/۷۴	۰/۷	۰/۶
انحراف معیار $\langle D \rangle$	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۹
انحراف معیار $\langle K_T \rangle$	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۲

یافته‌ها و پیشنهادها

پژوهش حاضر به منظور کمی‌سازی و تعیین رفتار فرکتالی (خودمتشابهی) سری زمانی روزانه تابش انجام گرفت. نوسانات تابش خورشید ناشی از تغییر شرایط آب و هوایی به‌ویژه ابرناکی می‌تواند منجر به تغییرات انرژی دریافتی در سطح زمین و انرژی تولیدی توسط سیستم‌های فتوولتائیک و عدم پایداری بازده انرژی تولیدی آن‌ها شود. به همین دلیل لازم است به منظور آشنایی با رفتار سری‌های زمانی تابش در هر منطقه نوسانات داده‌های تابش خورشید کمی‌سازی شوند.

در این مطالعه به منظور بررسی شرایط منطقه مورد نظر در راستای بهره‌برداری بهینه از انرژی خورشیدی روشی جدید بر مبنای هندسه سیگنال‌های سری زمانی روزانه تابش ارائه شده است. این روش با آستانه‌های بعد خودمتشابهی (D) با استفاده از تابع توزیع تجمعی تعریف شده است. از سوی دیگر، امکان طبقه‌بندی روزانه تابش خورشید با استفاده از آستانه D به دست آمده از روش CDF نشان داده شد. بررسی‌ها با استفاده از داده‌های دو ثانیه‌ای تابش در بازه زمانی سالانه انجام گرفت و روزهای براساس آستانه‌های بعد فرکتال و شاخص شفافیت آسمان به سه کلاس طبقه‌بندی شدند. مهمترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

به‌منظور تعیین این نوسانات میانگین سالانه بعد خودمتشابهی (D) و همچنین انحراف استاندارد σ محاسبه گردید؛ این مقادیر بیانگر آن بود که در هر سه سال آماری تابش در ایستگاه مورد نظر نوسانات مشابهی داشته است.

در هر سه سال انحراف معیار استاندارد $\langle D \rangle$ و $\langle K_T \rangle$ برای کلاس‌های یک و دو کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. انحراف کم داده‌های $\langle D \rangle$ و $\langle K_T \rangle$ از میانگین، نشان‌دهنده گروه‌بندی همگن روزهای مورد مطالعه با استفاده از روش طبقه‌بندی بکاررفته در این پژوهش می‌باشد.

مقدار انحراف معیار $\langle D \rangle$ و $\langle K_T \rangle$ در مورد کلاس سه در هر سه سال بیش از ۱۰٪ می‌باشد، که به دلیل وجود روزهای بارانی که در آن سیگنال‌های تابش دارای شکل منظم و بعد خودمتشابهی نزدیک یک، می‌باشد، اما بعلاوه تاثیر شاخص ابرناکی $\langle K_T \rangle$ در این طبقه‌بندی این روزها در دسته سه واقع شدند.

مطالعه حاضر نشان‌داد تحلیل فرکتال (خودمتشابهی) به‌خوبی نمایانگر نوسانات تابش است. بر اساس تحلیل

خودمتشابهی روزها در سه تیپ براساس میزان تابش دریافتی تقسیم‌بندی شدند. در منطقه مورد مطالعه کلاس سه در هر سه سال آماری غالب بود و کلاس‌های یک و دو به ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند.

در این بخش از دیدگاه کاهش هزینه‌های اولیه ناشی از طراحی مناسب و ساخت سیستم‌های انرژی خورشیدی مناسب با آب و هوای ایستگاه حائز اهمیت است. با تکمیل بانک داده‌ها، از طریق این روش می‌توان به نتایج ارزنده‌ای در زمینه تحلیل کارایی سیستم‌های فتوولتائیک دست یافت. مدل‌سازی نوسانات تابش اجازه می‌دهد تا اپراتورهای سیستم نوسانات نیروی سیستم‌های فتوولتائیک را شبیه‌سازی کنند. بطور مثال Maafi and Harrouni (2003) با استفاده از شاخص خودمتشابه و طبقه‌بندی روزانه به بررسی عملکرد سیستم فتوولتائیک خودکار نصب شده در تهیفت در الجزایر پرداختند که تطابق خوبی بین شاخص‌های عملکرد بلند مدت و نمونه مورد مطالعه مورد در این پژوهش مشاهده شد.

موضوع پژوهش مبحثی نوین است که در این مطالعه با داده‌های حاصل از یک ایستگاه پایه با دقت بالا (دو ثانیه) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی و روش ارائه شده به‌عنوان دیدگاهی جدید در مطالعات تابش خورشید می‌تواند با مرور زمان و احداث ایستگاه‌های سنجش دقیق تابش خورشید در سایر مناطق کشور نیز بکار گرفته شود. امید است در کشوری مانند ایران که با توجه به قرار گرفتن آن در کمربند جنب حاره و دستیابی به مقادیر بالای انرژی خورشیدی، پتانسیل بهره‌برداری از چنین منبع عظیم انرژی را داراست شرایط لازم جهت مطالعات دقیق تابش از نظر تولید داده با دقت بالا از نظر زمانی و مکانی و همچنین امکان دستیابی به چنین داده‌هایی توسط محققین فراهم گردد.

