

بعد فرکتال شاخص‌های مؤثر بر عملکرد کلتورهای خورشیدی صفحه تخت

آرمینا سلیمانی^۱، علی ملکی^{۲*} و شاهین بشارتی^۳

چکیده

داده‌های تابش خورشید نقش مهمی در طراحی ساختمان داخلی سیستم‌های خورشیدی دارند. تابش خورشید با توجه به شرایط جوی و آسمان نوسانات زیادی دارد. تجزیه و تحلیل داده‌های تابش کمک زیادی به بهینه‌سازی سیستم‌های خورشیدی می‌کند. در این مقاله از روش‌های سویک، کاتز، ام‌آرال، پتروسین‌دی، پتروسین‌سی و هیگوچی برای تخمین بعد فرکتال تشعشع خورشید، دما و رطوبت هوا استفاده شده است. با نرم‌افزار متلب روش‌های ذکر شده کدنویسی و اطلاعات موردنظر، تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد اثر دما بر پایه تر در روش ام‌آرال در سطح ۱ درصد و اثر رطوبت نسبی در روش پتروسین‌سی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بودند. روش هیگوچی بیشترین و روش پتروسین کمترین مقدار میانگین بعد فرکتال را داشتند. همچنین مقدار بعد فرکتال در روش‌های پتروسین‌دی و پتروسین‌سی، در دوره‌های مختلف عددهای کوچک‌تر از یک بوده و با توجه به بعد فرکتال قابل قبول که مقداری بین یک تا دو است، لذا این روش‌ها قابل اعتماد نیستند. بنابراین روش‌های سویک و هیگوچی با توجه به عملکرد آن‌ها در دوره‌های مختلف، روش‌های پیشنهادی مناسبی برای پژوهش‌های مشابه هستند.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، بعد فرکتال، صفحه تخت، کلکتور.

ارجاع: سلیمانی آ. ملکی ع. و بشارتی ش. ۱۳۹۵. بعد فرکتال شاخص‌های مؤثر بر عملکرد کلتورهای خورشیدی صفحه تخت. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۵(۱): ۷-۱.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- مربی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: maleki_ali@iran.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۱

مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های جایگزین به دلیل کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و همچنین کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، گسترش یافته است. انرژی خورشید یکی از انرژی‌های پاک است که در صورت استفاده از آن به عنوان منبع کمکی گرمایش ساختمان‌ها، میزان زیادی از سوخت‌های فسیلی ذخیره خواهد شد (هیراساوا و همکاران، ۲۰۱۳).

مقدار انرژی که به سیاره زمین می‌رسد بسیار گسترده است، به طوری که می‌توان گفت دو برابر انرژی تولید شده از منابع تجدیدناپذیر ذغال سنگ، نفت، گاز و اورانیوم است (هرمان، ۲۰۰۶). انرژی خورشید منبع عظیمی از انرژی است که محدودیت ندارد، تمیز و بی‌خطر است. یکی از سیاست‌هایی که کشورهای توسعه یافته به ویژه در چند دهه اخیر به شدت دنبال کرده‌اند، سیاست جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر است. مهم‌ترین نوع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشید است که میزان تابش آن، فقط بر سطح ایران بیش از دو برابر انرژی مصرفی کل جهان است (ملکی و همکاران، ۱۳۹۲).

انرژی خورشید علاوه بر سازگاری با محیط‌زیست، در قسمت زیادی از سطح کره زمین یافت می‌شود و طیف وسیعی از کاربردها را مانند تهیه آب گرم برای مصارف شهری و روستایی، تهویه مطبوع ساختمان‌ها، خشک کردن محصولات کشاورزی، تولید برق نیروگاه‌ها با جمع‌کننده خورشیدی و غیره داراست (محمد، ۱۹۹۷).

قلب هر سیستم خورشیدی، کلتور است که وظیفه جذب تابش خورشید و تبدیل آن به گرما و انتقال گرمای ایجاد شده به سیال را بر عهده دارد (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۲). ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع کلتور خورشیدی، کلتور خورشیدی صفحه تخت است. کلتورها از نظر سیال انتقال دهنده گرما، به دو دسته تقسیم می‌شوند: کلتورهایی که هوا سیال انتقال دهنده گرما است و کلتورهایی که آب سیال انتقال دهنده گرما است. از جمله مشکلاتی که در سیال آب ایجاد می‌کند می‌توان به خوردگی مسیر عبور آب، نشت آب، یخ‌زدگی سیال و رسانایی صفحه جذب اشاره کرد. سیال هوا نیز مشکلات دیگری دارد از جمله پایین بودن ضریب انتقال گرما بین صفحه جذب و هوا و در نتیجه کاهش بازده گرمایی (زمانیان و زمردیان، ۱۳۹۲).

