



## استفاده از شاخص سیستم‌های دینامیک غیرخطی برای طبقه‌بندی هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز

هادی دل افروز<sup>۱</sup>، عباس قاهری<sup>۲</sup>، محمد علی قربانی<sup>۳</sup> و محمد حسن فاضلی‌فرد<sup>۴</sup>

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشیار، دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، (نویسنده مسوول: mhfazelifard@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۱۶

### چکیده

یکی از چالش‌های پیش روی هیدرولوژیست‌ها یافتن یک روش مناسب برای طبقه‌بندی هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز است. یک روش طبقه‌بندی مناسب می‌تواند در بسیاری از شاخه‌های علم هیدرولوژی مانند مدل‌سازی مؤثر واقع گردد. با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن فرآیندهای هیدرولوژیکی، استفاده از نظریه آشوب که قادر به شناسایی رفتار سیستم‌های پیچیده می‌باشد، در طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز از سوی برخی محققین مطرح شده است. در این تحقیق امکان استفاده از این مفهوم در طبقه‌بندی ۶۰ حوزه آبخیز کشور ایران (با استفاده از داده‌های روزانه رواناب) مورد بررسی قرار گرفته و از بعد محاط سیستم‌های دینامیکی شاخصی برای طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان براساس معیار بعد محاط، ایستگاه‌ها را به گروه‌هایی با بعد زیاد (احتمالاتی)، بعد کم (قطعی - احتمالاتی) و بعد کم (قطعی) طبقه‌بندی نمود. نتایج حاکی از آن است که هر چند نوعی شباهت و هموزنی در برخی نواحی و اقلیم‌ها قابل مشاهده است، اما با توجه به محدوده مکانی یک حوزه آبخیز نمی‌توان نسبت به تعلق آن حوزه به یک گروه خاص اظهار نظر کرد و بعد محاط می‌تواند معیاری برای طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز، نظریه آشوب، بعد محاط، مدل‌های هیدرولوژیکی، کشور ایران

### مقدمه

یکی از موضوعات و نیازهای اساسی در علم هیدرولوژی یافتن چارچوبی برای طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز است که می‌تواند در حل بسیاری از چالش‌های پیشرو این علم مؤثر و مفید واقع شود (۱، ۶، ۹، ۱۰، ۲۱). در دو دهه اخیر تلاش‌هایی در برای ایجاد یک چارچوب طبقه‌بندی حوزه آبخیز با هدف دسته‌بندی حوزه‌ها در گروه‌ها و زیرگروه‌ها انجام شده است، اما این تلاش‌ها در ابتدای مسیر است و هنوز تلاش‌ها برای ارایه یک چارچوب طبقه‌بندی مورد توافق ادامه دارد (۱۵).

رویکردهای طبقه‌بندی به کار برده شده در هیدرولوژی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود: رویکرد قیاسی<sup>۱</sup> که مبتنی بر بررسی بوده و قیاس شباهت‌های فیزیکی، هیدرولوژیکی و اقلیم حوزه آبخیز قرار دارد و روش استنتاجی<sup>۲</sup> که به بررسی خصوصیات سری زمانی رواناب (پاسخ سیستم)، که از مشخصات منحصر به فرد هر سیستم دینامیکی نظیر فرآیندهای هیدرولوژیکی هستند و نتیجه تأثیر کلیه اجزای یک سیستم بر متغیرهای ورودی بوده، می‌پردازد (۸). روش‌های موجود در دسته دوم را نیز می‌توان به دو گروه تقسیم نمود:

I گروه اول: در این گروه طبقه‌بندی با استفاده از روش‌های آماری و بر اساس معیارهایی نظیر بزرگی، فراوانی، فاصله زمانی رخدادها و نرخ تغییرات رژیم جریان صورت می‌گیرد، برای نمونه می‌توان به مطالعات راتو و سرینیواس (۹)، بجانرو و همکاران (۱) و مونک و همکاران (۷) اشاره نمود.

II گروه دوم: در این دیدگاه طبقه بندی بر اساس تعیین الگوی سیستم دینامیکی و میزان پیچیدگی سری‌های زمانی و بر پایه روش‌های غیرخطی استوار گردیده است. زاپو و همکاران (۲۳) با استفاده از آنالیز طیفی موجک که می‌تواند خصوصیات طیفی سری‌های زمانی را مشخص نماید، اقدام به بررسی خصوصیات مختلف رواناب روزانه تعدادی از ایستگاه‌های استرالیا با دوره‌های زمانی مختلف نمودند. آن‌ها این حوزه‌های استرالیا را در ۱۲ دسته طبقه‌بندی نمودند. کراسوسکیا (۵) از مفاهیم انتروپی در طبقه‌بندی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی در منطقه اسکاندیناوی استفاده نمود. سن (۱۲) استفاده از معیار LZC را در طبقه‌بندی ایستگاه‌های رواناب پیشنهاد نمود و این معیار را برای داده‌های ماهانه تعدادی از ایستگاه‌های انگلستان به کار برد. با معرفی و گسترش مفهوم تئوری آشوب<sup>۳</sup> و بازسازی فضای حالت

1- Deductive approach

2- Inductive approach

3- Chaos Theory

است. بدین منظور از داده‌های روزانه رواناب، ۶۰ ایستگاه مختلف با شرایط آب و هوایی متفاوت در سراسر ایران استفاده شده است.

