

هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۵، تابستان ۱۳۹۷، صص ۱۱۵-۱۳۳

وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۸ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۷

پایش خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی

زینب علیمیرزایی^۱

رفعت زارع بیدکی^۲

رسول زمانی احمد محمودی^۳

چکیده

مطالعه‌ی وضعیت خشک‌سالی به عنوان نوعی مخاطره‌ی طبیعی به منظور تخفیف اثرات آن، اهمیت زیادی دارد. هدف از این مطالعه بررسی تغییرات مکانی و زمانی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی است. بنابراین با استفاده از اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی و با استفاده از شاخص‌های: DI, Zscore, SRI, SDI, SWI و GRI رخدادهای خشک‌سالی تعیین شد. سپس بر اساس اطلاعات به دست آمده از این شاخص‌ها، پهنه‌بندی شدت خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژی با روش کریجینگ و IDW (با توان ۱، ۲، ۳ و ۴) انجام شد. نتایج نشان داد که خشک‌سالی هواشناسی در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی در سال آبی ۸۶-۸۷ بیشترین شدت را داشته است خشک‌سالی آب‌های سطحی در همان سال و هم‌زمان با شروع خشک‌سالی هواشناسی در حوضه اتفاق افتاده است اما در سال آبی بعد غالب است. خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی نیز در سال ۸۷-۸۸ شدیدتر است. از این نظر خشک‌سالی آب زیرزمینی نسبت به خشک‌سالی هواشناسی با یک سال تأخیر رخ داده است. نتایج پهنه‌بندی حاکی از آن است که روش زمین‌آماري کریجینگ با مدل‌های گوسی و نمایی از توانایی بالایی در پهنه‌بندی خشک‌سالی برخوردار است. همچنین نقشه‌ی حاصل نشان می‌دهد بخش شرقی

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲- استادیار، دکتری هیدرولوژی برف، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران (نویسنده مسئول).

E-mail:zare.rafat@nres.sku.ac.ir

۳- استادیار، دکتری محیط‌زیست، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

حوضه نسبت به بخش‌های دیگر بارش کمتری دریافت کرده است. از پهنه‌بندی خشک‌سالی آب زیرزمینی نیز این نتیجه به دست می‌آید که بخش‌های شرقی دشت‌های حوضه از خشک‌سالی شدیدتری برخوردارند؛ و به طور کلی خشک‌سالی هیدرولوژیکی در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی در پهنه‌ی جنوب و جنوب شرقی شدت بیشتری دارد.

کلمات کلیدی: حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی، خشک‌سالی آب‌های سطحی، خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی.

مقدمه

خشک‌سالی به‌عنوان چالش مهم مدیریت منابع آب که عمدتاً بر اثر کاهش میزان بارندگی و افزایش دما رخ می‌دهد، (میلر^۱، ۱۹۹۷) از دیدگاه‌های مختلف هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی تعریف می‌شود. حدود نیمی از مناطق پرجمعیت جهان به‌شدت در مقابل خشک‌سالی آسیب‌پذیر می‌باشند و خشک‌سالی‌های شدید به خصوص در مناطقی که از نظر منابع زیست‌محیطی و اقلیمی دارای محدودیت می‌باشند، بیشتر مشاهده شده است (تمپسون^۲، ۱۹۹۹)؛ بنابراین درک ویژگی‌های خشک‌سالی، اصل اساسی در مدیریت بهینه‌ی خشک‌سالی است (شیائو و مدرس^۳، ۲۰۰۹).

