# ارزیابی منطقه‌ای ایستگاه‌های پایش هیدرومتری حوزه بختگان - مهارلو با استفاده از تئوری آنتروپی

سمیه خلیفه*[1] و ابراهیم خلیفه[2]

1-دانش آموخته کارشناس ارشد، مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان،ایران.

2-دانشجوی دکترای عمران، گروه آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،تهران،ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: s.kh.arshad@gmail.com

تاریخ دریافت: 91/07/05 تاریخ پذیرش: 91/09/20

**چکیده**

**طراحی و بهره‌برداری مناسب از سامانه‌های پایش منابع آب یکی از مهم‌ترین مباحث مدیریت کمی و کیفی منابع آب بوده و صحت و کفایت آمار و اطلاعات هر سامانه و ارزیابی این آمار و اطلاعات، نقش تعیین کننده‌ای در تصمیم‌گیری‌های صحیح و پایدار در منطقه زیر پوشش سامانه دارد. از این نظر، تعیین تعداد و پراکنش مناسب ایستگاه‌های شبکه پایش و همچنین ارزیابی کفایت ایستگاه‌های شبکه‌های موجود به منظور حذف ایستگاه‌های غیرضروری و در نتیجه کاهش هزینه‌های تولید آمار و اطلاعات از چالش‌های مهم پیش رو هستند. در این پژوهش، با نگرشی نو بر پایه این تئوری، ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های هیدرومتری حوزه بختگان- مهارلو مورد بررسی قرار گرفته است. در این دیدگاه با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته، محدودیت موجود در تحقیقات قبلی مرتفع و با در نظر گرفتن شاخص‌های کل اطلاعات ارسال شده توسط ایستگاه S(i)، کل اطلاعات دریافت شده توسط ایستگاه R(i) و کل اطلاعات خالص ایستگاه N(i) به ارزیابی شبکه پایش پرداخته شده است. نتایج تحلیل حساسیت اطلاعات نشان می‌دهد که مقادیر شاخص‌های آنتروپی به تغییر فاصله کلاس‌بندی اطلاعات حساس می‌باشند. مقادیر محاسبه شده برای شاخص‌های R(i) و S(i) نیز کاملاً هم‌ارز بوده و هر ایستگاه تقریباً به همان میزان که اطلاعات به سایر ایستگاه‌ها ارسال می‌کند، اطلاعات دریافت می‌نماید. همچنین با توجه به نتایج قابل قبول رابطه استورجس، استفاده از این رابطه به منظور تعیین تعداد کلاس مناسب توصیه می‌شود. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که از 14 ایستگاه شبکه پایش 4 ایستگاه در وضعیت بحرانی قرار داشته و امکان حذف آن‌ها وجود دارد.**

**واژه‌های کلیدی:** آنتروپی گسسته، ایستگاه هیدرومتری، شاخص اطلاعات، فاصله کلاس‌بندی.

**مقدمه**

تولید اطلاعات صحیح و کارآمد همواره از مسائل و چالش‌های مهم زیرمجموعه منابع آب کشور بوده است. از این نظر، چیدمان ایستگاه‌های هیدرومتری بجا و مناسب در شبکه آبراهه‌ای یک حوزه آبخیز حائز اهمیت فراوان بوده و در درک صحیح ویژگی‌های هیدرولوژیک حوزه آبخیز تأثیری عمیق و مستقیم دارد. اما هزینه‌های نصب، تجهیز و نگهداری ایستگاه‌های هیدرومتری را نیز نمی‌توان از نظر دور داشت. بنابراین تولید حداکثر آمار و اطلاعات مورد نیاز با استفاده از حداقل تعداد ایستگاه‌ها یک اصل در طراحی صحیح شبکه ایستگاه‌های هیدرومتری یک حوزه آبخیز است. براین اساس، بررسی امکان حذف یا اضافه نمودن ایستگاه‌های شبکه پایش هیدرومتری بحثی مهم در مدیریت منابع آب می‌باشد.

تئوری آنتروپی، با نگرشی آماری به وضعیت ایستگاه‌های موجود در شبکه آبراهه‌ای و آمار و اطلاعات ثبت شده در آنها و همچنین ارتباط ایستگاه‌ها با یکدیگر، ضمن بررسی اطلاعات مجموعه ایستگاه‌های موجود، امکان حذف آنها را بررسی می‌نماید. بنابراین، می‌توان از این تئوری در مدیریت بهتر شبکه هیدرومتری و چیدمان مناسب ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده نمود. آنتروپی یکی از روش‌های کارآمد در تحلیل عدم قطعیت در سامانه‌های منابع آب محسوب می‌شود. تا نیمه اول قرن بیستم، به دلیل پیچیدگی مفهومی و محاسباتی این تئوری، محققین علاقه چندانی به کاربرد آن به عنوان یک روش آماری پیدا نکردند. تا اینکه Shannon در سال 1948 تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه استفاده از این تئوری در زمینه‌های مختلف مهندسی مانند ارزیابی سری‌های زمانی اقتصادی و مباحث اکولوژیک انجام داد و بسیاری از مفاهیم ناشناخته این تئوری را توسعه داد. در زمینه ارزیابی و طراحی سامانه‌های پایش منابع آب با تئوری آنتروپی نیز مطالعات متعددی انجام شده است. Kawachi و همکاران (2001) از تئوری آنتروپی برای کمی کردن عدم قطعیت شبکه پایش بارندگی سراسر ژاپن استفاده کرده و نقشه هم‌آنتروپی ژاپن را تهیه کرده و آن را با نقشه هم‌باران مقایسه نمودند. این مقایسه آنها را قادر به ارزیابی نسبی و دسته‌بندی پتانسیل موجودی منابع آب ژاپن کرد. Mogheir و Singh در سال 2003 روشی را برای طراحی شبکه پایش کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی انتقالی توسعه دادند. آنها همچنین، با استفاده از نقشه‌های خطوط همسان آنتروپی مرزی، روشی برای ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی ارائه کردند.

تمامی مطالعاتی که در بالا بیان شد با استفاده از تئوری آنتروپی پیوسته انجام شده است و در آنتروپی پیوسته فرض بر این است که توزیع اطلاعات از توزیع احتمالاتی نرمال یا لوگ نرمال پیروی می‌کند که این فرض در بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیک صدق نمی‌کند. Mogheir و در سال Singh 2003 و Mogheir و همکاران در سال 2004 روشی را برای ارزیابی کیفی سامانه آب‌های زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته پیشنهاد دادند. Markus و همکاران در سال 2003 از دو روش تئوری آنتروپی و GLS به منظور ارزیابی ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های پایش رودخانه‌ای در ایالت ایلی‌نویز آمریکا استفاده نموده و نتایج هر دو روش را با هم مقایسه و مدل هیبریدی ترکیبی از دو روش را پیشنهاد کردند.