### مواد و روش‌ها

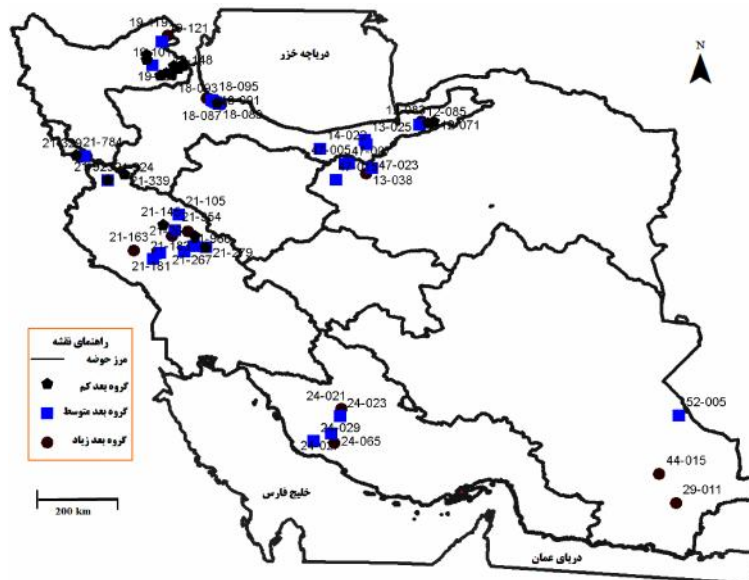
#### محدوده مورد مطالعه

در این مطالعه از داده‌های روزانه ۶۰ ایستگاه هیدرومتری کشور ایران استفاده شده است (شکل ۱). این ایستگاه‌ها به نحوی انتخاب شده‌اند که حتی‌الامکان تنوع اقلیم‌ها و آب و هوایی حوزه‌های آبخیز در ایران را در بر گیرند.

مساحت سطح زهکش ایستگاه‌ها از میزان ۸ کیلومتر مربع در ایستگاه ویلادرق تا ۳۶۵۰۰ کیلومتر مربع (ایستگاه قنطره در استان بوشهر) متغیر است. ویژگی‌های آمار ثبت شده رواناب به شدت متنوع بوده، به طوری که ماز سوی جریان از مقدار ۰/۰۷ مترمکعب بر ثانیه (ایستگاه ویلادرق) تا ۴۸/۳۳ متر مکعب بر ثانیه در ایستگاه پل دختر-کشکان تغییر می‌نماید. در جدول ۱ برخی از ویژگی‌های ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی آورده شده است.

در هیدرولوژی و تشابه فرضیات این تئوری و پدیده‌های هیدرولوژیکی خصوصاً پدیده بارش-رواناب، برخی محققین پیشنهاد استفاده از این تئوری را در بحث طبقه‌بندی مطرح نمودند. سیواکومار (۱۳) چارچوبی را برای طبقه‌بندی با استفاده از سطح پیچیدگی سیستم هیدرولوژیکی (تعیین شده با ابزار غیر خطی، از قبیل روش بعد همبستگی و بعد محاط) به صورت نماینده فرآیندهای غالب سیستم، پیشنهاد نمود. سیواکومار و همکاران (۱۶) کارایی بازسازی فضای حالت در شناسایی میزان پیچیدگی را بر روی دو سری زمانی مصنوعی داده‌ها بیان نمودند. سیواکومار و سینگ (۱۵) با استفاده از معیار بعد همبستگی<sup>۱</sup> (D<sub>2</sub>)، تعدادی از ایستگاه‌های غرب آمریکا را طبقه‌بندی کردند. آن‌ها بدین منظور از داده‌های ماهانه رواناب ایستگاه‌ها استفاده و امکان استفاده از بعد محاط در طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز را به مطالعات آتی موکول نمودند.

در این مطالعه تلاش گردیده امکان استفاده از مفاهیم تئوری آشوب و معیار بعد محاط برای طبقه‌بندی رواناب خروجی حوزه آبخیز در مقیاس زمانی روزانه مورد بررسی قرار گیرد. بنا به دانش نویسندگان امکان استفاده از این معیار تاکنون بررسی نگردیده



شکل ۱- نقشه شکل پراکنده ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی.

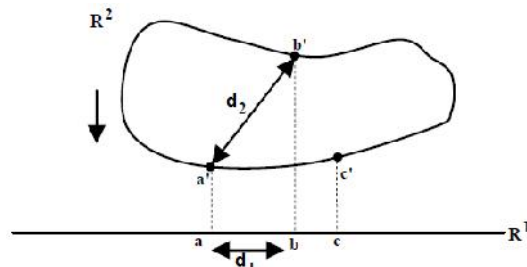
تکنیک متداولی که از سوی تاکن (۲۰) ارایه شده است، از روش زمان تاخیر برای نگاشتن یک سری زمانی واحد در یک فضای M بعدی (بعد محاط) استفاده می‌کند. برای بازسازی بردار فضای حالت Y با زمان تاخیر در فضای حالت m بعدی داریم:

$$Y_t = [x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-(m-1)}] \quad (1) \text{ رابطه}$$

### بازسازی فضای حالت

مفهوم فضای حالت، ابزار سودمندی برای مطالعه سیستم‌های دینامیک می‌باشد. مطابق این مفهوم، یک سیستم دینامیک را می‌توان از سوی نمودار فضای حالت با در نظر گرفتن تمامی متغیرهای مؤثر شرایط سیستم، در هر لحظه توصیف نمود، به طوری که هر نقطه بیانگر رفتار سیستم در زمان مشخص می‌باشد.

