بررسی وجود آشوب در جریان رود در مقیاس‌های زمانی گوناگون

محمود رضا شقاقیان*[1] و ناصر طالب بیدختی[2]

تاریخ دریافت:۸۷/۵/۱۲ تاریخ پذیرش:۸۸/۲/۱۵

چکیده

ممکن است گاهی اوقات برای بررسی تأثیر جریان در انتقال نقطه‌ای ته نشست ها، یا انتقال آنی آلودگی ها، مجبور به استفاده از تغییرات جریان در مقیاس ثانیه‌ای باشیم. در مقابل، ممکن است گاهی برای برخی طراحی ها نیاز به بررسی جریان در مقیاس صد سال و یا بیش تر داشته باشیم. شناسایی ویژگی های مشترک در مقیاس های گوناگون زمانی و مکانی در رودخانه‌ها یکی از چالش های مهم آبشناسی در سال های اخیر بوده است. از آنجا که متغیرهای زیادی بر این پدیده اثر می‌گذارند، از این رو اغلب نگرشی تصادفی به این پدیده بوده و بیش تر مطالعات به این سمت هدایت شده‌اند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با بکارگیری تحلیل های معین غیرخطی و آشوبی پویا می‌توان به گونه ی تقریبی جریان رود را حاصل از یک گروه فرایند محدود غالب فرض نمود. با صرفنظر کردن از دیدگاه اخیر، این مطالعه سعی در بررسی رفتار فرایند جریان رود در مقیاس های زمانی گوناگون داشته و با تحلیل جریان رود آنکوپاگر در چهار مقیاس ۱۵ دقیقه‌ای، ساعتی، روزانه و هفتگی به بررسی مقیاس زمانی در رفتار فرایند رود مزبور پرداخته است. در این جا برای مقایسه ی رفتار رود در مقیاس های گوناگون از شاخص بعد همبستگی استفاده شده است. تحلیل های انجام گرفته نشان می‌دهند که جریان در مقیاس های زمانی کوچک (۱۵ دقیقه‌ای) رفتاری کاملا آشوبی، در مقیاس‌های زمانی بزرگ (هفتگی) رفتاری کاملاً تصادفی و در مقیاس های میانی رفتاری بین این دو از خود نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مقیاس زمانی، جریان رود، رفتار تصادفی و آشوبی و بعد همبستگی

[1] – دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات فارس
[2] - دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه شیراز
*نویسنده ی مسؤول مقاله shaghaghian@gmail.com

پیشگفتار

با آگاهی از ماهیت حقیقی فرایند جریان رود در مقیاس های گوناگون زمانی و مکانی، می‌توان توانایی پیش‌بینی جریان رود را در مقیاس های گوناگون تعیین، وجود روابط بین این پدیده را در مقیاس های متفاوت مطالعه و چارچوب یا شبیهی مناسب را برای انتقال داده‌ها بین مقیاس های گوناگون تبیین کرد. مسأله دیگری که در مهندسی رودخانه افزون بر پیش‌بینی داده‌ها در مقیاسی معین با توجه به داده های موجود در همان مقیاس مهم بنظر می‌رسد، انتقال داده‌ها از یک مقیاس به مقیاس دیگر است، بدین معنی که در مقیاس‌گذاری زمانی داده‌ها از مقیاس های بزرگ تر به مقیاس های کوچک تر شکسته شوند. برای مثال، در این مورد می‌توان به پیش‌بینی رواناب سطحی روزانه در یک رودخانه، از روی داده‌های رواناب سطحی سالانه اشاره کرد. در مقیاس گذاری مکانی نیز با بزرگنمایی و کوچکنمایی، می‌توان داده‌ها را در مقیاس های گوناگون مکانی مورد بررسی قرار داد.