کاهش میزان بارندگی در دوره‌های از زمان نسبت به میانگین درازمدت یک منطقه به‌عنوان خشک‌سالی هواشناسی^۴ تعریف می‌شود. خشک‌سالی هیدرولوژیکی^۵ با کاهش قابل توجه آب در دسترس در همه‌ی اشکال آن در چرخه‌ی هیدرولوژیکی در یک سرزمین تعریف می‌شود (نالبانتیس و تشریس^۶، ۲۰۰۹). ارتباط هیدرولوژی آب‌های سطحی و زیرزمینی در کوتاه یا بلندمدت به خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی منجر می‌شود. مستندات

1- Miller

2- Thompson

3- Shiau and Modarres

4- Meteorology Drought

5- Hydrological Drought

6- Nalbantis and Tsakiris

علمی تعدد تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی خشک‌سالی در ایران و جهان را نشان می‌دهد. این تحقیقات جنبه‌های مختلف از خشک‌سالی‌ها را مورد بررسی قرار داده است که نشان از اهمیت موضوع و گستردگی وقوع خشک‌سالی در دنیا دارد. از مطالعاتی که به بررسی هم‌زمان خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژی در ایران پرداخته‌اند می‌توان به تحقیقات رئیسی و وفاه خواه (۱۳۹۰)، اکرامی و همکاران (۱۳۹۲)، امیدوار و همکاران (۱۳۹۳)، بهشتی راد (۱۳۹۴)، کریمی و همکاران (۱۳۹۵)، مرادی و همکاران (۲۰۰۹)، تبری و همکاران (۲۰۱۳)، نیکبخت و همکاران (۲۰۱۳)، سلیمانی ساردو و بهره‌مند (۲۰۱۴)، آذره و همکاران (۲۰۱۴)، کاظم‌زاده و ملکیان (۲۰۱۵)، علیجانی و یوسفی رادمندی (۲۰۱۵)، افضلی و همکاران (۲۰۱۶) اشاره کرد. همچنین بویان و همکاران^۱ (۲۰۰۶) در منطقه‌ی آراویل هند، مندسینو و همکاران^۲ (۲۰۰۸) در مناطق کالابریا با اقلیم مدیترانه‌ای، خان و همکاران^۳ (۲۰۰۸) در یکی از دشت‌های کشور استرالیا، کیم و همکاران^۴ (۲۰۰۹) در سئول در کره‌ی جنوبی، نالبانتیس و تشریس (۲۰۰۹) در حوضه‌ی رودخانه‌ی اوینوس در یونان، ادوسا و همکاران^۵ (۲۰۱۰) در حوضه‌ی رودخانه‌ی آواش اتیوپی، فیشر و همکاران^۶ (۲۰۱۳) در حوضه‌ی جنوب چین، گنگولی و گنگولی^۷ (۲۰۱۶) در ایالات متحده، الورنتاد و همکاران^۸ (۲۰۱۷) در حوضه‌ی نیجر جنوبی، نیجریه به تحقیق و بررسی خشک‌سالی‌های هواشناسی، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی پرداختند.

با توجه به افزایش مصرف آب به خاطر افزایش جمعیت و همچنین نقش حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی در تأمین منابع آب مورد نیاز برای کشاورزی و تولید برق، در این پژوهش سعی شده است تا به بررسی ویژگی‌های زمانی و مکانی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در این حوضه‌ی آبخیز پرداخته شود.

- 1- Bhuiyan et al.,
- 2- Mendicino et al.,
- 3- Khan et al.,
- 4- Kim et al.,
- 5- Edossa et al.,
- 6- Fisher et al.,
- 7- Ganguli and Ganguly
- 8- Oloruntade et al.,

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی با مساحتی بالغ بر ۱۴۴۷۶ کیلومتر مربع، در حدود ۲۳ درصد از کل مساحت حوضه‌ی آبخیز کارون بزرگ را شامل می‌شود و در محدوده‌ی جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی به زیرحوضه‌های فرعی متعددی تقسیم می‌شود. موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی در شکل (۱) آمده است.

بعد از بررسی اولیه آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی، تبخیرسنجی و هیدرومتری در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی، از بین ۲۹ ایستگاه‌ها باران‌سنجی، ۷ ایستگاه، از ۱۶ ایستگاه تبخیرسنجی، ۴ ایستگاه و از ۳۴ ایستگاه هیدرومتری، ۸ ایستگاه با دوره آماری ۳۰ سال (۱۳۶۴-۱۳۹۴) انتخاب شدند. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول (۱) و موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین به منظور بررسی سطح تراز آب زیرزمینی در دشت‌های حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی از بین ۱۶۴ حلقه چاه موجود در منطقه ۴۰ حلقه چاه با دوره‌ی آماری ۳۰ سال (۱۳۶۴-۹۴) انتخاب گردید.