در شکل ۲ مفهوم روش همسایه کاذب نمایش داده شده است. بر این اساس نقطه  $b$  کم‌ترین فاصله ( $d_1$ ) را از نقطه  $a$  در فضای  $R$  دارد. اما با افزایش بعد و انتقال سیستم به فضای  $R_2$ ، این دو نقطه دیگر همسایه محسوب نمی‌شوند و فاصله نقطه  $b'$  از  $a'$  ( $d_2$ ) زیاد می‌گردد ( $d_2 \gg d_1$ ) بنابراین نقطه  $b$  به دلیل بازسازی سیستم دینامیکی در فضایی با بعد ناکافی در همسایگی  $a$  قرار گرفته است. از این رو  $b$  همسایه واقعی  $a$  نبوده، بلکه همسایه کاذب  $a$  می‌باشد.



شکل ۲- نمایش تصویر جاذب یک سیستم در فضای  $R_1$  و  $R_2$ .

برای تقریب زمان تأخیر ( $\tau$ ) معمولاً از دو روش میانگین اطلاعات متقابل<sup>۱</sup> (AMI) و تابع خودهمبستگی<sup>۲</sup> (ACF) استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش AMI استفاده شده است. در این روش زمان رخ دادن اولین کمینه در تابع میانگین اطلاعات متقابل مناسب زمان تأخیر است (۳).

#### بعد محاط

ابعاد یک سری زمانی، نمایشی از تعداد متغیرهای مورد نیاز برای بازسازی فضای حالت در یک سیستم دینامیکی می‌باشد. روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب یکی از روش‌های متداول برای محاسبه بعد سری زمانی ( $M$ ) است (۳).

صورت گرفته باشد، در این صورت با رفتن از بعد  $m$  به  $m+1$ ، این همسایه‌های کاذب از همسایگی بردار  $Y_i(t)$  دور می‌گردند و فاصله خواهند گرفت. با افزایش بعد  $m$  به  $m+1$ ، مؤلفه‌های اضافه شده به بردارهای تأخیر  $Y_i(t)$  و  $Y_r^{NN}(t)$ ، به ترتیب  $x(t - m\tau)$  و  $x(t_r - m\tau)$  خواهند بود بنابراین فاصله بین دو بردار در فضای  $m+1$  بعدی بطور مشابه به صورت رابطه ۴ است:

$$R_{m+1}^2 = R_m^2 + [y(t - m\tau) - y(t_r - m\tau)]^2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

بنابراین، فاصله اضافه شده در فضای  $m+1$  بعدی را نسبت به فاصله دو بردار در فضای  $m$  بعدی بصورت رابطه ۵ خواهد بود.

$$\sqrt{\frac{R_{m+1}^2 - R_m^2}{R_m^2}} = \frac{|y(t - m\tau) - y(t_r - m\tau)|}{R_m} \quad \text{رابطه (۵)}$$

هرگاه کمیتی که ذکرش گذشت، از یک مقدار آستانه (حدود ۱۵-۱۰) فراتر برود، همسایه تحت بررسی کاذب در نظر گرفته می‌شود (۲۲). لازم به ذکر است که تعیین میزان افزایش بعد محاط نزدیک‌ترین همسایه که در آن نزدیک‌ترین همسایه کاذب است، مرحله کلیدی در روش محاسبه نزدیک‌ترین همسایه کاذب می‌باشد (۴، ۱۰).

بنابراین، یک نقطه همسایه واقعی نقطه دیگر محسوب می‌شود اگر با افزایش بعد، فاصله بین آن‌ها تفاوت زیادی ننماید. در این روش بررسی می‌گردد که چه موقع انقطاع کاذب در نمودار فضای حالت، که از تصویر نمودن جاذب در یک فضا با بعد پایین ناشی شده است، متوقف می‌گردد. در این روش ابتدا با در نظر گرفتن  $m$  مؤلفه برای هر بردار تأخیر، می‌توان بردارهای تأخیر  $Y_i(t)$  را مطابق رابطه ۱ در فضای حالت بازسازی نمود.  $r$  امین همسایه هر بردار تأخیر  $Y_i(t)$  به صورت رابطه ۲ است:

$$Y_r^{NN}(t) = [x(t_r), x(t_r - \tau), \dots, x(t_r - (m-1)\tau)] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$r = 1, 2, \dots, 5$$

و فاصله بین دو بردار همسایه به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$R_m^2 = \sum_{i=0}^{m-1} [x(t - i\tau) - x(t_r - i\tau)]^2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

اگر بردار  $Y_r^{NN}(t)$  یک همسایه واقعی برای بردار  $Y_i(t)$  باشد این همسایگی نشأت گرفته از ماهیت دینامیکی سیستم است ولی اگر این همسایگی در اثر تصویر از یک فضای با بعد بالاتر به فضایی با بعد پایین

## نتایج و بحث آنالیز داده‌ها

برای محاسبه بعد محاط پس از بازسازی فضای حالت ( $T=1$ ) مقدار زمان تاخیر در هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه و تعیین گردیده است.

نظر به اهمیت تعیین مقدار زمان تاخیر و بعد محاط در طبقه‌بندی سری‌های زمانی، در این مرحله دقت لازم در انجام محاسبات صورت گرفته و مواردی مانند تعداد داده‌ها، نوع داده‌ها، در انتخاب زمان تاخیر مورد توجه قرار گرفته است (۱۸، ۱۷، ۱۴، ۱۱، ۳) که به برای اختصار از بحث در این موارد خودداری شده است.

برای شناسایی مراحل، چگونگی انجام محاسبات در دو ایستگاه تنگ‌آسیاب و گیلانده به نمایندگی از سایر ایستگاه‌ها در ادامه و نتایج در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش آورده شده است.