در واقع، فرض اساسی در انتقال داده‌ها از یک مقیاس به مقیاس دیگر، وجود وابستگی بین ویژگی های مربوط به فرایند جریان در این مقیاس ها می‌باشد. از سوی دیگر، در صورتی که این ویژگی ها مستقل از مقیاس مشاهده و اندازه‌گیری داده‌ها درنظر گرفته شوند، به آن ها ویژگی های "مستقل از مقیاس" گفته می‌شود. نوع روابط مقیاس‌گذاری، عموماً به رفتار فرایند در مقیاس های گوناگون مورد نظر بستگی دارد.

یکی از فرضیه های مهم در مطالعات بسیاری که تاکنون برای بررسی احتمال وجود مقیاس‌گذاری داده‌های مشاهده شده ی جریان رودها انجام گرفته است، وجود روابط تصادفی بین ویژگی های مرتبط با فرایند در مقیاس های گوناگون می‌باشد از این رو، مطالعات مزبور اغلب بیانگر یک چارچوب تصادفی می باشند. روی هم رفته، می‌توان این مطالعات را به دو دسته تقسیم کرد. دسته ی نخست دربرگیرنده ی مطالعاتی است که تنها از یک بعد فراکتال برای توصیف پدیده استفاده نموده‌اند که در اصطلاح به نام روش های "*تک مقیاسی*" شناخته می‌شوند. مطالعات مندلبرات و والیز (۱۹۶۸ و ۱۹۶۹) و رادسیوسکی و کوندسویچ (۱۹۹۷) در این گروه جای دارند. در دسته ی دوم، پدیده با بیش از یک بعد فراکتال یا یک تابع بعد توصیف شده است که این روش ها اغلب به نام روش های "*چند مقیاسی*" شناخته می‌شوند. مطالعات شرتسر و لاوجی(۱۹۸۷ و ۱۹۹۰) و پاندی و همکاران (۱۹۹۸) نیز جزء این دسته بشمارمی‌آیند.

تاکنون فرض بر آن بوده که در فرایند جریان رود درگذر از مقیاس های متفاوت، ویژگی ها در هر مقیاس نیز رفتار تصادفی از خود نشان می‌دهد. به بیان دیگر، جریان رود دارای درجه ی آزادی بالایی بوده و در نتیجه، تغییرات کوچک در شرایط اولیه تأثیرات ناچیز و قابل صرفنظری در عملکرد نهایی ایجاد می‌کند. با وجود این که پیشرفت های شایان توجهی در استفاده از فرضیه های تصادفی در توصیف فرایند جریان رود و انتقال داده‌ها از یک مقیاس به مقیاس دیگر انجام پذیرفته است، در این جا به بیان مختصر انگاره ی آشوب متعین[1] می‌پردازیم.

انگاره ی آشوب دو اصل مهم را در بر می گیرد: نخست آن که رفتارهای بسیار نامنظم یک فرایند (مانند جریان رود) می‌تواند ناشی از یک سامانه ی ساده معین شامل تنها شمار اندکی متغیرهای غیرخطی مستقل غالب بوده و دوم آن که بی نظمی های ناچیز اولیه به صورت نمایی رشد می کنند. این مفاهیم نه تنها می‌توانند برای تمام فرایندهای جریان کاربرد داشته باشند، بلکه شبیه هایی بسیار مناسب را نیز برای توصیف این فرایندها ارایه می‌دهند. پژوهش های سال های گذشته در مورد بکارگیری انگاره ی آشوب در جریان ها این ادعا را تقویت کرده و به وجود رفتارهای معین کم بعد در فرایند جریان، امکان پیش‌بینی های دقیق جریان های رود را با استفاده از روش های معین غیر خطی و برتری این روش ها نسبت به شیوه‌های مبتنی بر نانظمی اشاره دارند. از این جمله می‌توان به پژوهش های جایاواردنا و لای (۱۹۹۴)، اشتلیک (۱۹۹۹)، سیواکومار و همکاران (۲۰۰۱ و ۲۰۰۲) و لیزی و ویلی (۲۰۰۲) اشاره کرد.