شاخص‌های خشک‌سالی

شاخص دهک‌ها (DI)^۱

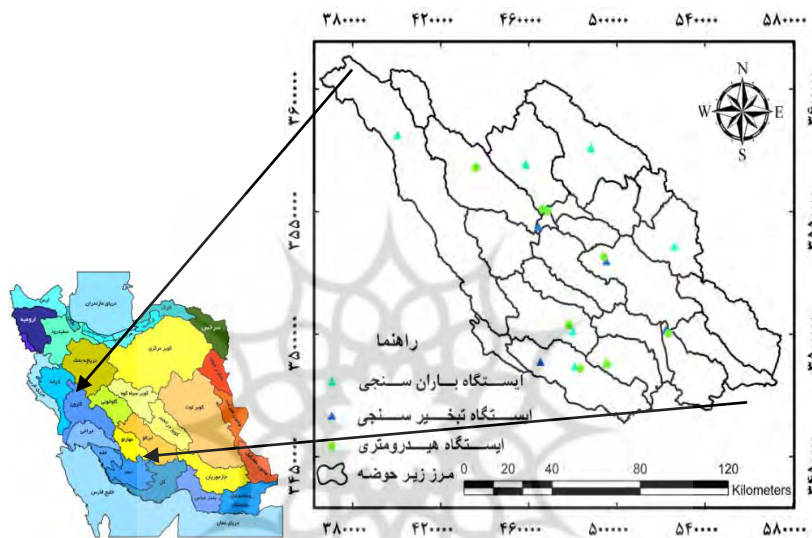
این شاخص با مرتب کردن داده‌های بارندگی ماهانه در دهک‌ها روش دیگری در پایش وضعیت خشک‌سالی است. این شاخص به وسیله گیبس و ماهر^۲ (۱۹۶۷) به منظور رفع بعضی از ضعف‌های موجود در روش درصد نرمال ارائه شد. تعیین دامنه‌ی دهکی با استفاده از رابطه‌ی (۱) صورت می‌گیرد:

1- Deciles

2- Gibbs and Maher

$$D_i = \frac{N+1}{10} \times i \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

در رابطه‌ی (۱)، D_i : دهک i ام، i : شماره دهک و N تعداد داده‌های بارندگی است.



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی و ایستگاه‌های مورد مطالعه

شاخص Z Index و شاخص جریان‌های رودخانه‌ای (SDI)

شاخص Z برخلاف شاخص SPI نیاز به تبدیل داده‌ها و برازش توزیع مانند گاما و یا پیرسون نوع سه ندارد؛ و با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (حجازی‌زاده، ۱۳۹۰).

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{S.D} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

در رابطه‌ی (۲)، X_i : بارش، \bar{X} : میانگین مجموع بارش و D انحراف معیار بارش در طول دوره‌ی مورد نظر

شاخص خشکسالی جریان‌های رودخانه‌ای توسط نالبانتیس (۲۰۰۸) ارائه شد و سپس در سال ۲۰۰۹ توسط نالبانتیس و تکیرس برای مشخص کردن خشکسالی هیدرولوژیکی توسعه داده شد. در این روش فرض می‌شود که سری‌های زمانی حجم جریان‌های رودخانه‌ای ماهانه به صورت Q_{ij} موجود می‌باشد که در آن اندیس i سال هیدرولوژیکی و اندیس j ماه مربوط به سال هیدرولوژیک می‌باشد.

جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی

ردیف	نام ایستگاه	رودخانه	طول جغرافیایی عرض جغرافیایی (UTM)	ارتفاع	نوع ایستگاه
۱	ارمند	کارون	۴۸۰۰۰۱	۳۵۰۱۲۰۲	باران‌سنجی
۲	آب ترکی	بازفت	۴۰۰۲۹۲	۳۵۸۱۲۱۹	باران‌سنجی
۳	بروجن	کیار	۵۲۶۱۸۱	۳۵۳۶۰۰۸	باران‌سنجی
۴	زرین درخت	خانمیرزا	۴۹۵۰۵۶	۳۴۸۷۹۵۸	باران‌سنجی
۵	شهرکرد	خررو	۴۸۸۲۷۴	۳۵۷۶۰۲۰	باران‌سنجی
۶	فارسان	بابا حیدر	۴۵۸۵۹۳	۳۵۶۹۳۱۷	باران‌سنجی
۷	لردگان	چشمه‌برم	۴۸۰۷۹۸	۳۴۸۶۹۴۳	باران‌سنجی
۸	آورگان	چغاخور	۴۹۵۲۸۴	۳۵۲۹۸۴۰	تبخیرسنجی
۹	بهشت‌آباد	بهشت‌آباد	۴۶۴۴۲۴	۳۵۴۳۹۰۷	تبخیرسنجی
۱۰	سولگان	سولگان	۵۲۲۱۴۳	۳۵۰۱۶۳۷	تبخیرسنجی
۱۱	منج	منج	۴۶۵۳۱۷	۳۴۸۸۸۰۸	تبخیرسنجی
۱۲	ارمند	کارون	۴۷۸۲۶۳	۳۵۰۳۹۵۲	هیدرومتری
۱۳	پل ماری	چغاخور	۴۹۴۱۷۴	۳۵۳۱۷۷۷	هیدرومتری
۱۴	تنگ درکش ورکش	جونقان	۴۶۶۱۵۳	۳۵۵۱۲۹۱	هیدرومتری
۱۵	دزک‌آباد	بیرگان	۴۳۶۱۱۰	۳۵۶۸۲۰۸	هیدرومتری
۱۶	زرین درخت	خانمیرزا	۴۹۵۵۲۳	۳۴۸۷۹۱۵	هیدرومتری
۱۷	سولگان	سولگان	۵۲۳۴۶۴	۳۵۰۰۴۷۹	هیدرومتری
۱۸	کوه سوخته	کیار	۴۶۸۵۴۶	۳۵۵۰۴۰۲	هیدرومتری
۱۹	لردگان	چشمه‌برم	۴۸۳۳۴۱	۳۴۸۶۰۷۲	هیدرومتری

$$SDI_{ik} = \frac{V_{ik} - V_k}{S_k} \quad (3) \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

در رابطه‌ی (۳)، V_{iK} حجم تجمعی جریانات رودخانه‌ای V_K و S_K به ترتیب میانگین مجموع حجم دبی و انحراف معیار حجم جریانات تجمعی برای دوره‌ی مبنای k می‌باشد (نالبانتیس و تشکیرس، ۲۰۰۹).

جدول (۲) طبقه‌بندی شاخص دهک‌ها

شماره دهک	وضعیت	مقدار درصد وقوع
۱	خشک‌سالی حاد	کمتر از ۱۰٪
۲	خشک‌سالی شدید	۱۰-۲۰٪
۳	خشک‌سالی متوسط	۲۰-۳۰٪
۴	خشک‌سالی ضعیف	۳۰-۴۰٪
۵	نرمال	۴۰-۵۰٪
۶	نرمال	۵۰-۶۰٪
۷	کمی مرطوب	۶۰-۷۰٪
۸	مرطوب	۷۰-۸۰٪
۹	بسیار مرطوب	۸۰-۹۰٪
۱۰	فوق‌العاده مرطوب	بیشتر از ۹۰ درصد

شاخص سطح آب استاندارد (SWI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)^۲

شاخص سطح آب استاندارد در سال ۲۰۰۴ توسط بویان و همکاران^۳ جهت پایش نوسان‌های سطح سفره‌های آب زیرزمینی در بررسی خشک‌سالی‌های هیدرولوژیک ارائه شده است (بویان و همکاران، ۲۰۰۴). شاخص SWI برای تعیین میزان انحراف سطح آب از مقدار میانگین در مقیاس‌های زمانی متعدد مورد استفاده قرار گرفت؛ و بر اساس رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود (ژائو و لیو^۴، ۲۰۱۶):