در شکل‌های ۳- الف و ۴- الف نمودار بازسازی حالت برای این دو ایستگاه با زمان تاخیر  $=1$  در فضای دو بعدی ترسیم شده است.

برای محاسبه زمان تاخیر مناسب، مقادیر ماز سوی اطلاعات متقابل در مقابل زمان تاخیر ترسیم گردیده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۳- ب و ۴- ب نمایش داده شده است، اولین کمینه موضعی، زمان تأخیر مناسب برای بازسازی فضای حالت انتخاب شده است. برای محاسبه بعد محاط، درصد همسایگی کاذب در مقابل افزایش بعد محاط ترسیم گردیده است. همان‌طور که در شکل ۳- ج (ایستگاه تنگ‌آسیاب) مشخص است نمودار هیچ‌گاه به مقدار صفر نمی‌رسد، اما با افزایش بعد محاط نمودار در مقدار ۱۳ ضمن رسیدن به یک کمینه موضعی روند کاهشی میزان نقاط همسایگی کاذب، آهنگ ملایم‌تری به خود می‌گیرد و شیب تغییرات کاهش می‌یابد؛ بنابراین، این نقطه بعد بهینه برای این ایستگاه در نظر گرفته می‌شود.

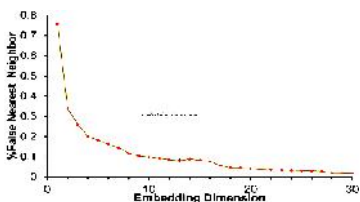
در ایستگاه گیلانده (شکل ۴- ج) میزان همسایگی کاذب در مقدار ۷ به کمترین مقدار خود رسیده و پس

از این مقدار درصد همسایگی افزایش می‌یابد بنابراین در این ایستگاه نیز مقدار ۷ بعد محاط تعیین شده است. به عبارتی تعداد هفت متغیر برای بازسازی رفتار دینامیکی این سیستم مناسب است. مقدار نسبتاً زیاد بعد محاط در ایستگاه تنگ‌آسیاب نشان می‌دهد که این ایستگاه خصوصیات رفتار احتمالاتی را دارا است در حالی که در ایستگاه گیلانده رفتار سیستم به سیستم‌های قطعی و معین نزدیک‌تر می‌باشد.

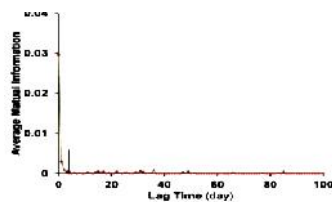
با بررسی وضعیت این دو ایستگاه می‌توان دریافت که محاسبه پارامتر بعد محاط توانسته است، خصوصیات سیستم‌های دینامیکی را در این دو ایستگاه روشن سازد و این پارامتر توانسته است بین سیستم‌های احتمالاتی و قطعی تمیز قائل شود. بعد محاط محاسبه شده در سایر ایستگاه‌ها در جدول ۲ گزارش شده است.

### تعیین حدود گروه‌ها

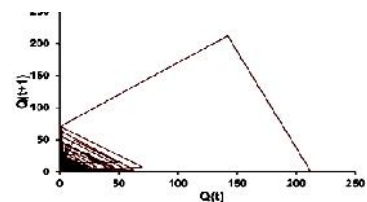
همان‌گونه که در جدول ۱ آورده شده بعد محاط ایستگاه‌ها از مقدار خیلی کم ( $M=4$ ) در ایستگاه جملی-شویتا مقدار خیلی زیاد در ایستگاه آفرینه-چولپول تغییر می‌نماید. با بررسی نتایج مشاهده می‌گردد ایستگاه‌های نظیر سرباز و چاف رود هرچند دارای بعد محاط یکسانی هستند اما این دو ایستگاه متعلق به دو اقلیم متفاوت (به ترتیب در استان سیستان و بلوچستان و گیلان) می‌باشند. این موضوع برای ایستگاه‌های دیگر مانند دامن و نوخاله نیز اتفاق می‌افتد. از طرفی دو ایستگاه اکبرداود و قره‌سو در استان اردبیل و در یک منطقه جغرافیایی و آب و هوایی و در فاصله نسبتاً کمی از یکدیگر واقع شده‌اند. به‌رغم نزدیکی و تشابه اقلیمی در این دو ایستگاه، مقادیر بعد محاط کاملاً متفاوت می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که نزدیکی مکانی دو ایستگاه نشانه و دلیلی بر تشابه رفتار دو ایستگاه و یا حوزه نیست و دو ایستگاه می‌توانند در عین دوری و دارا بودن اقلیم متفاوت رفتاری یکسان از خود نشان دهند و برعکس.



ج) نحوه تعیین بعد محاط

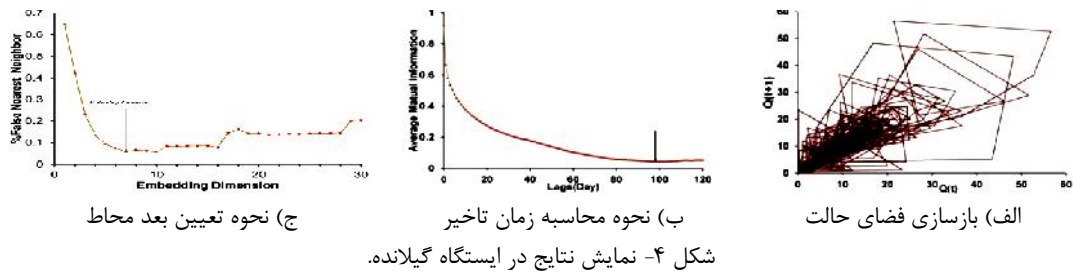


ب) نحوه محاسبه زمان تاخیر



الف) بازسازی فضای حالت

شکل ۳- نمایش نتایج در ایستگاه تنگ آسیاب.