Karamouz و همکاران (2005) از اطلاعات انتقالی برای انتخاب بهترین ایستگاه‌های پایش کیفی در طول یک رودخانه استفاده کردند. برای هر ایستگاه جدید با پتانسیل پایش، سری زمانی داده‌های کیفیت آب با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی تولید شد. بدین ترتیب

ضمن به‌کارگیری روش آنتروپی پیوسته در ارزیابی سامانه‌های پایش رودخانه‌ها، با تلفیق روش آنتروپی و یک مدل شبیه‌سازی کیفی، موقعیت ایستگاه‌های جدیدی نیز برای بهبود عملکرد سامانه پایش پیشنهاد گردید. Sarlak و همکاران (2006) به ارزیابی و انتخاب ایستگاه‌های شبکه هیدرومتری با استفاده از تئوری آنتروپی پرداختند. آنها اثر انواع توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال و گاما بر نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که نوع توزیع در نظر گرفته شده برای داده‌های آبدهی در تئوری آنتروپی پیوسته مهم می‌باشد و موجب مقادیر متفاوتی در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها می‌شود.

Chen و همکاران (2008) روشی مرکب از زمین‌آمار (کریجینگ) و آنتروپی برای تعیین تعداد و توزیع مکانی بهینه ایستگاه‌های باران‌سنجی در شمال تایوان ارائه دادند. در این روش، از کریجینگ برای درون‌یابی مقادیر مشاهده شده ماهانه بارندگی به‌منظور بررسی تغییرات مکانی بارندگی و تعیین مقدار بارندگی در موقعیت‌های جدید باران‌سنج‌ها (گره‌های یک شبکه) و از آنتروپی برای یافتن تعداد کافی باران‌سنج‌ها به‌طوری که معرف پدیده بارندگی ماهانه باشند استفاده شد و با محاسبه آنتروپی انتقال اطلاعات و آنتروپی مشترک، درجه اهمیت ایستگاه‌ها تعیین گردید. معصومی و کراچیان (1387) با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته، کارایی سامانه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی دشت تهران را از نظر پایش مکانی و توالی زمانی نمونه‌برداری‌ها مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل، نشان‌دهنده کارایی مناسب الگوریتم پیشنهادی در ارزیابی و بهنگام سازی سامانه‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی بود.

کریمی حسینی و بزرگ حداد (1388) با استفاده از تئوری آنتروپی و الگوریتم ژنتیک به ارزیابی و طراحی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه باتلاق گاوخونی پرداختند. بدین منظور با استفاده از مفهوم تئوری آنتروپی و به دو روش الگوریتم ترتیبی و الگوریتم ژنتیک و با بررسی آنتروپی انتقال اطلاعات یک سری نقاط پتانسیل، مکان‌های مناسب نصب ایستگاه باران‌سنجی جدید تعیین گردید. در نهایت با مقایسه نتایج این دو روش، مشخص گردید که الگوریتم ژنتیک با یک تعداد معین ایستگاه به جواب بهتری نسبت به الگوریتم ترتیبی می‌رسد. Mishra و Coulibaly (2010) با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته، شبکه‌های هیدرومتری حوزه‌های کانادا را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها ابتدا با استفاده از مقادیر شاخص انتقال اطلاعات به ارزیابی و رتبه‌بندی ایستگاه‌های هیدرومتری و سپس پهنه‌بندی آنها پرداختند و درجه اهمیت مناطق را از این نظر تعیین نمودند. سپس با استفاده از نتایج به‌دست آمده، کارایی شبکه‌های پایش سراسر کانادا را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که اکثر شبکه‌های پایش کانادا با کمبود تعداد ایستگاه هیدرومتری مواجه هستند و نیاز به بازنگری مجدد دارند.

Mondal و Singh (2012) با استفاده از نظریه آنتروپی گسسته، ایستگاه‌های شبکه پایش آب زیرزمینی حوزه آبریز رودخانه کوداگانار در جنوب هند را ارزیابی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که تعداد ایستگاه‌های شبکه پایش کافی بوده ولی جانمایی و چیدمان آن‌ها مناسب نیست. بدین ترتیب از تعداد 28 ایستگاه موجود، 15 ایستگاه برای سنجش تراز آب زیرزمینی ضروری می‌باشد .

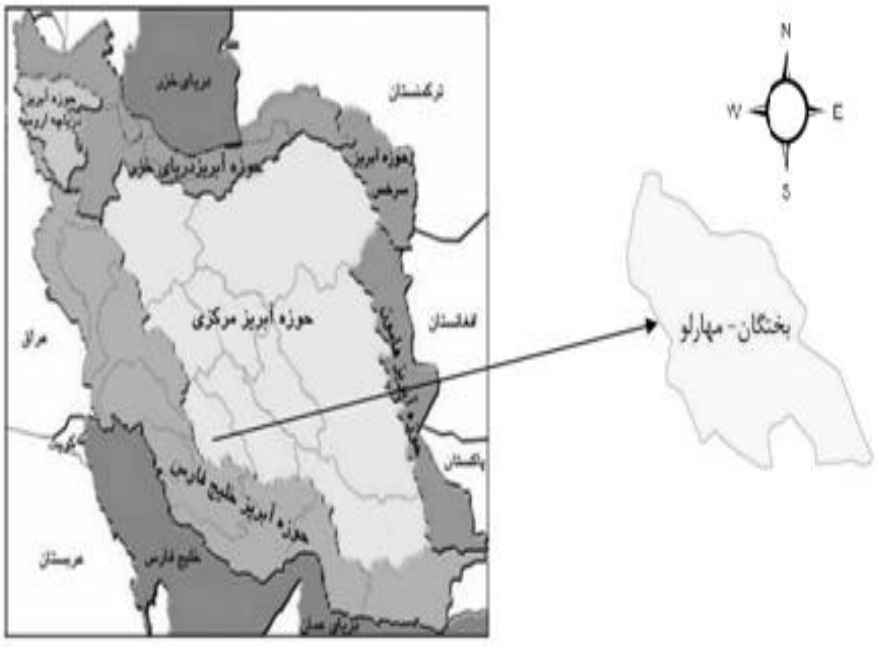
بدین ترتیب، پژوهش حاضر نیز با هدف ارزیابی شبکه ایستگاه‌های پایش هیدرومتری حوزه آبخیز بختگان- مهارلو در استان فارس صورت گرفته که در نهایت به درک بهتر توزیع مکانی ایستگاه‌های هیدرومتری حوزه یاد شده منجر خواهد شد. در این پژوهش، ایستگاه‌های

موجود بر پایه اهمیت و ارزش جمع‌آوری اطلاعات رتبه‌بندی شده و ضمن بررسی حساسیت روش آنتروپی به تعداد کلاس‌های انتخابی، پیشنهادهایی در خصوص سازمان‌دهی بهتر شبکه و حذف ایستگاه‌های غیر ضروری ارائه گردیده است.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات منطقه مورد مطالعه و اطلاعات