با درک احتمال وجود رفتارهای آشوبی در فرایند جریان های رود، بسیاری از پژوهشگران به بکارگیری این مفهوم در زمینه‌های گوناگون مربوط به این فرایند ترغیب شده‌اند. برای مثال می‌توان به مسایل مربوط به توصیف و

[1]- deterministic chaos theory

پیش‌بینی (مانند مطالعات سیواکومار و همکاران (۲۰۰۱ و ۲۰۰۲))، کاهش نوسان ها (مانند مطالعات جایاواردنا و گرونگ (۲۰۰۰)) و تخمین داده‌های از دست داده شده (مانند مطالعات الشورباگی و همکاران (۲۰۰۱)) اشاره کرد. با وجود تعداد رو به افزایش مطالعاتی این چنین و اعمال آن بر مسایل جریان های رودهای متعدد تاکنون بحث در مورد زمان‌بندی به ندرت صورت پذیرفته است. این مقاله سعی دارد با استفاده از شبیه آشوب پویا به بررسی فرایند جریان های رود در مقیاس های گوناگون زمانی بپردازد.

برای بررسی وابستگی مقیاس های گوناگون زمانی، به عنوان گام نخست، داده‌های موجود جریان یک رود در ایالات متحده در چهار مقیاس زمانی گوناگون از مقیاس ۱۵ دقیقه‌ای تا هفتگی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای مشاهده ی وجود یا عدم وابستگی، رفتار ویژه ای از جریان رود در این مقیاس ها تحلیل و مورد مقایسه قرار گرفته است. برای مثال، در صورتی که جریان رودی در این مقیاس های زمانی رفتار آشوبی (یا تصادفی) از خود نشان دهد، آنگاه می‌توان رابطه ی بین مقیاس های گوناگون زمانی و مکانی را نیز آشوبناک یا تصادفی تصور کرد. در این جا برای مقایسه رفتار رود در مقیاس های گوناگون از شاخص بُعد همبستگی که به وسیله ی گراسبرگر و پروکاشیا (۱۹۸۳) ارایه گردیده، استفاده شده است.

روش بعد همبستگی

الگوریتم بعد همبستگی گراسبرگر-پروکاشیا با استفاده از مفهوم فضای تحول[1] به بیان پویایی یک سامانه از روی گروه زمانی وابسته به آن می پردازد. با استفاده از گروه زمانی تک متغیره X_i، که در آن i مقادیر ۱ تا N را اخذ می‌کند، می‌توان با روش اعمال تأخیر یک فضای تحول چندبعدی را مطابق زیر بنا کرد:

$$Y_j = (X_j, X_{j+\tau}, X_{j+2\tau}, \ldots, X_{j+(m-1)\tau}) \quad (۱)$$

که در آن j مقادیر ۱ تا $N-(m-1)\tau/\Delta t$ را اخذ کرده، m بعد بردار Y_j بوده، τ زمان تأخیر و Δt دقت زمان اندازه‌گیری می‌باشند. برای یک فضای تحول m بعدی تابع همبستگی به شرح زیر می‌باشد(استلبک ۱۹۹۹).

$$C(r) = \lim_{N\to\infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{\substack{i,j \\ (1\le i<j\le N)}} H\left(r - \left|Y_i - Y_j\right|\right) \quad (۲)$$