جدول ۱- مشخصات و نتایج گروه‌بندی ایستگاه‌های مورد مطالعه

کد ایستگاه	استان	نام ایستگاه	ارتفاع (m)	مساحت حوزه (km <sup>2</sup> )	میانگین جریان (m <sup>3</sup> /s)	بیشینه جریان (m <sup>3</sup> /s)	بعد محاط	رده گروه
۱۲-۰۳۳	گلستان	تقی آباد-گرگان	۱۰۰	۱۱۵	۰/۳۹	۶۷	۱۳	H.D.
۱۲-۰۷۱	گلستان	زرینگل-زرینگل	۳۰۰	۲۳۵	۲/۲۴	۷۸/۱۰	۷	L.D.
۱۲-۰۸۳	گلستان	سرمو	۲۸۰	۳۸۸	۱/۲۰	۵۲	۶	L.D.
۱۲-۰۸۵	گلستان	پل اردوگاه	۴۶۵	۱۹۵	۰/۵۴	۵۱/۰۵	۱۰	M.D.
۱۳-۰۳۸	سمنان	فنیسک	۱۸۰۰	۲۴۸	۰/۶۲	۴۰	۱۴	H.D.
۴۷-۰۲۵	سمنان	بنکوه	۱۰۴۰	۳۲۰۹	۷/۷۵	۳۲۰	۸	M.D.
۴۷-۰۳۳	سمنان	خروجی درجزین	۱۲۸۰	۳۶۰	۰/۳۲	۲۲	۱۰	M.D.
۱۹-۰۴۹	اردبیل	لای	۲۰۶۸	۳۶	۰/۱۱	۵/۲۷	۶	L.D.
۱۹-۰۵۳	اردبیل	پل الماس	۱۴۴۰	۱۰۷۱	۳/۶۱	۱۴۲/۴۸	۷	L.D.
۱۹-۰۵۵	اردبیل	گیلانده	۱۳۳۲	۱۶۳۸	۲/۶۰	۵۶/۶۰	۵	L.D.
۱۹-۰۶۳	اردبیل	پل سلطان	۱۴۲۰	۹۸	۰/۷۸	۱۱۶	۱۱	M.D.
۱۹-۰۶۵	اردبیل	دوست بیگلو	۷۸۰	۷۳۱۱	۸/۰۹	۱۸۵/۲۰	۷	L.D.
۱۹-۰۶۹	اردبیل	مشیران	۷۰۵	۱۱۲۶۷	۱۵/۱۹	۲۳۲	۶	L.D.
۱۹-۰۹۷	اردبیل	سولا-سولار	۱۳۵۲	۴۴	۰/۱۳	۵/۱۱	۴	L.D.
۱۹-۰۹۹	اردبیل	نمین	۱۴۵۹	۴۰	۰/۰۸	۲/۱۱	۷	L.D.
۱۹-۱۰۱	اردبیل	سامیان	۱۲۹۰	۴۰۰۴	۶/۲۸	۳۵۱/۴۰	۵	L.D.
۱۹-۱۱۹	اردبیل	اکبرداود	۳۳۴	۷۱۰	۰/۱۶	۶۶/۳۰	۱۵	H.D.
۱۹-۱۲۱	اردبیل	حاجی احمدکندی	۸۲۰	۱۵۶	۰/۱۶	۱۸/۶۰	۹	M.D.
۱۹-۱۴۸	اردبیل	ویلادرق	۱۸۰۰	۸	۰/۰۷	۰/۹۵	۷	L.D.
۱۳-۰۱۹	مازندران	سلیمان تنگه	۴۰۰	۱۲۵۶	۶/۲۶	۱۰۸/۹۱	۸	M.D.
۱۳-۰۲۵	مازندران	ریگ چشمه	۲۷۰	۲۲۱۵	۱۰/۱۲	۳۲۱	۹	M.D.
۱۴-۰۲۲	مازندران	کریکلا	۵۷۰	۵۲۴	۲/۳۱	۴۶/۷۰	۸	M.D.
۲۴-۰۲۱	فارس	حنیقان	۱۵۸۵	۴۱۵	۱/۸۲	۲۶۴	۱۳	H.D.
۲۴-۰۲۳	فارس	تنگاب-فیروزآباد	۱۳۷۶	۱۴۱۰	۳/۷۵	۶۶۵	۱۰	M.D.
۲۴-۰۲۷	فارس	احمدآباد-دهرم	۳۸۴	۴۳۰۰	۱۰/۱۳	۶۷۱	۱۰	M.D.
۲۴-۰۶۵	فارس	دژگاه	۲۲۲	۱۸۵۲۵	۱۹/۶۴	۱۸۲۵/۲۷	۱۴	H.D.
۲۹-۰۱۱	سیستان	پیردان	۷۷۸	۲۴۲۰	۲/۵۷	۱۹۲۲	۱۲	H.D.
۴۴-۰۱۵	سیستان	دامن	۶۵۱	۳۶۷۰	۲/۳۹	۱۰۱۹	۱۲	H.D.
۵۲-۰۰۵	سیستان	لادیز	۱۱۵۸	۱۳۵۰	۰/۲۴	۶۰	۱۰	M.D.
۲۱-۳۲۹	کردستان	پانه-پای پل	۱۴۹۳	۱۱۱	۱/۵۸	۳۸/۸۳	۸	M.D.
۲۱-۳۳۹	کردستان	تونل-چهل گزی	۱۵۷۵	۲۸۰	۱/۵۳	۳۹	۵	L.D.
۲۱-۷۸۴	کردستان	جملی-شوی	۹۵۵	۱۶۲	۱/۰۸	۲۹/۸۰	۴	L.D.
۲۱-۹۲۳	کردستان	نگل-کوماسی	۱۳۱۰	۹۹۶	۹/۶۶	۴۳۸/۸۲	۶	L.D.
۲۱-۹۲۴	کردستان	نگل-شویسه	۱۳۱۱	۳۸۰	۱/۹۰	۶۹/۶۰	۸	M.D.
۲۱-۱۰۵	همدان	سنگ سوراخ	۱۸۰۰	۰	۴/۲۱	۳۷/۹۷	۹	M.D.
۴۷-۰۰۵	تهران	حبله رود	۱۹۲۴	۱۹۱۰	۱/۱۳	۷۲	۹	M.D.
۴۷-۰۰۷	تهران	نمرود	۱۸۱۴	۵۸۷	۴/۳۶	۳۴/۲۰	۱۰	M.D.
۱۸-۰۱۹	گیلان	رودبارسرا	۱۳۵	۱۲۶	۲/۰۷	۷۵	۱۲	H.D.
۱۸-۰۸۱	گیلان	نوخاله	-۲۰	۷۸۱	۲۱/۳۳	۴۱۵/۱۰	۱۲	H.D.
۱۸-۰۸۳	گیلان	لاکسار	-۲۰	۴۴۲	۱۰/۶۸	۲۶۶	۹	M.D.