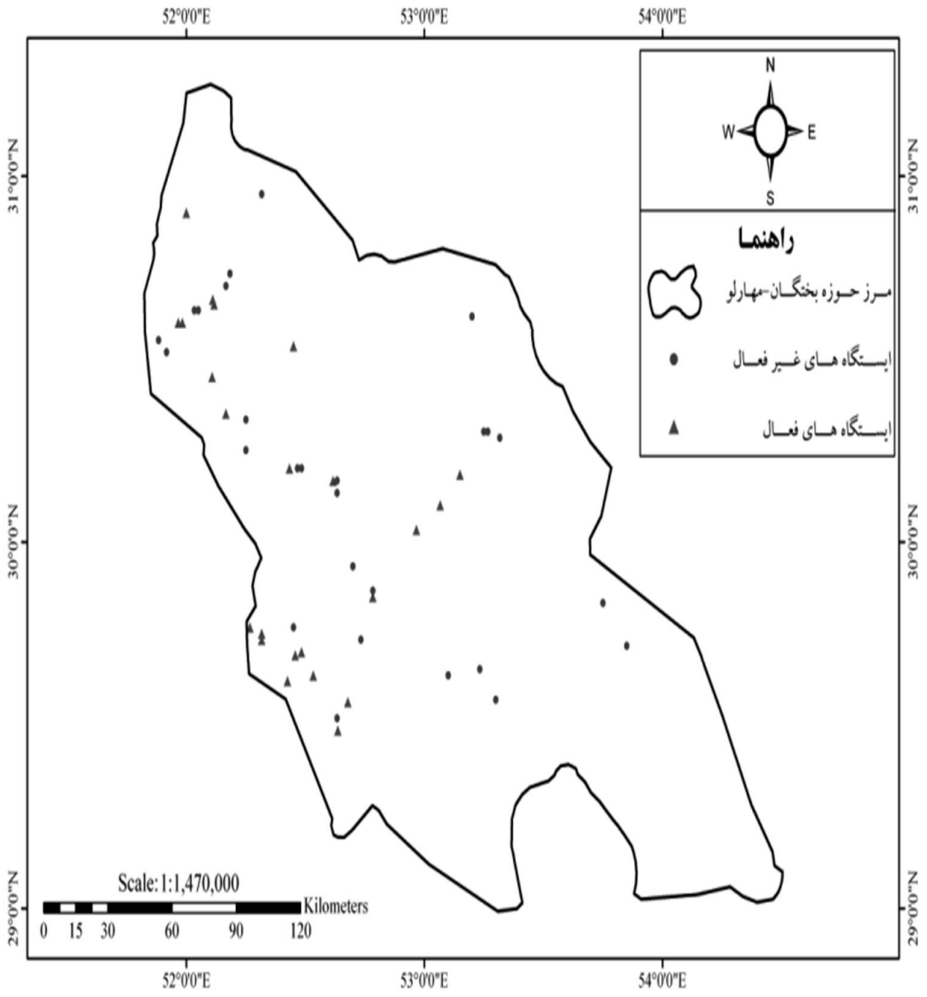
حوزه آبخیز بختگان- مهارلو یکی از 30 حوزه آبخیز درجه 2 کشور و بخشی از حوزه آبخیز اصلی مرکزی می‌باشد (شکل 1). حوزه آبخیز بختگان- مهارلو در محدوده جغرافیایی 578832 تا 841100 متر طول شرقی و 3209305 تا 3457863 متر عرض شمالی (مناطق 39 و 40 سامانه UTM معادل 51/82 تا 54/5 درجه طول شرقی و 28/99 تا 31/25 درجه عرض شمالی گسترش یافته است. مساحت این حوزه 31874 کیلومتر مربع و محیط حوزه 920/6 کیلومتر است، که تقریباً یک چهارم از استان فارس را تشکیل می‌دهد. از لحاظ تقسیم‌بندی اقلیمی، بیشترین مساحت حوزه را ناحیه نیمه‌خشک تشکیل داده است.




**شکل 1: موقعیت حوزه بختگان - مهارلو**

در حوزه آبخیز بختگان- مهارلو 52 ایستگاه هیدرومتری توسط سازمان تحقیقات منابع آب ایران از سال 1338 نصب گردیده که 24 ایستگاه کماکان فعال می‌باشد جدول (1). در این پژوهش، میانگین آبدهی سالانه ایستگاه‌های یاد شده به عنوان آمار و اطلاعات ثبت شده مد نظر قرار گرفته است. اولین گام در بررسی آمار و اطلاعات شبکه ایستگاه‌های هیدرومتری یک حوزه تشکیل دوره آماری است. در

تشکیل دوره آماری به دست آوردن دوره‌ای با بیشترین تعداد ایستگاه، بیشترین سال‌های آماری و کمترین نسبت بازسازی حائز اهمیت فراوان است. در این ارتباط و بر اساس آمار و اطلاعات موجود، دوره آماری 32 ساله از سال 1353 تا 1385 شامل 14 ایستگاه برای حوزه تشکیل گردیده است شکل (2) و جدول(2). بدیهی است در تشکیل دوره آماری یاد شده بازسازی آمار نیز صورت گرفته است. بدین منظور، ابتـــدا رابطه تجربی دو به دو بین ایستگاه مورد نظر و سایر ایستگاه‌ها برقرار گردیده است. سپس رابطه دارای بهترین ضریب تعیین($r^2$) انتخاب و با استفاده از آن آمار ایستگاه مورد نظر بازسازی گردیده است جدول (3). البته میزان بازسازی آمار در هر ایستگاه حداکثر 20% طول دوره آماری بوده است.




**شکل 2: پراکنش و موقعیت جغرافیایی 52 ایستگاه هیدرومتری حوزه بختگان - مهارلو**

**جدول 1: مشخصات ایستگاه‌های فعال هیدرومتری حوزه بختگان - مهارلو**

| ردیف | نام ایستگاه | طول جغرافیایی (درجه) | عرض جغرافیایی (درجه) | سال شروع فعالیت |
|---|---|---|---|---|
| 1 | سددرودزن | 52/43 | 30/20 | 1361 |
| 2 | بیدکل | 52/62 | 30/17 | 1353 |
| 3 | چمریز | 52/11 | 30/45 | 1343 |
| 4 | پل‌خان(کر) | 52/78 | 29/58 | 1343 |
| 5 | تنگ‌بستانک | 52/17 | 30/35 | 1350 |
| 6 | تنگ‌بلاغی | 53/15 | 30/18 | 1364 |
| 7 | جمال‌یگ (شیرین) | 51/98 | 30/60 | 1349 |
| 8 | جمال‌بیگ (خارستان) | 51/97 | 30/60 | 1353 |
| 9 | دشتبال | 52/97 | 30/03 | 1338 |
| 10 | رحمت‌آباد | 53/07 | 30/10 | 1369 |
| 11 | حسن‌آباد | 52/45 | 30/53 | 1376 |
| 12 | دهکده‌سفید | 52/11 | 30/66 | 1353 |
| 13 | دهکده‌سفید (گاوگدار) | 52/12 | 30/65 | 1353 |
| 14 | خسروشیرین | 52/00 | 30/90 | 1353 |
| 15 | مارون (رودخانه‌مارون) | 52/27 | 30/77 | 1377 |
| 16 | مارون (رودخانه‌گزدان) | 52/27 | 29/77 | 1377 |
| 17 | علی‌آباد (مارون) | 52/32 | 29/73 | 1377 |
| 18 | علی‌آباد (پسکوهک) | 52/32 | 29/75 | 1377 |
| 19 | چنارسوخته (نهراعظم) | 52/48 | 29/70 | 1353 |
| 20 | چنارراهدار | 52/42 | 29/62 | 1353 |
| 21 | چنارسوخته (خشک) | 52/46 | 29/69 | 1353 |
| 22 | پل‌فسا | 52/64 | 29/48 | 1353 |
| 23 | پل‌باغ‌صفا | 52/53 | 29/63 | 1353 |
| 24 | اقبال‌آباد | 52/68 | 29/56 | 1353 |