که در آن H تابع گام هویساید می‌باشد. برای $u>0$، مقدار $H(u)$ برابر با ۱ و برای $u\leq 0$ مقدار $H(u)$ برابر با صفر خواهد شد که در این رابطه $u = r - |Y_i - Y_j|$ و r شعاع کره‌ای به مرکز Y_i یا Y_j است. اگر گروه زمانی ذکر شده بتواند به وسیله ی یک جاذب[2] توصیف شود، آنگاه تابع همبستگی $C(r)$ و شعاع r مطابق رابطه ی زیر به هم مربوط می شوند:

$$C(r) \approx \alpha r^{\nu} \quad (۳)$$

که در این رابطه α ضریب و ν نمای همبستگی است. وجود یا نبود آشوب در گروه زمانی با استفاده از رسم ν در مقابل m بدست می‌آید. در صورتی که ν پس از مقدار مشخصی از m به مقداری ثابت رسیده (در اصطلاح اشباع شود) و درجه ی اشباع آن نیز پایین باشد، فرض بر این است که سامانه به طور عمومی رفتار آشوبی از خود نشان می‌دهد. در این حالت، درجه ی اشباع ν به عنوان بعد همبستگی (d) شناخته می‌شود. از سوی دیگر، در صورتی که ν بدون هیچ محدودیتی افزایش یابد، سامانه تحت بررسی به عنوان یک سامانه ی تصادفی منظور می گردد.

تحلیل داده‌ها و بحث

محل و داده‌های مورد مطالعه- در این مطالعه داده‌های جریان ایستگاه آبسنجی واقع در رود آنکوپاگر[3] در کلنا، ایالت کولورادو ایالت متحده ی آمریکا مورد بررسی قرار گرفته است. این ایستگاه در طول جغرافیایی ″۴۶ ′۴۴ °۱۰۷ و عرض جغرافیایی ″۵۳ ′۱۹ °۳۸ واقع است. مساحت حوضه ی آبخیز مربوط به این ایستگاه ۱۱۴۷ کیلومتر مربع می‌باشد. این داده‌ها با مقیاس زمانی حداقل ۱۵ دقیقه قرائت شده و در این پژوهش برای مقیاس ۱۵ دقیقه‌ای یک بازه ی یک ماهه، برای مقیاس ۱ ساعتی یک بازه ی چهار ماهه، برای مقیاس روزانه یک بازه ی هشت

[1]- phase-space

[2]- attractor

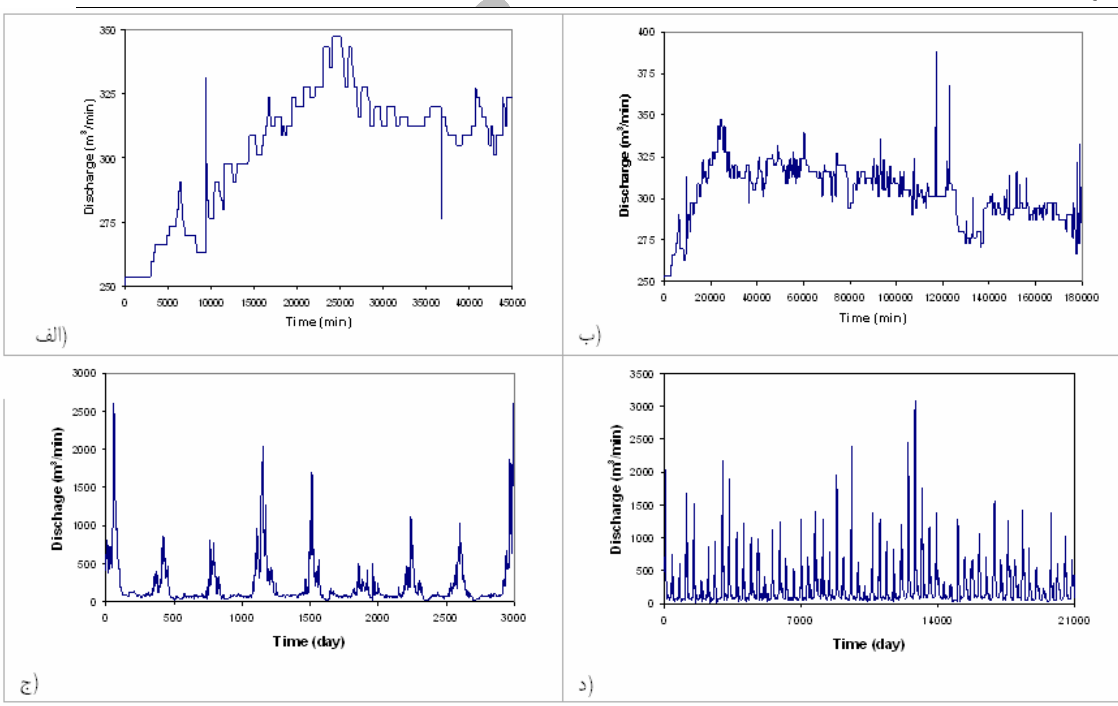
[3]- Uncompahgre River at Colona, Co., USA