با این حال امید می‌رود با توسعه و راه‌اندازی ایستگاه‌های تابش‌سنجی مجهز به ابزار دقیق در سراسر کشور شرایط جهت مطالعه منطقه‌ای این روش فراهم شود نتایج حاصل از این مطالعه نیازمند بررسی بیشتر جهت اعتبارسنجی و صحت‌سنجی بویژه بکارگیری این روش در مناطقی که شرایط آب و هوا در آن دارای تغییرات زیادی است، همچنین جهت مطالعات بیشتر توصیه می‌شود در ایستگاه مورد مطالعه داده‌های آماری کلیه فصول بویژه تابستان مورد بررسی قرار گرفته همچنین داده‌ها بصورت ماهانه و روزانه تجزیه و تحلیل شوند.

REFERENCES

- Aguiar, R.J., Collares-Pereira, M. and Conde, J.P., (1988). Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices. *Solar Energy*, 40(3), 269-279.
- Badescu, V. (2014). Modeling solar radiation at the earth surface. Springer. (pp. 29-54).
- Bartoli, B. Coluzzi, B. Cuomo, V. Francesca, M. Serio, S. (1981). Autocorrelation of daily global solarradiation. II Nuovo Cimento C. 4(2), 113–122.
- Bikhabi Arani, F. (2016). Classification of typical meteorological days using analysis of fractal dimension of solar radiation data. M.s. dissertation, Univrcity of Tehran. (In Farsi).
- Brinkworth, B. J. (1977). Autocorrelation and stochastic modelling of insolation sequences. *Solar Energy*, 19(4), 343-347.
- Dubuc, B. Quiniou, J.F. Roques-Carmes, C. Tricot, C. Zucker, S.W. (1989). Evaluating the fractal dimension of profiles. *Physical Review A*, 39(3), 1500.
- Guessoum, A., Boubkeur, S., and Maafi, A. (1998). A global irradiation model using radial basis function neural network. In World Renewable Energy Congress , 20 September, pp. 332-336
- Harrouni, S. (2008). Fractal classification of typical meteorological days from global solar irradiance: application to five sites of different climates. In Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface, 29-54. Springer Berlin Heidelberg.
- Harrouni, S. and Guessoum, A. (2009). Using fractal dimension to quantify long-range persistence in global solar radiation. *Journal of Chaos, Solitons and Fractals*, 41(3),1520-1530.
- Harrouni, S. and Maafi, A. (2002). Classification des éclairagements solaires à l'aide de l'analyse fractale. *Journal of Revue Internationale des énergies renouvelables*, (5), 107-122.
- Harrouni, S. Guessoum, A. and Maafi, A. (2005). Classification of daily solar irradiation by fractional analysis of 10-min-means of solar irradiance. *Journal of Theoretical and applied climatology*, 80(1), 27-36.
- Havlin, S. Buldyrev, S.V. Bunde, A. Goldberger, A.L. Ivanov, P.C. Peng, C.K. and Stanley, H.E. (1999). Scaling in nature: from DNA through heartbeats to weather. *Journal of Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 273(1), 46-69.
- Louche, A. Notton, G. Poggi, P. and Simonnot, G. (1991) Classification of direct irradiation days in view of energetic applications. *Journal of Solar energy*, 46(4), 255-259.
- Maafi, A. and Harrouni, S. (2003). Preliminary results of the fractal classification of daily solar irradiances. *Journal of Solar Energy*, 75(1),53-61.
- Maafi, A., (1998). Markov-Models in discrete time for solar radiation. In Proceedings of Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications (IMACS–IEEE), Nabeul-Hammamet (Tunisia). 1 Apr, pp. 319-322.
- Maragos, P. Sun, F.K. (1993) Measuring fractal dimension of signals: morphological covers and iterative optimisation. *Journal of IEEETrans. Signal Processing*, 39 (1), 108-121.
- Muselli, M. Poggi, P. Notton, G. and Louche, A. (2000). Classification of typical meteorological days from global irradiation records and comparison between two Mediterranean coastal sites in Corsica Island. *Journal of Energy Conversion and Management*, 41(10), 1043-1063.
- Noori, H., Mohammadi, B., Ghaffari, D. (2014). Investigation of the Relationship between Hamedan Air Types and atmospheric pollutants of nitrogen oxides during the event of dust phenomena. In: 3rd Iranian Conference on Natural Resources Research With the Emphasis on the Environment, 23Oct., Kurdistan Univercity, Kurdistan, Iran.
- Sfetsos, A. and Coonick, A.H. (2000). Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques. *Journal of Solar Energy*, 68(2), 169-178.