**جدول 2: اطلاعات دوره‌های آماری مختلف**

| ردیف | دوره آماری مشترک (سال) | سال شروع دوره | سال پایان دوره | تعداد سال مفقودی | تعدادایستگاه موجود هر دوره |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 43 | 1343 | 1386 | 9 | 3 |
| 2 | 39 | 1347 | 1386 | 8 | 6 |
| 3 | 33 | 1353 | 1386 | 7 | 12 |
| 4 | 32 | 1353 | 1385 | 7 | 14 |
| 5 | 31 | 1354 | 1385 | 7 | 14 |
| 6 | 30 | 1354 | 1384 | 6 | 14 |
| 7 | 29 | 1353 | 1382 | 6 | 14 |
| 8 | 28 | 1354 | 1382 | 6 | 15 |
| 9 | 27 | 1357 | 1384 | 6 | 15 |
| 10 | 26 | 1358 | 1384 | 6 | 15 |
| 11 | 25 | 1355 | 1380 | 5 | 15 |
| 12 | 24 | 1356 | 1380 | 5 | 15 |
| 13 | 23 | 1357 | 1380 | 5 | 16 |
| 14 | 22 | 1358 | 1380 | 5 | 16 |
| 15 | 21 | 1362 | 1383 | 5 | 16 |
| 16 | 20 | 1353 | 1373 | 4 | 14 |
| 17 | 19 | 1367 | 1386 | 4 | 15 |

**جدول 3: مقادیر ضریب تعیین ($r^2$) هر ایستگاه نسبت به سایرایستگاه‌های حوزه بختگان - مهارلو**

| نام ایستگاه | پل‌باغ‌صفا | تنگ‌بستانک | پل فسا | جمال‌بیگ (شیرین) | چنارراهدار | چنارسوخته (نهر اعظم) | چنارسوخته (خشک) | خسروشیرین | دهکده‌سفید | دشتبال | جمال‌بیگ (خارستان) | پل‌خان (کر) | چمریز | دهکده‌سفید (گاوکدار) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| چمریز | 0/36 | 0/85 | 0/27 | 0/14 | 0/22 | 0/19 | 0/45 | 0/51 | 0/61 | 0/43 | 0/80 | 0/85 | 1/00 | 0/77 |
| پل‌خان (کر) | 0/39 | 0/79 | 0/29 | 0/15 | 0/21 | 0/15 | 0/49 | 0/55 | 0/58 | 0/64 | 0/59 | 1/00 | 0/85 | 0/72 |
| جمال‌بیگ (خارستان) | 0/27 | 0/63 | 0/26 | 0/10 | 0/23 | 0/16 | 0/35 | 0/29 | 0/42 | 0/24 | 1/00 | 0/59 | 0/80 | 0/57 |
| دشتبال | 0/42 | 0/51 | 0/28 | 0/03 | 0/24 | 0/25 | 0/40 | 0/37 | 0/39 | 1/00 | 0/24 | 0/64 | 0/43 | 0/38 |
| دهکده‌سفید | 0/28 | 0/70 | 0/28 | 0/11 | 0/40 | 0/16 | 0/57 | 0/58 | 1/00 | 0/46 | 0/44 | 0/70 | 0/69 | 0/83 |
| خسروشیرین | 0/11 | 0/39 | 0/12 | 0/03 | 0/22 | 0/12 | 0/30 | 1/00 | 0/61 | 0/38 | 0/31 | 0/55 | 0/53 | 0/46 |
| چنارسوخته (خشک) | 0/82 | 0/61 | 0/74 | 0/23 | 0/63 | 0/27 | 1/00 | 0/29 | 0/55 | 0/41 | 0/36 | 0/49 | 0/46 | 0/66 |
| چنارسوخته(نهر اعظم) | 0/53 | 0/24 | 0/28 | 0/02 | 0/28 | 1/00 | 0/30 | 0/16 | 0/21 | 0/34 | 0/19 | 0/20 | 0/23 | 0/26 |
| چنارراهدار | 0/78 | 0/43 | 0/46 | 0/05 | 1/00 | 0/28 | 0/64 | 0/19 | 0/35 | 0/21 | 0/20 | 0/17 | 0/20 | 0/46 |
| جمال‌بیگ (شیرین) | 0/19 | 0/16 | 0/48 | 1/00 | 0/07 | 0/04 | 0/26 | 0/05 | 0/13 | 0/09 | 0/14 | 0/18 | 0/19 | 0/20 |
| پل‌فسا | 0/83 | 0/41 | 1/00 | 0/23 | 0/48 | 0/31 | 0/74 | 0/13 | 0/29 | 0/30 | 0/29 | 0/30 | 0/29 | 0/40 |
| تنگ‌بستانک | 0/43 | 1/00 | 0/40 | 0/19 | 0/45 | 0/28 | 0/61 | 0/42 | 0/72 | 0/41 | 0/60 | 0/65 | 0/76 | 0/91 |
| پل‌باغ‌صفا | 1/00 | 0/42 | 0/86 | 0/21 | 0/59 | 0/33 | 0/82 | 0/16 | 0/32 | 0/44 | 0/26 | 0/37 | 0/33 | 0/43 |

**تئوری آنتروپی**

به طور کلی، تئوری آنتروپی به دو صورت پیوسته و گسسته تعریف شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آنتروپی پیوسته، فرض بر این است که احتمال متغیرها از توزیع نرمال یا لوگ- نرمال پیروی می‌کند. ولی در حالت گسسته، باتوجه به بازه تغییرات مقادیر متغیرها، اطلاعات موجود گسسته سازی شده و جداول توزیع متغیرها تهیه می‌شوند. سپس بر مبنای این جداول، مقادیر احتمال رخداد در هر حالت محاسبه می‌شود. اما تحقیقات اخیر همچون Mogheir و Singh (2002) نشان داده که تابع توزیع احتمال بسیاری از متغیرهای کمی و کیفی در سامانه‌های منابع آب از توزیع‌های نرمال یا لوگ نرمال تبعیت نمی‌کنند. آنتروپی گسسته راهی برای اصلاح این نقیصه مهم در کاربرد آنتروپی است که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