ساله و برای مقیاس هفتگی یک بازه ی ۵۷ ساله درنظر گرفته شده است. خلاصه‌ای از ویژگی های آماری داده‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارایه شده است. در ضمن، شکل های ۱-الف تا ۱-د نیز گروههای زمانی مربوط به داده‌های مورد استفاده را برای چهار مقیاس زمانی مورد استفاده (۱۵ دقیقه‌ای، ساعتی، روزانه و هفتگی) نشان می‌دهند.

ترسیم فضای تحول- نخستین گام در تخمین و تفسیر بعد همبستگی ترسیم فضای تحول است. این نمودار به راحتی می‌تواند تکامل یک گروه زمانی را نشان داده و در صورت وجود، مناطق جاذب را مشخص کند. شکل های ۲-الف تا ۲-د فضای تحول را برای گروههای زمانی داده شده در مقیاس های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای، ساعتی، روزانه و هفتگی نشان می دهند. این نمودارها در یک فضای دو بعدی (m=۲) و با قرار دادن زمان تأخیر معادل زمان نمونه‌گیری ($\tau=\Delta t$) رسم شده‌اند. همان گونه که ملاحظه می شود، در مقیاس ۱۵ دقیقه‌ای و ۱ ساعتی جاذبی بنظر نمی زسد، در حالی که فضای جاذب در مقیاس روزانه نسبت به فضای جاذب در مقیاس زمانی یک هفته‌ای، مساحتی کم تر را اشغال کرده است.

جدول ۱: آمار مربوط به داده‌های مورد استفاده برای مقیاس های ۱۵ دقیقه‌ای، ۱ ساعتی، روزانه و هفتگی در رود آنکوپاگر.

	۱۵ دقیقه	۱ ساعت	روزانه	هفتگی
تعداد داده‌ها	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
میانگین (m^3/min)	۳۰۴/۱	۳۰۳/۱	۳۵۸/۴	۴۲۲/۴
انحراف معیار (m^3/min)	۲۴/۴	۱۷/۴	۳۵۷/۳	۵۱۵/۰
مقدار بیشینه (m^3/min)	۳۴۷/۲	۳۸۷/۸	۲۶۱۸/۰	۵۲۵۳/۰
مقدار کمینه (m^3/min)	۲۴۹/۹	۲۵۲/۴	۴۹/۳	۲۸/۹