کلتورهای خورشیدی هوایی از نظر نوع پوشش به دو دسته تقسیم می‌شوند: کلتورهای بدون پوشش شیشه‌ای و کلتورهای دارای پوشش شیشه‌ای. کلتورهای بدون پوشش اتلاف حرارتی زیادی دارند و در دماهای پایین بازده مناسب‌تری خواهند داشت (اکچو کوو و نورتون، ۱۹۹۷).

به طور معمول از دو نوع جاذب در کلتورها استفاده می‌شود. جاذب‌های متخلخل و جاذب‌های غیرمتخلخل. در جاذب‌های غیرمتخلخل، لایه‌های زیرین هوا که از روی صفحه جذب عبور می‌کنند در طول مسیر با دیگر لایه‌های هوا در تماس بوده و دمای آن بالا می‌رود و انتقال حرارت به پوشش شیشه‌ای از طریق همرفت و تابشی افزایش می‌یابد. در نتیجه تلفات حرارتی افزایش یافته و کاهش راندمان حرارتی را به همراه خواهد داشت. با توجه به موارد ذکر شده، جاذب‌های غیرمتخلخل برای استفاده در جمع‌کننده‌های با جریان طبیعی مناسب هستند، زیرا افت فشار کمی ایجاد کرده و مانع حرکت سیال نمی‌شوند. در نوع متخلخل، هوای عبوری از جمع‌کننده، از میان خلل و فرج صفحه جذب عبور کرده و همین امر سبب افزایش انتقال حرارت بین جاذب و سیال می‌شود. همچنین به دلیل تماس هوای خنک روی صفحه جذب و عبور هوا تحت عامل مکش از خلل و فرج جاذب، سطح جاذب به طور معمول خنک بوده که این مهم سبب کاهش ضایعات حرارتی به طریقه تابش و جابجایی می‌شود. از دیگر مزایای صفحه جذب متخلخل نسبت به غیرمتخلخل این است که اتلاف انرژی حرارتی به محیط به دلیل نفوذ و جذب تاب خورشیدی در عمق صفحه جذب کمتر است (زمانیان و زمردیان، ۱۳۹۲).

داده‌های تابش خورشید نقش بسیار مهمی در طراحی ساختمان داخلی سیستم‌های خورشیدی دارند. تابش خورشید با توجه به شرایط جوی و آسمان نوسانات زیادی دارد. تجزیه و تحلیل داده‌های تابش کمک زیادی به بهینه‌سازی سیستم‌های خورشیدی می‌کند. یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌های سری زمانی از قبیل تابش خورشید، بعد فرکتال است.

فرکتال مفهومی است که نخستین بار توسط مندلبروت بیان شد. فرکتال بیان می‌کند که ساختارهای پیچیده دارای خاصیت خود متشابهی یا خود تکراری هستند. بعد فرکتال خط راست، یک است در حالیکه بعد فرکتال یک

هارونی (۲۰۱۰) با استفاده از روش فرکتالی، تغییرات سرعت باد را با روش مینکوسکی بولیگاند تخمین زد. در این مدل، منحنی مورد نظر برای تخمین بعد فرکتال، با استفاده از مستطیل‌هایی پوشش داده شد. شایان ذکر است نتایج این پژوهش نقش بسیار مهمی در ارزیابی نصب توربین‌های بادی داشت. در حقیقت نوسانات سرعت باد تخمین زده شده نقش مستقیمی بر عملکرد توربین‌های بادی داشت. هارونی و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از بعد فرکتال، نوسانات تابش خورشیدی را تعیین کردند. در این پژوهش، تابش خورشیدی در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. یکی از کاربردهای مدل مورد بررسی در این پژوهش، طبقه‌بندی تابش خورشید بر اساس زمان‌های مختلف- آسمان صاف، آسمان آبری، آسمان نیمه‌آبری- بود. بعد فرکتال با روش مینکوسکی بولیگاند تخمین زده شد. بعد فرکتال نزدیک به عدد ۱، آسمان صاف را مشخص می‌کرد و بعد فرکتال نزدیک به ۲، آسمان متغیر با ابرهای متناوب را بیان می‌کرد. بعد فرکتال مقدار انرژی تولید شده را تخمین نمی‌زند، بلکه درجه نوسانات تابش را اندازه‌گیری می‌کند. نتایج نشان داد که با استفاده از تجزیه و تحلیل فرکتال و نیز با داشتن تعداد محدودی داده، می‌توان تابش خورشید را طبقه‌بندی کرد. همچنین نتایج مربوط به بعد فرکتال هر ماه اطلاعات مختلفی در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهند از جمله اینکه شدت تابش در کدام ماه بیشتر یا کمتر بوده است، شدت تابش منظم بوده یا دچار نوسان بوده است. این اطلاعات به اصلاح اندازه سیستم‌های فتوولتائیک کمک زیادی می‌کند.