Markus و همکاران (2003) سه شاخص R(i)، S(i) و N(i) را به شرح زیر و به صورت یک تبدیل کسری آنتروپی x با نماد R(x,y) که یک کاهش عدم قطعیت از x اگر y معلوم باشد که در واقع اطلاعات دریافتی توسط x از y نیز می‌باشد، در آنتروپی گسسته تعریف نمودند:

$$R(x,y)=\frac{T(x,y)}{H(x)} \tag{1}$$

$$S(x,y)=\frac{T(x,y)}{H(y)} \tag{2}$$

که $T(x,y)$ آنتروپی انتقال اطلاعات و $H(x)$ و $H(y)$ آنتروپی مرزی متغیرهای x و y می‌باشند. اطلاعات دریافتی و ارسالی ایستگاه iام نیز این گونه تعریف می‌شود:

$$T(x,y)=-\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} p(x_i,y_j)\log_2\left[\frac{p(x_i,y_j)}{p(x_i)p(y_j)}\right] \tag{3}$$

$$H(x)=-\sum_{i=1}^{\infty} p(x_i)\log_2 p(x_i) \tag{4}$$

$$R(i)=R(x(i),\hat{x}(i)) \tag{5}$$

که $p(x)$ احتمال روی دادن $x$، $p(x,y)$ احتمال روی دادن مشترک $x$ و $y$ و $p(x|y)$ احتمال رخ دادن $x$ به شرط $y$ می‌باشد. $x(i)$ بیان کننده داده‌های ایستگاه iام است و $\hat{x}(i)$ از رابطه خطی زیر به دست می‌آید:

$$\hat{x}(i)=a(i)+\sum_{j=1}^{I-1} y_j(i)\times b_j(i) \tag{6}$$

y(i) ماتریس داده‌ها از تمام ایستگاه‌های دیگر و a(i) وb(i) پارامترهای رگرسیون بین ایستگاه iام و تمام ایستگاه‌های دیگر است که به صورت خطی برازش داده شده است. به گونه‌ای مشابه:

$$S(i) = S(x(i), \hat{x}(i)) \qquad (7)$$

روابط فوق (به ویژه روابط (5) و (7)) بیانگر آن هستند که مقادیر بزرگتر R(i) و S(i) در واقع به ترتیب به معنای دریافت و ارسال بیشتر و بهتر اطلاعات بین یک ایستگاه و سایر ایستگاه‌های شبکه و یا برقراری بهتر ارتباط بین یک ایستگاه و سایر ایستگاه‌هاست.

بدین ترتیب مقادیر بیشتر R(i) و S(i) برای یک ایستگاه به معنای ارزش بیشتر ایستگاه یاد شده است و حفظ و نگهداری ایستگاه مزبور توصیه می‌شود.

شاخص N(i)، با نام اطلاعات تبادلی خالص، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N(i) = S(i) - R(i) \qquad (8)$$

شاخص N(i) از این نظر حائز اهمیت است که ارزش هر ایستگاه با این شاخص سنجیده می‌شود. شاخص N(i) بیان کننده کل اطلاعات خالص هر ایستگاه بوده و هر ایستگاهی که کمترین میزان N(i) را داراست کمترین رتبه و اهمیت را در شبکه پایش به خود اختصاص می‌دهد.

در نهایت، نکته‌ای که باید بدان اشاره شود این است که شاخص‌های فوق برحسب بیت محاسبه می‌شوند. به همین دلیل در روابط و معادلات از لگاریتم مبنای 2 به جای لگاریتم طبیعی استفاده شده است.

**تحلیل حساسیت**

در تئوری آنتروپی در حالت گسسته، با توجه به بازه تغییرات مقادیر متغیرها، اطلاعات موجود گسسته‌سازی شده و جداول توزیع فراوانی مشاهدات متغیرها تهیه می‌شوند. سپس با استفاده از این جداول، مقادیر احتمال رخداد در هر حالت محاسبه می‌شود. اعداد داخل جداول، تعداد تکرار مقادیر یک متغیر مثل $x$ را در یک بازه مشخص، زمانی که متغیر $y$ در یک بازه دیگر قرار دارد، نشان می‌دهد. البته این دو بازه یکسان در نظر گرفته شده‌اند. معمولاً از رابطه زیر که به نام دستور استورجس مشهور است، تعداد بازه‌ها (کلاس‌های) مناسب محاسبه می‌شود (بازرگان لاری، 1378):

$$NCI = 1 + 3.322\log(n) \qquad (9)$$

در رابطه بالا، $n$ تعداد مشاهدات و NCI تعداد بازه‌ها (کلاس‌بندی) در سری زمانی متغیر مورد نظر است. البته در بسیاری از موارد، تعداد بازه‌ها به طور دلخواه انتخاب می‌شود. در این حالت، معمولاً تعداد کلاس‌ها کمتر از 5 و بیشتر از 20 نیست. اگر تعداد کلاس‌ها کمتر از 5

انتخاب شود، داده‌ها، اطلاعات نهفته خود را از دست خواهند داد. افزایش تعداد کلاس‌ها به بیش از 20 نیز سبب طولانی و وقت‌گیر شدن محاسبات خواهد شد. اما در هر حال، این روش کاملاً سلیقه‌ای است. به همین دلیل و برای بررسی اثر کلاس‌بندی‌های مختلف در مقادیر شاخص‌های آنتروپی، چهار حالت کلاس‌بندی 3، 6، 12 و 18 در نظر گرفته شد.

## نتایج و بحث

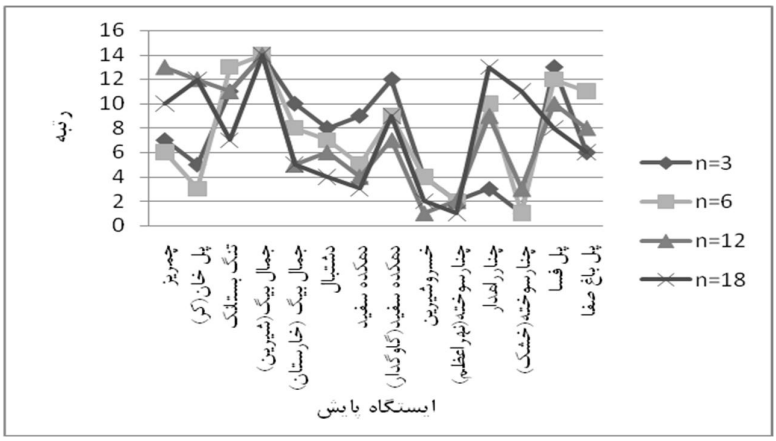
نتایج به دست آمده به شرح زیر قابل طرح‌اند:

در این تحقیق، تحلیل حساسیت فاصله دسته‌بندی‌ها بر مقادیر شاخص‌های آنتروپی S(i)، R(i) و N(i) در 14 ایستگاه منتخب حوزه بختگان- مهارلو در 4 حالت مختلف 3، 6، 12 و 18 کلاس انجام شده که نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها به ترتیب در شکل‌های 3 تا 5 نمایش داده شده است. نتایج محاسبات مقادیر شاخص‌های آنتروپی در کلیه ایستگاه‌ها برای مقادیر مختلف کلاس بندی در جدول 3 ارائه گردیده است. نتایج حاکی از تغییر مقادیر شاخص‌های آنتروپی و تأثیر در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها دارد؛ اگر چه رتبه‌بندی ایستگاه‌ها به تغیرات n حساسیت کمتری نشان داده است. Chapman در سال 1986 و Valdes و همکاران در سال 1975 در تحقیقات خود بیان داشتند که انتخاب تعداد دسته‌بندی‌ها یک مسئله عملی و انتخابی است. Markus و همکاران در سال 2003 به این نتیجه رسیدند که تغییر تعداد دسته بندی بر مقدار شاخص‌های آنتروپی تأثیر می‌گذارد. در حالی که تحقیقات Mishra و Coulibaly در سال 2010 در کانادا تغییر تعداد کلاس‌بندی را در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بی‌تأثیر می‌داند.

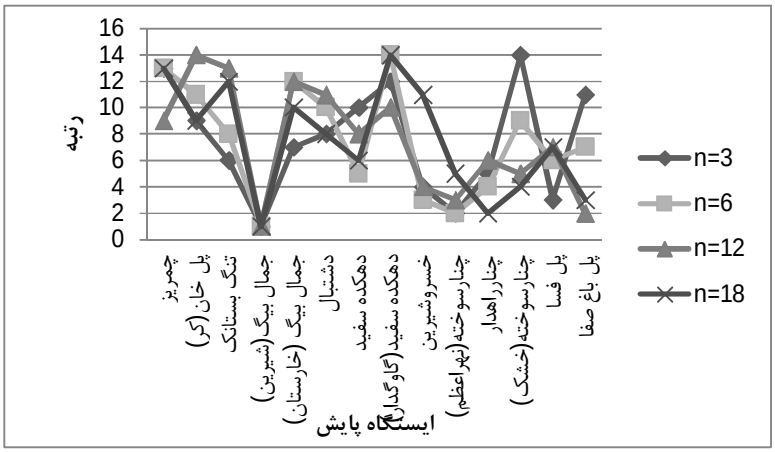
با توجه به رتبه‌بندی ایستگاه‌ها برای مقادیر مختلف کلاس بندی و شکل‌های (3) تا (5) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار n=3 بیشترین تغییرات را در مقایسه با سایر مقادیر ایجاد نموده است و حالت‌های 6، 12 و 18 کلاس رفتار کاملاً مشابهی دارند. لذا با در نظر گرفتن حداقل محاسبات، حالت 6 کلاس برای حوزه بختگان- مهارلو قابل توصیه است.ه این مقدار با رابطه استورجس نیز مطابقت دارد. همچنین، بررسی شکل‌های(3) تا(5) نشان می‌دهد که تغییر در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها با استفاده از شاخص N(i)، تغییرات زیادی را با دو شاخص دیگر (R(i) و S(i)) داراست. لذا می‌توان نتیجه گرفت این دو شاخص نسبت به تغییرات تعداد دسته‌بندی اطلاعات از حساسیت کمتری برخوردار می‌باشند.

**جدول 3: نتایج تحلیل حساسیت مقادیر R(i)، S(i) و N(i)**

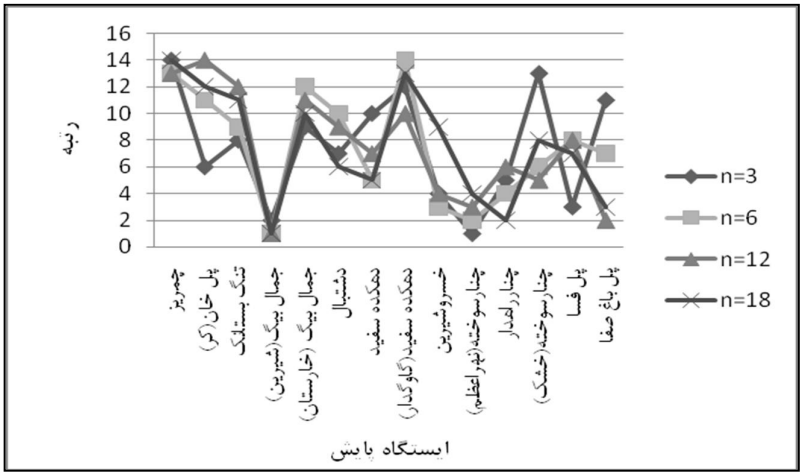
| نام ایستگاه | تعداد کلاس‌بندی (بازه) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | n= 3 | | | n= 6 | | | n= 12 | | | n= 18 | | |
| | R(i) (bits) | S(i) (bits) | N(i) (bits) | R(i) (bits) | S(i) (bits) | N(i) (bits) | R(i) (bits) | S(i) (bits) | N(i) (bits) | R(i) (bits) | S(i) (bits) | N(i) (bits) |
| چم‌ریز | 0/815 | 0/826 | 0/011 | 0/732 | 0/728 | -0/004 | 0/704 | 0/750 | 0/045 | 0/792 | 0/814 | 0/022 |
| پل‌خان (کر) | 0/656 | 0/641 | -0/015 | 0/722 | 0/710 | -0/011 | 0/752 | 0/764 | 0/012 | 0/734 | 0/766 | 0/032 |
| تنگ‌بستانک | 0/587 | 0/643 | 0/056 | 0/622 | 0/650 | 0/027 | 0/733 | 0/739 | 0/006 | 0/758 | 0/753 | -0/005 |
| جمال‌بیگ (شیرین) | 0/190 | 0/290 | 0/100 | 0/215 | 0/288 | 0/072 | 0/368 | 0/456 | 0/088 | 0/087 | 0/192 | 0/105 |
| جمال‌بیگ (خارستان) | 0/618 | 0/653 | 0/035 | 0/723 | 0/723 | 0/000 | 0/720 | 0/699 | -0/022 | 0/739 | 0/719 | -0/020 |
| دشتبال | 0/622 | 0/642 | 0/020 | 0/685 | 0/683 | -0/002 | 0/712 | 0/693 | -0/019 | 0/704 | 0/669 | -0/035 |
| دهکده‌سفید | 0/686 | 0/710 | 0/024 | 0/579 | 0/575 | -0/004 | 0/658 | 0/628 | -0/030 | 0/675 | 0/629 | -0/045 |
| دهکده‌سفید (گاوگدار) | 0/740 | 0/800 | 0/060 | 0/759 | 0/765 | 0/006 | 0/710 | 0/695 | -0/015 | 0/793 | 0/807 | 0/014 |
| خسروشیرین | 0/535 | 0/511 | -0/024 | 0/456 | 0/445 | -0/010 | 0/583 | 0/543 | -0/040 | 0/747 | 0/699 | -0/048 |
| چنارسوخته (نهراعظم) | 0/283 | 0/235 | -0/048 | 0/450 | 0/398 | -0/052 | 0/555 | 0/522 | -0/033 | 0/672 | 0/613 | -0/059 |
| چنارراهدار | 0/558 | 0/515 | -0/044 | 0/509 | 0/521 | 0/012 | 0/613 | 0/611 | -0/002 | 0/458 | 0/543 | 0/084 |
| چنارسوخته (خشک) | 0/854 | 0/800 | -0/054 | 0/677 | 0/603 | -0/074 | 0/610 | 0/578 | -0/032 | 0/663 | 0/692 | 0/029 |
| پل‌فسا | 0/428 | 0/488 | 0/060 | 0/584 | 0/611 | 0/027 | 0/650 | 0/649 | -0/002 | 0/685 | 0/687 | 0/002 |
| پل‌باغ صفا | 0/735 | 0/734 | 0/000 | 0/587 | 0/606 | 0/019 | 0/488 | 0/483 | -0/004 | 0/596 | 0/590 | -0/006 |