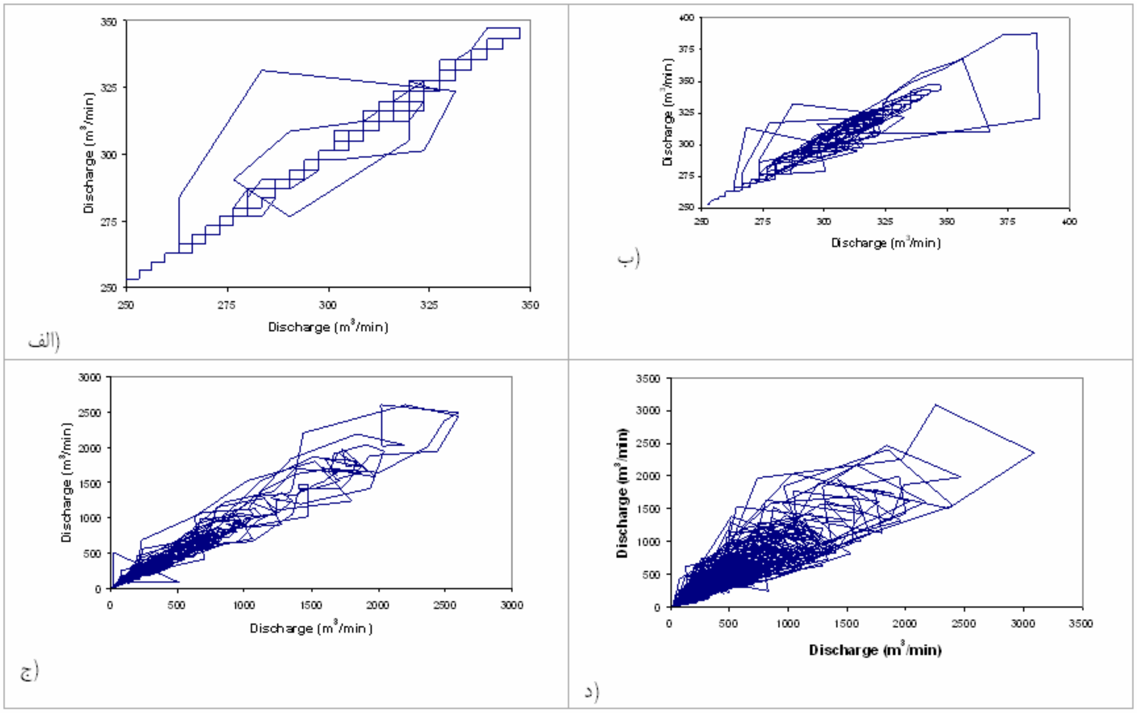
شکل ۱: گروههای زمانی برای داده‌های مربوط به رود آنکوپاگر در مقیاس های زمانی الف) ۱۵ دقیقه‌ای، ب) ۱ ساعتی، ج) روزانه و د) هفتگی.

محاسبه ی تابع همبستگی و بعد همبستگی- با استفاده از فضای تحول بدست آمده با ابعاد گوناگون برای گروههای زمانی، می‌توان به راحتی تابع همبستگی و شیب تابع همبستگی را در فضای لگاریتمی (۷) محاسبه کرد. تابع همبستگی برای داده‌های گروه زمانی جریان رود آنکوپاگر در مقیاس ها و ابعاد گوناگون در شکل های ۳-الف تا ۳-د نشان داده شده اند. همان گونه که در این شکل ها ملاحظه می‌شود، به راحتی می‌توان ناحیه ای معین را در هر مقیاس برای تعیین نمای تابع مشخص کرد. شکل ۴ نیز ارتباط بین توان تابع همبستگی و بعد را برای هر چهار گروه زمانی نشان می‌دهد.