در این پژوهش برای دستیابی به راندمان بهینه کلکتورها، به بررسی نوسانات رطوبت نسبی، دمای هوا و میزان تشعشع خورشید در منطقه شهرکرد، با روش‌های فرکتالی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

اطلاعات ۹ ساله رطوبت نسبی، دما بر پایه خشک و دما بر پایه تر هر کدام در ۸ تکرار و میزان تشعشع خورشید در یک تکرار به صورت روزانه، از اداره هواشناسی تهیه شدند و داده‌ها با روش‌های محاسبه بعد فرکتال شامل سوپک، کاتز، ام‌آرال، پتروسین و هیگوچی تجزیه شدند. با نرم‌افزار متلب فرمول‌های محاسبه بعد فرکتال کدنویسی شدند و اطلاعات مورد نظر تجزیه و تحلیل شدند. سپس

خط پیچیده، نزدیک به دو است. مسیرهایی که دارای توابع ریاضی مشخصی نیستند بعد فرکتال قابل محاسبه ندارند بلکه باید تخمین زده شود (انگوهارد و همکاران، ۲۰۱۱).

بعد بعضی از پدیده‌ها به دلیل نامنظمی و ناهموازی، قابل توصیف با بعد توپولوژی و هندسه اقلیدسی نیست، مانند بعد سرعت جریان هوا و بعد تابش خورشید. مندلبروت-ریاضیدان معروف- بعد جدیدی را به نام بعد فرکتال ارائه داد که مشکل مذکور را حل می‌کرد. نام فرکتال از واژه لاتین فراکتوس آمده است و به معنی سنگ شکسته شده است. فرکتال‌ها اشیاء هندسی هستند که غالباً خودمتشابه‌اند. اگر جز کوچکی از یک شی فرکتال در نظر گرفته شود، با کل شکل همسانی دارد. فرکتال‌هایی نیز وجود دارند که خود متشابه نیستند ولی از آن‌ها در موارد زیادی استفاده می‌شود. در فرکتال‌های خود متشابه از بعد هاسدورف استفاده می‌شود. معادله بعد هاسدورف به صورت زیر است:

$$S^d = C \quad (1)$$

که در آن C تعداد شکل‌های خودمتشابه، S فاکتور بزرگ‌نمایی و d بعد هاسدورف است.

بعد فرکتال‌هایی که خود متشابه نیستند از روش‌های مختلف دیگری مانند روش جعبه شمارش محاسبه می‌شوند (شمس گوارا، ۲۰۱۲). بعد فرکتال یک سری زمانی، پیچیدگی یک سری را نشان می‌دهد. سری با پیچیدگی بیشتر بعد فرکتال بزرگ‌تری دارد (غلامی و همکاران، ۲۰۰۸).

بعد فرکتال شاخص جدیدی برای آنالیز و ارزیابی نوسانات جوی است که در کنار روش‌های قبلی مانند روش‌های رگرسیونی، روش شبکه عصبی و ... می‌تواند مفید باشد. عواملی چون رطوبت نسبی هوا، دمای هوا، میزان تشعشع خورشید، سرعت و جهت باد، ساعت‌های آفتابی و ... بر راندمان کلکتورها اثر دارد و از آنجایی که این عوامل بعد صحیحی ندارند، احتیاج به روشی است که بتواند پیچیدگی این عوامل را ارزیابی کند. با توجه به مطالب ذکر شده، یکی از روش‌های ارزیابی و تحلیل سری‌های زمانی و سیگنال‌ها، تخمین بعد فرکتال است و روش‌های مختلف بعد فرکتال یکی از شیوه‌های بررسی پیچیدگی عواملی است که بعد صحیحی ندارند.