**شکل 3: نتایج تحلیل حساسیت رتبه‌بندی N(i)**




**شکل4: نتایج تحلیل حساسیت رتبه‌بندی R(i)**



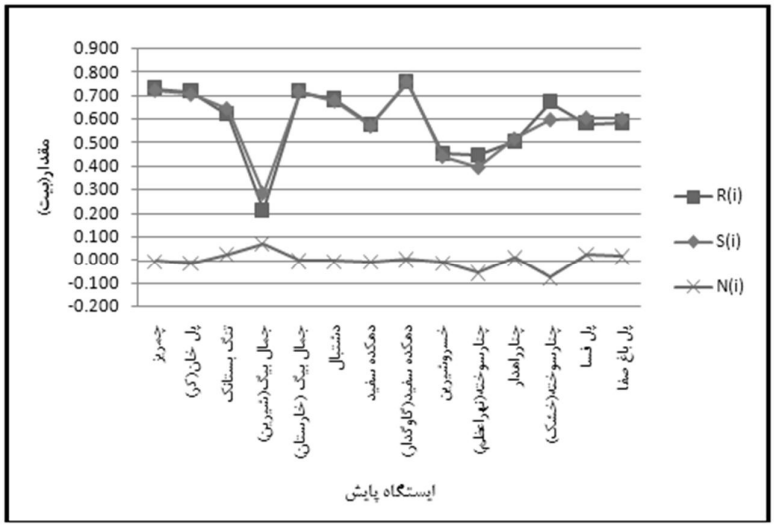

**شکل 5: نتایج تحلیل حساسیت رتبه‌بندی S(i)**

چنانچه در جدول (4) دیده می‌شود، چهار ایستگاه جمال‌بیگ (شیرین)، چنارسوخته (نهراعظم)، خسروشیرین و چنارسوخته (خشک) از نظر شاخص‌های R(i)، S(i) و N(i) پایین‌ترین رتبه‌ها را در بین ایستگاه‌های شبکه پایش داشته و امکان حذف آنها وجود دارد. ایستگاه چنارسوخته (نهراعظم) بر اساس تمامی شاخص‌ها رتبه ضعیفی داشته و اولین گزینه حذف می‌باشد. ایستگاه جمال‌بیگ (شیرین) نیز ضمن آنکه از نظر اطلاعات خالص رتبه قابل توجهی دارد اما از نظر ارتباط با سایر ایستگاه‌ها ضعیف‌ترین رتبه را به خود اختصاص داده است. از این نظر، صحت اطلاعات ثبت شده در این ایستگاه مورد تردید می‌باشد. دلایل عدم ارتباط مناسب اطلاعات این ایستگاه با سایر ایستگاه‌ها نیز ممکن است وجود عارضه‌ای طبیعی در نزدیکی محل ایستگاه و یا سهل انگاری در جمع‌آوری و ثبت آمار و اطلاعات باشد. به همین دلیل، ضروری است محل نصب و نحوه ثبت آمار و اطلاعات این ایستگاه به دقت مورد بررسی قرار گرفته و سپس در خصوص حذف و یا جابجایی آن تصمیم‌گیری شود.

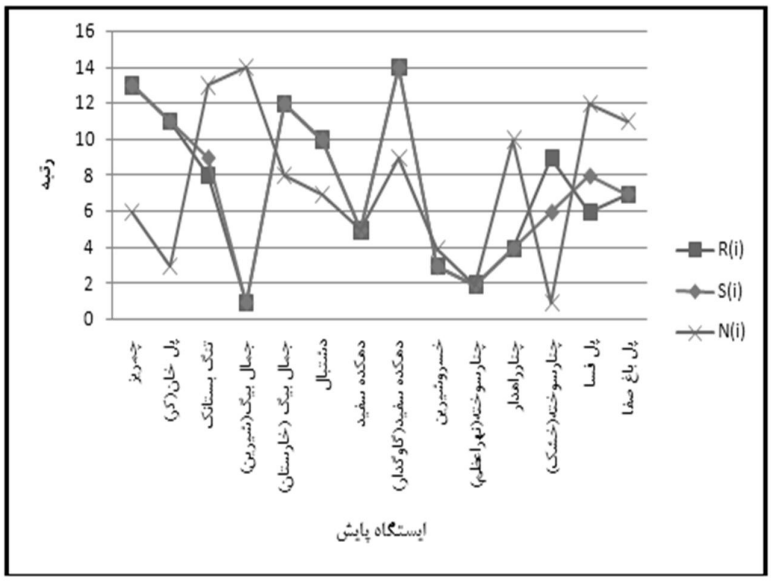
**جدول 4: رتبه‌بندی ایستگاه‌های حوزه بختگان- مهارلو بر اساس شاخص‌های آنتروپی**

| نام ایستگاه | R(i) (bits) | رتبه | S(i) (bits) | رتبه | N(i) (bits) | رتبه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| چم‌ریز | 0/732 | 13 | 0/728 | 13 | -0/004 | 6 |
| پل‌خان (کر) | 0/722 | 11 | 0/710 | 11 | -0/011 | 3 |
| تنگ‌بستانک | 0/622 | 8 | 0/650 | 9 | 0/027 | 13 |
| جمال‌بیگ (شیرین) | 0/215 | 1 | 0/288 | 1 | 0/072 | 14 |
| جمال‌بیگ (خارستان) | 0/723 | 12 | 0/723 | 12 | 0/000 | 8 |
| دشتبال | 0/685 | 10 | 0/683 | 10 | -0/002 | 7 |
| دهکده‌سفید | 0/579 | 5 | 0/575 | 5 | -0/004 | 5 |
| دهکده‌سفید (گاوگدار) | 0/759 | 14 | 0/765 | 14 | 0/006 | 9 |
| خسروشیرین | 0/456 | 3 | 0/445 | 3 | -0/010 | 4 |
| چنارسوخته (نهراعظم) | 0/450 | 2 | 0/398 | 2 | -0/052 | 2 |
| چنارراهدار | 0/509 | 4 | 0/521 | 4 | 0/012 | 10 |
| چنارسوخته (خشک) | 0/677 | 9 | 0/603 | 6 | -0/074 | 1 |
| پل‌فسا | 0/584 | 6 | 0/611 | 8 | 0/027 | 12 |
| پل‌باغ صفا | 0/587 | 7 | 0/606 | 7 | 0/019 | 11 |