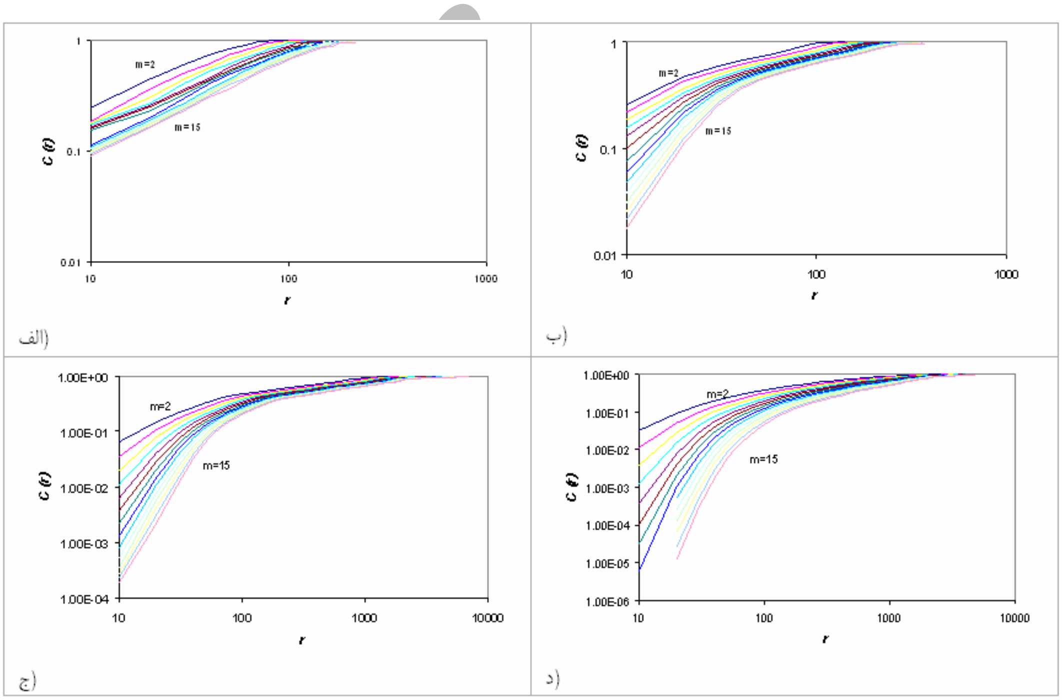
بحث درمورد داده‌ها- نتایج بدست آمده از تحلیل همبستگی داده‌های مرتبط با جریان عبوری از رود آنکوپاگر نشان‌دهنده ی حالت های گوناگون برای شبیه سازی پویای جریان در مقیاس های مختلف است. همان گونه که ملاحظه می شود، گذر از مقیاس ها، رفتار جریان را از یک حالت آشوبی با توانایی شبیه‌سازی شدن با شبیه های معین شامل متغیرهای محدود برای مقیاس های کوچک تر (مثلا ۱۵ دقیقه‌ای) به حالت کاملاً تصادفی، پیچیده و نامعین برای مقیاس های بزرگ تر (مقیاس هفتگی) تبدیل می‌نماید. به بیان دیگر، در مقیاس های خرد زمانی، با تنها در نظر گرفتن تعداد بسیار معدودی متغیر می‌توان رفتار را به خوبی با یک الگوی نسبتاً ساده شبیه‌سازی کرد. بر عکس، عامل های متعددی همچون شرایط اقلیمی، مساحت حوضه ی آبخیز مربوطه، نحوه ی جمع‌آوری داده‌ها، نوع کاربری اراضی و غیره می‌بایست در شبیه سازی جریان رود در مقیاس های بزرگ تر مورد استفاده قرار گیرند که تعدد این عامل ها باعث نا معین شدن شبیه بکار رفته و در نتیجه رفتار تصادفی می‌گردد.

نتیجه گیری

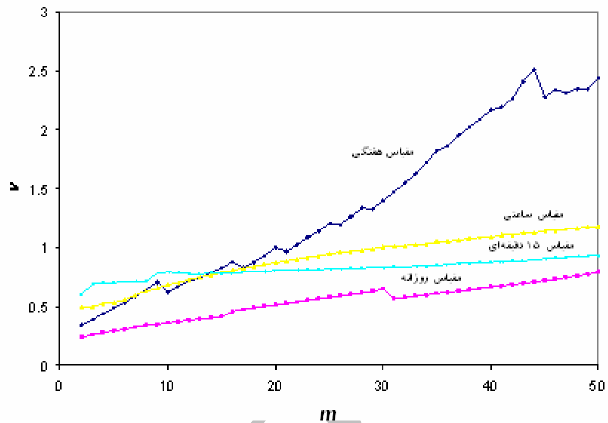
در این مقاله سعی شده است تا رفتار جریان رود (آشوبی یا تصادفی) در مقیاس های گوناگون مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، داده‌های جریان عبوری از رود آنکوپاگر در مقیاس های گوناگون مورد استفاده قرار گرفته و برای تشخیص رفتار آشوبی در مقابل رفتار تصادفی از فراسنجی به نام بعد همبستگی استفاده شده است. تحلیل های انجام شده نشان می‌دهند که در مقیاس های زمانی کوچک (۱۵ دقیقه‌ای، ساعتی و تا حدی روزانه) رفتار جریان به صورت آشوبی بوده در حالی که در مقیاس های زمانی بزرگ تر (هفتگی) جریان رفتار کاملاً تصادفی را از خود نشان می‌دهد. این مسأله به احتمال زیاد به خاطر تعدد فراوان فراسنج های مؤثر بر پدیده در مقیاس های بزرگ تر نسبت به مقیاس های کوچک‌تر می‌باشد.