سری‌های دوتایی تغییر علامت داده شده است (راقاوند و دات، ۲۰۱۰)

$$FD_{Petrosian} = \log_{10} n / (\log_{10} n + \log(n/(n+0.4N\Delta))) \quad (۸)$$

روش هیگوچی: در این روش مجموعه‌ای از سری‌های زمانی با فاصله‌های زمانی منظم (۹) در نظر گرفته می‌شود:

$$X(1), X(2), X(3), \dots, X(N) \quad (۹)$$

از سری داده شده، سری زمانی جدیدی (۱۰) تشکیل می‌شود:

$$\{X(m), X(m+k), X(m+2k), \dots, X(m+[(N-m)/k].k)\} \quad (۱۰)$$

که در آن k و m عددها صحیح هستند. m زمان اولیه و k فاصله‌های زمانی است؛ [] نشان دهنده جز صحیح است. سپس برای سری جدید، طول آن از طریق معادله (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$L(k) = \left\{ \sum_{i=1}^{[(N-m)/k]} \frac{X(m+ik) - X(m+(i-1)k)}{N-1} \right\} \quad (۱۱)$$

شیب نمودار لگاریتمی $L(k)$ بر حسب k برابر با بعد فرکتال سری است (نارایان پاترا و همکاران، ۱۹۹۵).

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای روش‌های کاتز، سویک، ام‌آرال، پتروسین‌دی، پتروسین‌سی و هیگوچی در جدول ۱ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر دما بر پایه تر در روش ام‌آرال در سطح ۱ درصد و اثر رطوبت نسبی در روش پتروسین‌سی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است و عامل‌ها در دیگر روش‌های تخمین بعد فرکتال بی‌تأثیر بوده‌اند.

میانگین بعد فرکتال ۶ روش در سه دوره متوالی تجزیه و تحلیل شد. همان‌طور که از شکل ۱ مشاهد می‌شود بیشترین مقدار میانگین بعد فرکتال مربوط به روش هیگوچی و کمترین مقدار مربوط به روش‌های پتروسین‌سی و دی است. مقدار بعد فرکتال مربوط به روش پتروسین در هر سه دوره کمتر از یک بوده و با توجه به مقدار قابل قبول بعد فرکتال سیگنال‌ها که مقداری بین ۱ و ۲ است، می‌توان نتیجه گرفت که روش پتروسین قابل اعتماد نیست (راقاوند و دات، ۲۰۱۰).

داده‌ها با نرم‌افزار آماری SPSS در قالب طرح کاملاً تصادفی آنالیز شدند و نتایج در ادامه بحث گزارش شد.

سویک: در این روش ابتدا داده‌ها نرمال‌سازی شده سپس با استفاده از معادلات (۲) و (۳) بعد فرکتال محاسبه شد (گو و همکاران، ۲۰۰۵ و نارایان پاترا و همکاران، ۱۹۹۵):

$$FD_{Sevcik} = 1 + ((\ln(L) + \ln(2))/\ln(2N')) \quad (۲)$$

$$L = \sum_{i=1}^{N-1} dist(si, si+1) \quad (۳)$$

که در آن N تعداد نقاط، $N-1 = N'$ و L طول سری زمانی است.

کاتز: در این روش بعد فرکتال از معادله (۴) محاسبه می‌شود:

$$FD_{katz} = \log_{10}(n) / (\log_{10}(n) + \log_{10}(d/L)) \quad (۴)$$

که در آن $L/a = n$ طول سری زمانی و a فاصله میانگین دو نقطه پشت سر هم است (گو و همکاران، ۲۰۰۵).

روش ام‌آرال: برای محاسبه بعد فرکتال در این روش با در نظر گرفتن سری زمانی (۵) مراحل زیر انجام می‌شود.

$$S = \{s(1), s(2), s(3), \dots, s(N)\} \quad (۵)$$

که هر $s(i)$ شامل یک مؤلفه افقی $x(i)$ و یک مؤلفه عمودی $y(i)$ است و $i=1, 2, 3, \dots, N$.