- 1- Standardized Water Index
- 2- Groundwater Resource Index
- 3- Bhuiyan et al.,
- 4- Zhao and Liu

$$SWI = \frac{W_{ij} - W_{im}}{\sigma} \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

در رابطه‌ی (۴)، W_{ij} ، سطح ایستایی چاه‌های پیرومتری i تا j ، W_{im} ، میانگین سطح ایستایی و σ انحراف معیار است. جدول (۳) طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی را بر اساس شاخص SWI نشان می‌دهد.

جهت محاسبه این شاخص از معادله‌ی زیر استفاده می‌شود (مندسینو و همکاران،

۲۰۰۸)

$$GRI_{y,m} = \frac{D_{y,m} - D_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

در رابطه‌ی (۵)، $GRI_{y,m}$ ، شاخص منابع آب زیرزمینی، $D_{y,m}$ ، مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در سال y و ماه m ، $D_{D,m}$ ، میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی در ماه m ، $\sigma_{D,m}$ ، انحراف معیار سطح آب زیرزمینی در ماه m

محاسبه‌ی شاخص برای هر منطقه بر پایه‌ی آمار درازمدت برای یک دوره‌ی آماری مشخص صورت می‌گیرد. این آمار درازمدت به توزیع آماری مناسب گاما برازش یافت. تابع حاصل‌شده به منظور پیدا کردن احتمال تجمعی داده‌ها برای یک ایستگاه و برای ماه معین و مقیاس زمانی گوناگون می‌تواند استفاده شود. طبقات مختلف شاخص GRI، SDI، Z و SWI در جدول (۳) ارائه شده است.

تعیین الگوی توزیع مکانی شاخص‌ها

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خشک‌سالی، وسعت منطقه‌ای و توزیع مکانی این پدیده است. به منظور توزیع مکانی اطلاعات نقطه‌ای با توجه به نمونه‌برداری‌های انجام شده و همچنین تغییرات زمانی و مکانی هر متغیر، نیاز به مدل‌هایی است که بتوان رفتار متغیر موردبررسی را در نقاط مجهول شبیه‌سازی نمود. مدل‌های احتمالی که به آن‌ها

روش‌های زمین‌آمار^۱ اطلاق می‌شود مانند کریجینگ^۲، کو کریجینگ^۳، TPSS^۴ و WMA^۵، به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار هستند (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۰). بررسی همبستگی مکانی و ترسیم واریوگرام، تخمین در نقاط نمونه‌برداری نشده، تهیه نقشه‌های تخمین و پهنه‌بندی توسط نرم‌افزارهای Arc GIS و GS plus انجام شد. تخمین و برآورد متغیر پیوسته در مناطقی که مقدار آن نامشخص است درون‌یابی^۶ گفته می‌شود. روش‌های مختلفی برای برآورد متغیرهایی که تغییرات زمانی و مکانی دارند وجود دارد. این روش‌ها مربوط به نحوه‌ی محاسبه‌ی وزنی است که به نقاط مشاهده شده اطراف نقطه مجهول داده می‌شود (خلیقی سیکارودی، ۱۳۸۷). با توجه به سایر تحقیقات انجام‌شده و به منظور بسط و گسترش اطلاعات نقطه‌ای و تبدیل اطلاعات به صورت مکانی روش زمین‌آمار کریجینگ و روش وزن‌دهی عکس فاصله انتخاب گردید.

جدول (۳) طبقه‌بندی مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی

وضعیت	Z-SDI-GRI	SWI
بدون خشک‌سالی	بزرگ‌تر از صفر	کوچک‌تر از صفر
خشک‌سالی ملایم	۰ تا -۰/۹۹	۰ تا ۰/۹۹
خشک‌سالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹	۱ تا ۱/۴۹
خشک‌سالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۹۹ تا ۱/۵
خشک‌سالی بسیار شدید	≤ -۲	≥ ۲

کریجینگ

کریجینگ یک برآوردگر خطی است که به صورت فرمول زیر اعمال می‌شود.