شکل ۲: نمودار فضای تحول برای داده‌های مربوط به رود آنکوپاگر در مقیاس های زمانی الف) ۱۵ دقیقه‌ای، ب) ۱ ساعتی، ج) روزانه و د) هفتگی.



شکل ۳: توابع همبستگی برای داده‌های مربوط به رود آنکوپاگر در مقیاس های زمانی الف) ۱۵ دقیقه‌ای، ب) ۱ ساعتی، ج) روزانه و د) هفتگی.



شکل ۴: منحنی تغییرات توان تابع همبستگی با بعد.

منابع

1- Elshorbagy, A, Panu U.S. and Simonovic, S.P., 2001, Analysis of cross-correlated chaotic streamflows. Hydrol Sci. J. 46: 781-794

2- Grassberger, P. Procaccia, I., 1983, Measuring the strangeness of strange attractors . Physica D 9: 189-208.

3- Jayawardena, A.W, Lai, F. 1994. Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series. J. Hydrol. 153: 23-52.

4- Jayawardena , A.W., Gurung , A.B. 2000 Noise reduction and prediction of hydrometeorological time series: Dynamical system approach vs. stochastic approach. J. Hydrol. 228: 242-264.

5- Lisi F. , Villi ، V. 2002 Chaotic forecasting of discharge time series: A case study ، J. Am. Water Resour. Assoc. 37: 271-279.

6- Lovejoy, S., Schertzer, D. 1990. Multifractals , universality classes and satellite and radar measurements of clouds and rain fields . J. Geophys. Res. 95(D3): 2021-2034.

7- Mandelbrot , B.B. Wallis, J.R. 1968 Noah, Joseph and operational hydrology. Water Resour. Res. 4: 909-918.

8- Mandelbrot, B.B., Wallis, J.R. 1969. Some long run properties of geophysical records. Water Resour. Res. 5: 321-340.

9- Pandey, G., Lovejoy S., Schertzer, D. 1998. Multifractal analysis of daily river flows including extremes for basins of five to two million square kilometers, one day to 75 years. J. Hydrol. 208: 62-81.

10- Radziejewsky, M., Kundzewicz, Z. 1997. Fractal analysis of flow of the River Warta. J. Hydrol. 200, 280-294.

11- Schertzer, D., Lovejoy, S. 1987, Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative process. J. Geophys. Res. 92(D8): 9693-9714.

12- Regonda S.K., Sivakumar ، B., Jain, A. Temporal scaling in river flow, can it be chaotic? Hrdrol. Sciences 49: 373-385.

13- Sivakumar, B., Berndtsson ، R., Persson ، M. 2001. Monthly runoff prediction using phase space reconstruction . Hydrol. Sci. J. 46: 377-378.

14- Sivakumar, B., Persson, M., Berndtsson ، R. Uvo, C. B. 2002 , Is correlation dimension a reliable indicator of low-dimensional chaos in short hydrological time series Water Resour. Res. 38: 10.1029/2001WR000333.

15- Stehlik, J. 1999 , Deterministic chaos in runoff series. J. Hydrol. Hydromech. 47: 271-287.