فاصله اقلیدسی میان دو نقطه $S(1)$ و $S(2)$ ، به مختصات (x_1, y_1) و (x_2, y_2) با توجه به معادله (۶) عبارت است از:

$$dist(s_1, s_2) = ((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)^{0.5} \quad (۶)$$

سپس طول کل منحنی در مقیاس‌های مختلف $(r_1, r_2, r_3, \dots, r_p)$ از معادله (۷) محاسبه می‌گردد:

$$L = \sum_{i=1}^{N-1} dist(si, si+1) \quad (۷)$$

شیب نمودار لگاریتمی $\frac{1}{r_p}$ بر حسب $\frac{L_r}{r}$ برابر با بعد

فرکتال است (راقاوند و دات، ۲۰۱۰).

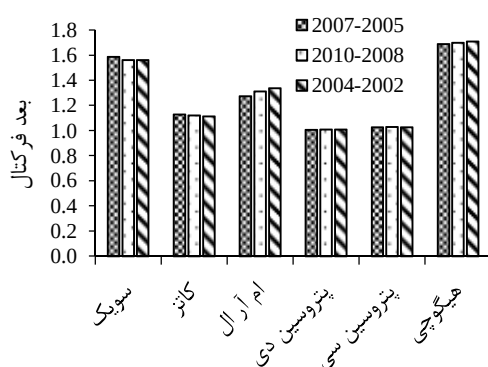
روش پتروسین: محاسبه سریع بعد فرکتال سیگنال‌ها با برگردان سری‌ها به دنباله‌های دوتایی از ویژگی‌های این روش است. مبنای ساخت دنباله در این روش تفریق مقادیر سیگنال از همدیگر است. در روش پتروسین‌سی اختلاف اعداد با علامت آن‌ها سنجیده می‌شود و در روش پتروسین‌دی اختلاف عددها با مقدار انحراف معیار آن‌ها سنجیده می‌شود. بعد فرکتال در این روش از معادله (۸) محاسبه خواهد شد که در آن n طول سری و $N\Delta$ تعداد

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس میانگین‌های عامل سال بر رطوبت، دما بر پایه خشک و تر در روش‌های مختلف محاسبه بعد فرکتال

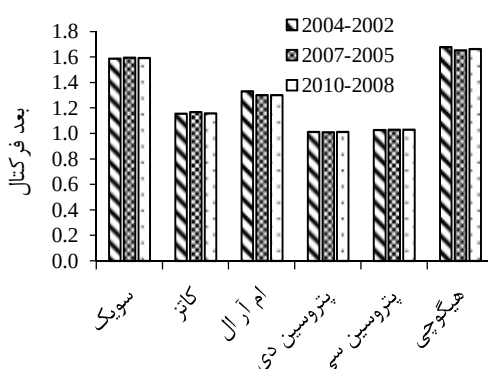
مجموع میانگین مربعات							درجه آزادی	
هیگوچی	پتروسین سی	پتروسین دی	ام آر آل	کاتز	سویک			
۰/۲ ^{NS}	۱/۷ ^{NS}	۰/۰۰۱ ^{NS}	۰/۰۰۰۹ ^{**}	۱ ^{NS}	۳ ^{NS}	دما بر پایه تر	۲	سال
۰/۳ ^{NS}	۰/۴۵ ^{NS}	۰/۰۰۱ ^{NS}	۰/۰۰۰۹۶ ^{NS}	۰/۰۵ ^{NS}	۰/۰۲ ^{NS}	دما بر پایه خشک		
۰/۱ ^{NS}	۰/۰۶ [*]	۰/۰۰۱۳ ^{NS}	۰/۰۰۰۹ ^{NS}	۰/۲ ^{NS}	۰/۰۰۷ ^{NS}	رطوبت نسبی		
۱۵/۱	۱۷/۷	۰/۰۳۶	۰/۰۰۰۰۸	۲/۹	۲/۷	دما بر پایه تر	۲۱	خطا
۰/۹	۰/۵	۰/۰۴	۰/۰۰۴۱	۲/۴	۱/۸	دما بر پایه خشک		
۰/۹	۰/۲	۰/۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۹	۰/۴	رطوبت نسبی		

* تفاوت معنی‌داری در سطح ۱ درصد، ** تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد و ^{NS} عدم تفاوت معنی‌داری

میانگین بعد فرکتال دمای هوا بر پایه تر و بر پایه خشک نشان می‌دهد که روش هیگوچی بیشترین مقدار و روش‌های پتروسین سی و دی دارای کمترین مقدار میانگین بعد فرکتال است (شکل‌های ۳ و ۴).