ادامه جدول ۱- مشخصات و نتایج گروه بندی ایستگاه‌های مورد مطالعه

کد ایستگاه	استان	نام ایستگاه	ارتفاع (m)	مساحت حوزه (km <sup>2</sup> )	میانگین جریان (m <sup>3</sup> /s)	بیشینه جریان (m <sup>3</sup> /s)	بعد محاط	رده گروه
۱۸-۰۸۷	گیلان	چومقال	-۲۲	۳۵۵	۵۷/۵	۱۲۵	۷	L.D
۱۸-۰۸۹	گیلان	کل سر	-۲۳	۲۰۶	۶/۸۹	۱۶۷	۸	M.D
۱۸-۰۹۱	گیلان	کتم جان- خالکابی	-۱۹	۳۴۱	۴/۵۵	۶۶	۸	M.D
۱۸-۰۹۳	گیلان	کتم جان- مرغک	-۱۹	۳۱۸	۳/۵۹	۳۶۰	۱۰	M.D
۱۸-۰۹۵	گیلان	اقامحله	-۱۵	۱۰۰	۱/۹۳	۱۰۳	۸	M.D
۲۱-۱۴۵	لرستان	نور آباد- یادآور	۱۷۸۰	۶۱۵	۳/۳۷	۹۹/۵۰	۵	L.D
۲۱-۱۶۳	لرستان	تنگ سیاب	۸۸۰	۵۶۸	۱/۴۵	۲۱۲	۱۳	H.D
۲۱-۱۶۷	لرستان	دهنو- هرود	۱۷۷۰	۲۷۰	۲/۷۱	۱۰۴/۶۱	۸	M.D
۲۱-۱۷۱	لرستان	سرآب صید علی	۱۵۲۰	۷۷۳	۷/۷۰	۱۲۵/۳۷	۱۵	H.D
۲۱-۱۷۷	لرستان	آفرینه- کشکان	۸۲۰	۶۷۰۰	۴۱/۸۶	۹۲۳	۹	M.D
۲۱-۱۷۹	لرستان	آفرینه- چولهول	۸۰۰	۸۰۰	۳/۵۰	۴۷۲/۲۵	۱۷	H.D
۲۱-۱۸۱	لرستان	براقتاب	۷۹۰	۱۱۰۸	۱/۴۴	۱۴۲	۱۶	H.D
۲۱-۱۸۳	لرستان	پل دختر- کشکان	۶۵۰	۹۱۴۰	۴۸/۳۳	۹۴۵	۱۰	M.D
۲۱-۲۵۹	لرستان	ونایی- گلرود	۲۰۰۰	۶۰	۲/۲۷	۳۷/۱۲	۱۲	H.D
۲۱-۲۶۱	لرستان	رحیم آباد- سیلاخور	۱۴۹۰	۱۰۰۰	۵/۷۲	۱۱۹	۶	L.D
۲۱-۲۶۷	لرستان	دورود- تیره	۱۴۵۰	۳۴۰۰	۱۵/۸۵	۴۴۵	۶	L.D
۲۱-۲۷۹	لرستان	دورود- ماربره	۱۴۵۰	۲۶۵۵	۹/۳۶	۴۲۷/۵۰	۱۰	M.D
۲۱-۹۵۴	لرستان	دره تنگ- کهمان	۱۷۲۰	۱۶۶	۲/۶۸	۳۴/۶۰	۱۱	M.D
۲۱-۹۶۶	لرستان	چنارسوخته- خشکه	۱۴۲۰	۲۳۴	۱/۳۵	۷۸/۱۶	۹	M.D
۲۴-۰۲۹	بوشهر	قنطره	۷۰	۳۶۵۰۰	۲۸/۹۴	۲۸۶۶	۸	M.D

L.D.= گروه بعد کم، M.D.= گروه بعد ماز سوی و H.D.= گروه بعد زیاد

واقع شود. ارایه و گزارش معیاری برای طبقه‌بندی، در کنار معیارهای دقت می‌توانند حدود کاربرد مدل‌ها را مشخص و استفاده از مدل را عمومی سازد. مشخص بودن حدود اعتبار مدل‌ها می‌تواند کاربران را قبل از صرف انرژی و هزینه در مورد موفقیت آمیز بودن استفاده از مدل راهنمایی نماید.