Markus و همکاران در 2003سال در تحقیقات خود بیان داشتند که مقادیر شاخص‌های R(i) و S(i) از همبستگی بالاتری نسبت به شاخص N(i) برخوردارند و نتایج شکل‌های (6) و (7) و جدول 5 حاکی از آن است که مقادیر محاسبه شده برای شاخص‌های R(i)و S(i) کاملاً هم‌ارز می‌باشند. R(i) شاخصی برای مقدار اطلاعات دریافت شده از سایر ایستگاه‌ها و S(i) شاخصی برای ارسال اطلاعات به سایر ایستگاه‌ها است. در حقیقت هر دو این شاخص‌ها بیانگر ارتباط یک ایستگاه با سایر ایستگاه‌ها می‌باشند. از این نظر، رتبه‌های یکسان به دست آمده توسط این شاخص‌ها قابل توجیه و انتظار است.




**شکل 6: نمودارهای مقادیر شاخص‌های S(i)، R(i) و N(i)**




**شکل 7: نمودارهای رتبه بندی شاخص‌های S(i)، R(i) و N(i)**

**جدول 5: مقادیر ضریب همبستگی میان شاخص‌های S(i)، R(i) و N(i)**

| | S(i) | R(i) | N(i) |
|---|---|---|---|
| S(i) | 1 | 0/947 | 0/029 |
| R(i) | 0/947 | 1 | 0/154 |
| N(i) | 0/029 | 0/154 | 1 |

## نتیجه‌گیری

کارایی تئوری آنتروپی در رتبه‌بندی و تحلیل منطقه‌ای ایستگاه‌های هیدرومتری در حوزه بختگان- مهارلو مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس مقادیر شاخص‌های آنتروپی در حالت 6 کلاس ارائه شده است.چهار ایستگاه جمال‌بیگ (شیرین)، چنارسوخته (نهراعظم)، خسروشیرین و چنارسوخته (خشک) از نظر شاخص‌های R(i)، S(i) و N(i) پایین‌ترین رتبه‌ها را در بین ایستگاه‌های شبکه پایش داشته و امکان حذف آنها وجود دارد. در این بین، ایستگاه چنارسوخته (نهراعظم) بر اساس تمامی شاخص‌ها رتبه دوم را داشته و تمامی شاخص‌ها حذف آن را پیشنهاد می‌نمایند. البته باید توجه داشت که تمام نتایج به دست آمده تنها بر پایه تئوری و از دید آماری به دست آمده‌اند. لذا از طریق بازدید میدانی از محل چهار ایستگاه یاد شده و با در نظر گرفتن عواملی مانند شرایط جغرافیایی، توپوگرافی، هیدرولوژیک و اقلیمی، طرح‌های آبی در حال توسعه در منطقه، امکان احداث، بهره‌برداری و نگهداری ایستگاه، عوامل اقتصادی و جمعیت، منابع خطا و مشکلات آنها شناسایی و برطرف گردد. در صورت نیاز نیز محل ایستگاه جابجا و یا تمهیدات لازم اندیشیده شود. همچنین بررسی نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که تغییر در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها با استفاده از شاخص N(i)، تغییرات زیادی را با دو شاخص دیگر (R(i) وS(i)) داراست. لذا می‌توان نتیجه گرفت این دو شاخص نسبت به تغییرات تعداد دسته‌بندی اطلاعات از حساسیت کمتری برخوردار می‌باشند و نتایج هم ارزی را نشان می‌دهند. نکته مهم دیگری که در این بخش بایستی بدان اشاره نمود تأثیر وضعیت‌های کلاس‌بندی اطلاعات بر نتایج به دست آمده است. به نظر می‌رسد تأثیر این مورد بر نتایج این روش به طرز قابل توجهی اطمینان خاطر را از نتایج به دست آمده دور می‌سازد. در نهایت، پیشنهاد می‌شود تمامی بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش برای شبکه‌های پایش سایر حوزه‌ها انجام و نتایج با نتایج حاصل از این پژوهش مقایسه گردد. حصول نتایج مشابه می‌تواند نشان‌دهنده صحت مباحث طرح شده در این پژوهش باشد.

**منابع**

**بازرگان لاری، ع.** (1378). آمار کاربردی. انتشارات دانشگاه شیراز، شیراز.ص43.

**کریمی حسینی، آ. و بزرگ حداد، ا.** (1388). ارزیابی و طراحی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه باتلاق گاوخونی با استفاده از تئوری آنتروپی و الگوریتم ژنتیک. دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص62.

**معصومی، ف. و کراچیان، ر.** (1387). بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی. آب و فاضلاب، شماره 65، ص 12-2.

**Chen, Y.C., Wei, C. and Yeh, H.C. (2008).** Rainfall network design using kriging and entropy. Hydrological Processes, 22, pp. 340-346.

**Karamouz, M., Hafez, B. and Kerachian, R. (2005).** Water quality monitoring network for river systems using geostatistical methods. Proceedings of ASCE-EWRI World Water and Environmental Resources Congress, Alaska, USA.

**Kawachi, T. (2001).** Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan. Journal of Hydrology, 246, pp. 36-44.

**Markus, M., Knapp, H. V. and Tasker, G. D. (2003).** Entropy and generalized least square methods in assessment of the regional value of stream gages. Journal of Hydrology, 283, pp. 107-121.

**Mishra, A.K. and Coulibaly, P. (2010).** Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. Journal of Hydrology, 380, pp. 420-437.

**Mogheir, Y. and Singh, V. P. (2002).** Application of information theory to groundwater quality monitoring system. Water Resources Management, 16(1), pp. 37- 49.

**Mogheir, Y. and Singh,V.P. (2003).** Specification of information needs for groundwater management planning in developing countries. Groundwater Hydrology, 2, pp. 3-20

**Mogheir,Y., Lima, J.L. and Singh, V. P. (2004).** Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory. Hydrological Process, 18, pp. 2165-2179.

**Mondal, N. and Singh, V. P. (2012).** Evaluation of groundwater monitoring network of Kodaganar River basin from Southern India using entropy. Environmental Earth Sciences, 66(4), pp. 1183-1193.

**Sarlak, N. and Sorman, A. (2006).** Evaluation and selection of streamflow network stations using entropy methods. Turkish J. Eng. Environ. Sci., 30, pp. 91-100.

**Shannon, C. E. (1948).** A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 27, pp. 379-423.

**Valdes, J. B., Rodriguez-Iturbe, I. and Vicens, G. J. (1975).** A Bayesian Approach to Multivariate Hydrologic Synthesis. Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Report No. 201, School of Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.