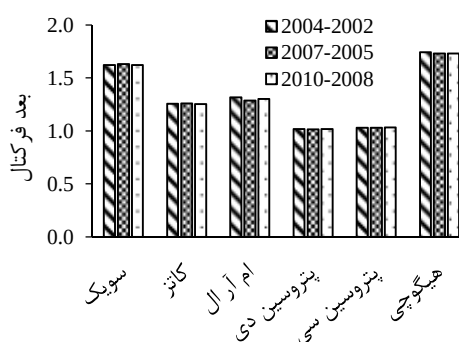


شکل ۳- میانگین‌های بعد فرکتال دمای هوا بر پایه تر



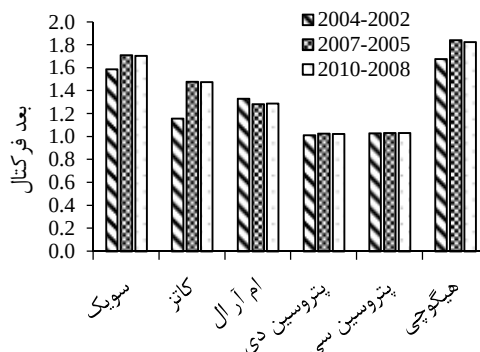
شکل ۴- میانگین‌های بعد فرکتال دما بر پایه خشک

شکل ۵ میانگین بعد فرکتال دمای هوا بر پایه تر و خشک و رطوبت نسبی را نشان می‌دهد، با توجه به شکل بعد فرکتال رطوبت نسبی در همه روش‌ها به جز روش ام آر آل

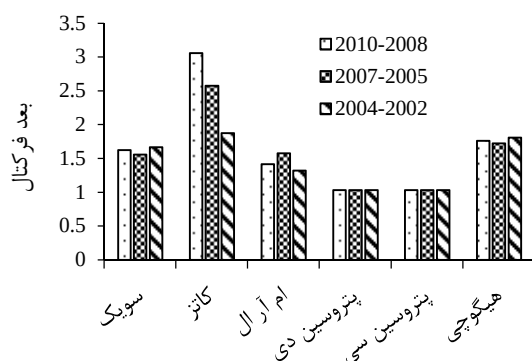


شکل ۱- میانگین‌های بعد فرکتال روش‌های مختلف

همچنین با توجه به شکل ۱ مقدار میانگین روش‌های ام آر آل و کاتز تقریباً مساوی است. در شکل ۲ میانگین بعد فرکتال رطوبت نسبی نیز بیشترین مقدار مربوط به روش‌های هیگوچی و کمترین مقدار مربوط به روش پتروسین دی و سی است. بنابراین با توجه به شکل نوسانات روش کاتز، هیگوچی و سویک بیشتر از دیگر روش‌ها است.



شکل ۲- میانگین‌های بعد فرکتال رطوبت نسبی در سه دوره



شکل ۶- میانگین‌های بعد فرکتال میزان تشعشع خورشید
روش‌های مختلف محاسبه بعد فرکتال در سه دوره متوالی

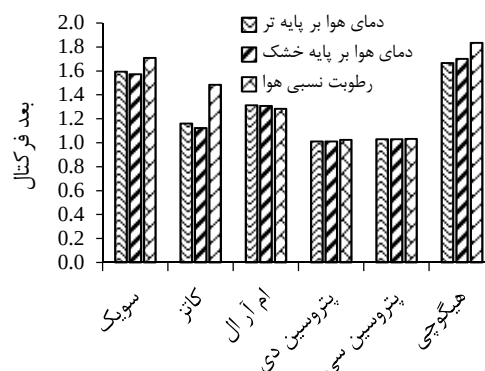
نتیجه‌گیری

با توجه به تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، مقدار بعد فرکتال روش پتروسین، اندکی کمتر از یک است، بنابراین با توجه به تعریف بعد فرکتال و مقادیر آن در سری‌های مختلف (۱ تا ۲) می‌توان نتیجه گرفت این روش برای ارزیابی نوسانات جوی مناسب نیست.

روش کاتز نیز بر مبنای پژوهش‌های انجام شده از اعتبار کمتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است، که از نتایج به دست آمده در این مقاله نیز کارایی پایین‌تر آن مشهود است.