در این تحقیق، بر اساس روش غیرخطی و تئوری آشوب که دارای فرضیات مشابهی مانند رفتار غیرخطی، حساسیت به شرایط اولیه با پدیده بارش- رواناب دارند، یک چارچوب مشخص برای طبقه‌بندی معرفی و استفاده از پارامتر بعد محاط M مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پارامتر M جزء خصوصیات ذاتی داده‌ها است که مقدار آن می‌تواند از ایستگاهی به ایستگاه (حتی در صورت تشابه اقلیمی) بسیار متفاوت باشد. از این رو این معیار می‌تواند معیاری برای دسته‌بندی حوزه‌های آبخیز استفاده گردد. نتایج حاکی از آن است که هر چند نزدیکی مسافتی دو ایستگاه نشانی از تشابه رفتار نیست اما برخی هم‌وزنی در رفتارهای مکانی مشخص است. در استفاده از این معیارها و تعیین حدود موضوع مقیاس زمانی دارای اهمیت فراوانی می‌باشد، به نحوی که با تغییر مقیاس زمانی کارایی و حدود هر یک از معیارها نیز دست‌خوش تغییر می‌گردد؛ بنابراین، باید در مطالعات دیگر کارایی و حدود مناسب هر یک از گروه‌ها در هر یک از مقیاس‌های زمانی (ماهانه، سالانه و ...) مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به نیاز بررسی هر یک از روش‌های طبقه‌بندی در مناطق مختلف و با تعداد زیاد سری داده‌ها، باید این روش‌ها در مناطق مختلف و با تعداد ایستگاه‌های بیش‌تر مورد بررسی قرار گیرد.

این موضوع به وضوح نشان می‌دهد که این معیار می‌تواند خصوصیات و رفتار متفاوت ایستگاه‌ها و سری‌های زمانی را از یکدیگر متمایز نماید و شباهت ذاتی رفتار حوزه‌های آبخیز را با توجه به شرایط متفاوت حاکم بر ایستگاه‌ها نمایان سازد، لذا این معیار می‌تواند در دسته‌بندی حوزه‌های آبخیز مؤثر باشد.

بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان بر اساس معیار بعد محاط، ایستگاه‌ها را به گروه‌هایی در محدوده با بعد زیاد (احتمالاتی) بعد ماز سوی (قطعی- احتمالاتی) و بعد کم (قطعی) دسته‌بندی نمود (۱۵). بر این اساس، ایستگاه‌ها به سه دسته تقسیم شده‌اند که عبارتند از: گروه بعد کم  $M \leq 7$ ، گروه بعد ماز سوی  $8 \leq M \leq 11$  و گروه بعد زیاد  $M > 11$ . در شکل ۱ و جدول ۲ نقشه پراکنش گروه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس معیار M نمایش داده شده است.

همان‌گونه که در نقشه قابل مشاهده است، با توجه به محدوده مکانی یک ایستگاه نمی‌توان نسبت به تعلق آن ایستگاه به یک گروه خاص اظهار نظر کرد اما می‌توان نوعی شباهت و هم‌وزنی در برخی از ناحیه و اقلیم‌ها بیان نمود، برای نمونه، هیچ یک از ایستگاه‌های واقع در جنوب و جنوب شرقی کشور در گروه سوم قرار نمی‌گیرند. هرچند تعداد ایستگاه‌ها برای بیان قطعی این هم‌وزنی کافی نیست اما می‌تواند یک دید کلی از پراکنش مکانی گروه‌ها را نمایش نماید. یکی از نیازهای اساسی در هیدرولوژی که باید به سرعت پاسخی به آن داده شود، یافتن یک چارچوب طبقه‌بندی مناسب است که می‌تواند در بسیاری از شاخه‌های علم هیدرولوژی (مانند عمومی‌سازی و گسترش مدل‌ها و آموزش) مفید

هم‌چنین لازم است توانایی این معیارها در مشخص کردن حدود اعتبار روش‌های متفاوت مدل‌سازی معرفی گردد تا توانایی مدل‌ها نسبت به یکدیگر و توانایی معیارها در زمینه مشخص سازی حدود اعتبار مدل‌ها مشخص گردد.

در پایان، تأکید می‌گردد که شناسایی یک چارچوب مشخص برای طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز در ابتدای مسیر قرار دارد و به فعالیت‌های فراوانی در این زمینه نیاز دارد.