- 1- Geostatistical methods
- 2- Kriging
- 3- CoKriging
- 4- Thin Plate Smoothing Splines
- 5- Weighted Moving Average
- 6- Interpolation

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i z(x_i) \quad (۶) \text{ رابطه‌ی}$$

که در آن: Z = مقدار متغیر مکانی برآورد شده، $z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه $w_i(x_i)$ = وزن آماری که به نمونه x_i داده شود.

روش وزن دهی عکس فاصله (IDW^1)

در این روش فرض بر این است که نقاط از مکان تأثیر می‌پذیرند. به بیان دیگر پیکسل‌های نزدیک به نقاط نمونه اثر بیشتری نسبت به پیکسل‌های دورتر از نقاط نمونه می‌گیرند. پس این روش در شرایطی مناسب است که با افزایش فاصله از نقاط نمونه وزن سلول‌ها کاهش می‌یابد و تأثیرگذاری کمتر می‌شود. و در نهایت، ارزیابی روش‌های درون‌یابی از تکنیک اعتبار سنجی متقاطع جک‌نایف با معیارهای خطا گیری ضریب تبیین R^2 ، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$)، میانگین مربعات خطا (MSE^3) و میانگین خطای تخمین (MAE^4) صورت گرفته است.

بحث و نتایج

با توجه به شکل (۱) تمام ایستگاه‌های هواشناسی در سال آبی ۸۷-۱۳۸۶، در دهک اول قرا گرفته‌اند و بیشترین شدت خشکسالی در حداکثر ایستگاه‌ها را شاهد بوده‌ایم. شکل (۲) نشان‌دهنده‌ی وضعیت خشکسالی‌های منطقه‌ی مورد مطالعه بر اساس شاخص Z score است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که در طی دوره‌ی زمانی ۳۰ ساله (۹۴-۱۳۶۴)، منطقه‌ی مورد مطالعه تنها یک بار خشکسالی بسیار شدید را به طور گسترده در سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ تجربه کرده است به طوری که از ۱۱ ایستگاه هواشناسی ۱۰ ایستگاه خشک‌سالی شدید و بسیار شدید را ثبت نموده‌اند. نتایج حاصل از ارزیابی

1- Inverse Distance Weighting

2- Root Mean Squared Error

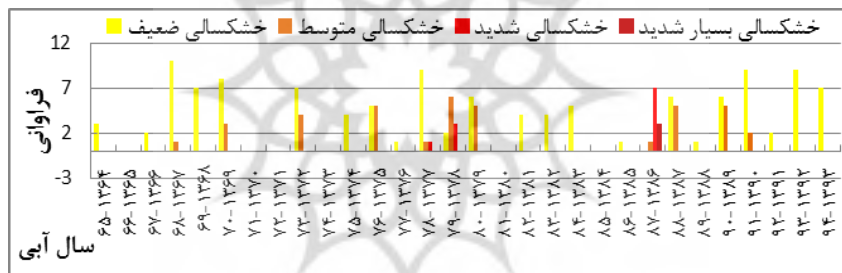
3- Mean Squared Error

4- Mean Absolute Error

شاخص Z با نتایج پژوهش هاشمی (۱۳۸۹) در استان چهارمحال و بختیاری مطابقت دارد.

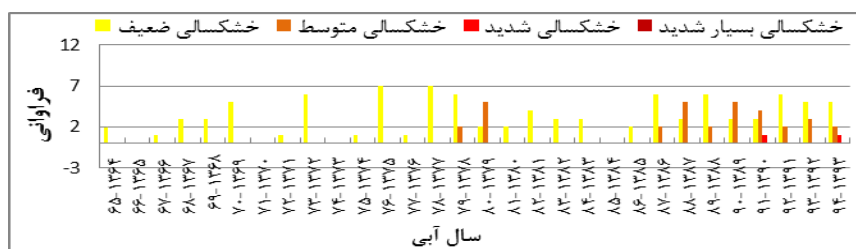


شکل (۲) فراوانی خشک‌سالی هواشناسی بر اساس شاخص DI در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی، (۹۴-۱۳۶۴)