روش‌های هیگوچی و سوپک بر خلاف روش ام‌آرال، در دوره‌های مختلف اختلاف معنی‌داری را نشان ندادند، و بدان معنی است که در دوره‌های مختلف تفاوت زیادی نداشته است. بنابراین با توجه به بررسی منابع و روش‌های مختلف ارزیابی شرایط جوی، این دو روش قابل اعتماد هستند و پیشنهاد می‌شود مبنایی برای پژوهش‌های آینده قرار گیرند.

بیشتر از بعد فرکتال دما بر پایه تر و خشک است و این بیانگر آن است که پیچیدگی نرخ تغییرات رطوبت بیشتر از دو متغیر دما بر پایه خشک و تر است. از طرفی میانگین این بعد فرکتال در روش هیگوچی بیشتر از سایر روش‌هاست.



شکل ۵- میانگین‌های بعد فرکتال دمای هوای بر پایه تر،
خشک و رطوبت نسبی

داده‌های سه دوره زمانی میزان تشعشع خورشید با استفاده از شکل بعد فرکتال در روش کاتز دارای نوسانات بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها است. نوسانات در روش ام‌آرال و سوپک به طور تقریبی به یک میزان است و روش‌های پتروسین دی و سی بدون نوسان بوده‌اند و روش هیگوچی نیز دارای نوسانات بسیار کم است. بیشترین بعد فرکتال در روش کاتز و در دوره سوم بوده است (شکل ۶).

منابع

۱. قاسمی ا.، رنجبر ع. و رامیار ا. ۱۳۹۲. بررسی عددی اثر نانو سیال آلومینیوم- آب بر عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی. مجله نانو مواد. ۱۴(۵): ۱۰۷-۱۰۰.
۲. زمانیان م. و زمردیان ع. ۱۳۹۲. بررسی اثر تخلخل جاذب مشبک بر کارایی هوا گرم‌کن خورشیدی با پوشش پله‌ای شیشه‌ای. مجله مهندسی بیوسیستم ایران. ۴۴(۲): ۱۱۸-۱۱۳.
۳. ملکی ع.، رحیمی ر. و بشارتی ش. ۱۳۹۲. تأثیر ابعاد کلکتور خورشیدی صفحه تخت بر عملکرد آن به روش دینامیک سیالات محاسباتی. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون. ۱۱ تا ۱۹ بهمن‌ماه. دانشگاه فردوسی مشهد.

4. Enguehard R. Devillers R. and Hoeber O. 2011. Revisualization of fishing vessel movement patterns using hybrid fractal/ velocity signatures. Available on: www.geomatikhamburg.de. 1-2.

5. Ekechukwu O. V. and Norton B. 1999. Review of solar- energy drying system III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications, *Energy Conversion and Management*. 6: 657-667.
6. Gholamy A. Javaherian A. and Ghods A. 2008. Automatic detection of interfering seismic wavelets using fractal methods. *Journal of Geophysics and Engineering*. 5: 338-347.
7. Goh C. Hamadicharef B. Henderson GT and Ifeakor EC. 2005. Comparison of fractal dimension algorithms for the computation of EEG biomarkers for Dementia. 2nd International Conference on Computational Intelligence in Medicine and Healthcare (CIMED2005).464-471.
8. Harrouni S. 2010. Fractal analysis to quantify wind speed fluctuation. Available on: www.nsc10.cankaya.edu.tr. 29-54
9. Harrouni S. Guessoum A. and Maafi A. 2005. Classification of daily solar irradiation by fractional analysis of 10-min- means of solar irradiance. 80: 27-36.
10. Hermann W. A. 2006. Quantifying global energy resources. *Energy*. 31(12): 1685-1702.
11. Hirasawa Sh. Tsubota R. Kawanami T. and Shirai K. 2013. Reduction of heat loss from solar thermal collector by diminishing natural convection with high- porosity porous medium. *Solar Energy*. 97: 305-313.
12. Mohamad A. 1997. High efficiency solar air heater. *Solar energy*. 60(2): 71-76.
13. Narayan Patra S. Bhattacharya G. Ghosh K. and Raychaudhuri P. 1995. Fractal dimension analysis of the solar irradiance data from earth radiation budget satellite. Available on: www.researchgate.net. 1-6.
14. Raghavendra B. S. and Dutt D. Narayana. 2010. Computing fractal dimension of signals using multiresolution box-counting method. *International Journal of Information and Mathematical Sciences* 6:50-65.
15. Shamsgovara A. 2012. Analytic and numerical of fractal dimension. MS. Thesis. Department of mathematics royal institute of technology, KTH.1- 47.