## منابع

1. Bejarano, M.D., M. Marchamalo, D.G. De Jalón and M.G. De Tánago. 2010. Flow Regime Patterns and Their Controlling Factors in the Ebro basin (Spain). *Journal of Hydrology*, 385: 323-335.
2. Beven, K. 2008. On Doing Better Hydrological Science. *Hydrological Processes*, 22: 3549-3553.
3. Dhanya, C.T. and D.N. Kumar. 2011. Multivariate Nonlinear Ensemble Prediction of Daily Chaotic Rainfall with Climate Input. *Journal of Hydrology*, 403: 292-306.
4. Ghorbani, M.A., O. Kisi and M. Aalinezhad. 2010. A Probe into the Chaotic Nature of Daily Streamflow Time Series by Correlation Dimension and Largest Lyapunov Methods. *Applied Mathematical Modeling*, 34: 4050-4057.
5. Krasovskaia, I. 1998. Entropy-Based Grouping of River Flow Regimes. *Journal of Hydrology*, 202: 173-191.
6. McDonnell, J.J. and R.A. Woods. 2004. on the Need for Catchment Classification. *Journal of Hydrology*, 299: 2-3.
7. Monk, W.A., P.J. Wood, D.M. Hannah, D.A. Wilson, C.A. Extence and R.P. Chadd. 2006. Flow Variability and Macro Invertebrate Community Response within Riverine Systems. *River Research and Applications*, 22: 595-615.
8. Olden, J.D., M.J. Kennard and B.J. Pusey. 2011. A Framework for Hydrologic Classification with a Review of Methodologies and Applications in Ecohydrology. *Ecohydrology*, 5: 503-518.
9. Rao, A.R. and V.V. Srinivas. 2006. Regionalization of Watersheds by Fuzzy Cluster Analysis. *Journal of Hydrology*, 318: 57-79.
10. Sangoyomi, T.B., U. Lall and H.D.I. Abarbanel. 1996. Nonlinear Dynamics of the Great Salt Lake: Dimension Estimation. *Water Resource Research*, 32: 149-159.
11. Schertzer, D., I. Tchiguirinskaia, S. Lovejoy, P. Hubert and H. Bend-Joudi. 2002. Which Chaos in the Rainfall-Runoff Process? A Discussion on "Evidence of Chaos in the Rainfall-Runoff Process" by Sivakumar, B., R. Berndtsson, J. Olsson and K. Jinno, *Hydrological Sciences Journal*, 47: 139-147.
12. Sen, A.K. 2009. Complexity Analysis of River Flow Time Series. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23: 361-366.
13. Sivakumar, B. 2004. Dominant Processes Concept in Hydrology: Moving Forward. *Hydrological Processes*, 18: 2349-2353.
14. Sivakumar, B. 2005. Correlation Dimension Estimation of Hydrologic Series and Data Size Requirement: Myth and Reality. *Hydrological Sciences Journal*, 50: 591-604.
15. Sivakumar, B. and V.P. Singh. 2012. Hydrologic System Complexity and Nonlinear Dynamic Concepts for a Catchment Classification Framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 4119-4131.
16. Sivakumar, B., A.W. Jayawardena and W.K. Li. 2007. Hydrologic Complexity and Classification: a Simple Data Reconstruction Approach. *Hydrological Processes*, 21: 2713-2728.
17. Sivakumar, B., M. Persson, R. Berndtsson and C.B. Uvo. 2002. Is Correlation Dimensioning a Reliable Indicator of Low-Dimensional Chaos in Short Hydrological Time Series? *Water Resource Research*, 38: 1-8.
18. Sivakumar, B., R. Berndtsson, J. Olsson and K. Jinno. 2002. Reply to "Which Chaos in the Rainfall-Runoff Process?" by Schertzer, D., I. Tchiguirinskaia, S. Lovejoy, P. Hubert, H. Bendjoudi and M. Larcheveque, *Hydrological Sciences Journal*, 47: 149-158.
19. Sivapalan, M., G. Blöschl, L. Zhang and R. Vertessy. 2003. Downward Approach to Hydrological Prediction. *Hydrological Processes*, 17: 2101-2111.
20. Takens, F. 1981. Detecting Strange Attractors in Turbulence. *Lecture Notes in Mathematics*, 898: 366-381.
21. Woods R.A. 2002. Seeing Catchments with New Eyes Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modeling. *Hydrological Processes*, 16: 1111-1113.
22. Zangene, M., M. Atai and P. Moalem. 1388. Reconstruction of Phase Space of Chaotic Time Series Using an Intelligent Method. *Electronics and Power of Faculty of Electrical Engineering Journal*, 1: 3-10 (In Persian).
23. Zoppou, C., O.M. Nielsen and L. Zhang. 2002. Regionalization of Daily Stream Flow in Australia Using Wavelets and K Means Analysis. CMA Research Report MRR02-003. Australian National University, Canberra, 1: 1-39.

## Using Nonlinear Dynamic Systems Parameter for Hydrologic Classification of Catchments

Hadi Delafrouz<sup>1</sup>, Abbas Ghaheeri<sup>2</sup>, Mohammad Ali Ghorbani<sup>3</sup> and  
Mohammad Hasan Fazelifard<sup>4</sup>

---

1 and 2- Ph.D. Student and Professor, Iran University of Science and Technology

3- Associate Professor, University of Tabriz

4- Ph.D. Student, University of Tabriz (Corresponding author: mhfazelifard@yahoo.com)

Received: February 6, 2014

Accepted: September 7, 2014

---

### Abstract

One of the challenges for hydrologists is finding a new method for hydrologic classification of catchments. An appropriate classification method can be effective in many branches of hydrologic science like modeling. To deal with the complexity and nonlinearity of hydrologic processes, some researchers have proposed using the chaos theory for catchment classification. In this research, possibility of using this concept in classification of 60 catchments in Iran (using daily runoff data) has been analyzed and embedding dimension (M) of dynamic systems has been used as a parameter for catchments classification. Regarding the obtained results, catchments can be classified into three group whit high (probability), average (deterministic-probability) and low (deterministic). The results indicate that although there is some similarity and homogeneity in some regions and climates, using the geographic position of a catchment can't suggest a group that the catchment belongs to and that, insteade embedding dimension can be used as a criterion for catchment classification.

**Keywords:** Catchment Classification, Chaos Theory, Embedding Dimension, Hydrologic Models, Iran