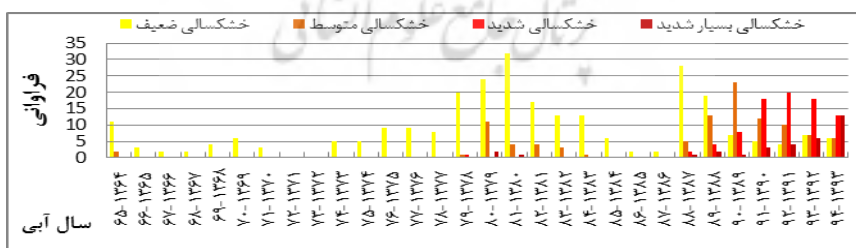
شکل (۳) فراوانی خشک‌سالی هواشناسی بر اساس شاخص Z score در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی (۹۴-۱۳۶۴)

نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که هم‌زمان با وقوع خشک‌سالی هواشناسی در سال آبی ۱۳۸۶-۸۷ با کاهش میزان جریان رودخانه‌ها مواجه می‌شویم و خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای در سال آبی بعد (۱۳۸۷-۸۸) به صورت بارز نمایان می‌گردد. در طی سال‌های اخیر وضعیت شاخص SDI از حالت خشک‌سالی ملایم تا خشک‌سالی شدید نوسان داشته است؛ و به طور کلی تمامی ایستگاه‌ها خشک‌سالی متوسط را تجربه نموده‌اند. علت این امر می‌تواند به مانایی کم برف و رابطه‌ی بین بارش و رواناب مربوط باشد. شدیدترین خشک‌سالی جریان در طی سی سال مربوط به ایستگاه لردگان در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ می‌باشد که مقدار شاخص SDI در سال مذکور برابر با $1/83$ - است.



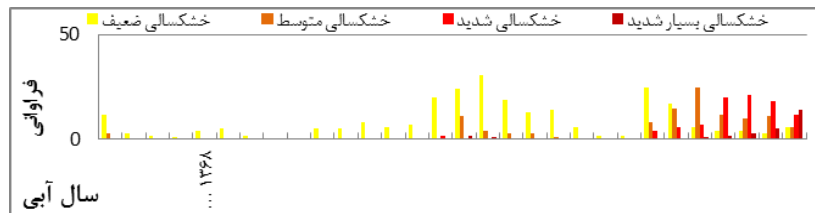
شکل (۴) فراوانی خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی بر اساس شاخص SDI در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی (۱۳۶۴-۹۴)

نتایج حاصل از محاسبات شاخص SDI با نتایج پژوهش‌های مرادی و همکاران (۲۰۰۹) و تبری و همکاران (۲۰۱۳)، مطابقت ندارد؛ که نشان‌دهنده یکسان نبودن شدت خشکسالی جریان رودخانه‌ای در مناطق مختلف می‌باشد و شدت خشکسالی مذکور در مناطق مختلف متفاوت می‌باشد. تحلیل شاخص SWI نمایشگر این است که شروع افت سطح تراز آب زیرزمینی برای چاه‌های موجود در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی از سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ بوده که با یک سال تأخیر نسبت به خشکسالی هواشناسی رخ داده است. بررسی نتایج شاخص GRI در تمام چاه‌های پیژومتری موجود در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی نشان می‌دهد که شروع خشکسالی هیدروژئولوژیکی از سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ بوده؛ و شدت خشکسالی آب زیرزمینی در سال‌های اخیر به صورت چشم‌گیری در تمامی چاه‌های موجود در دشت‌های منطقه‌ی مورد مطالعه افزایش یافته به طوری که سطح آب زیرزمینی افت شدیدی را طی ۳۰ سال گذشته داشته است.



شکل (۵) فراوانی خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی بر اساس شاخص SWI در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی (۱۳۶۴-۹۴)

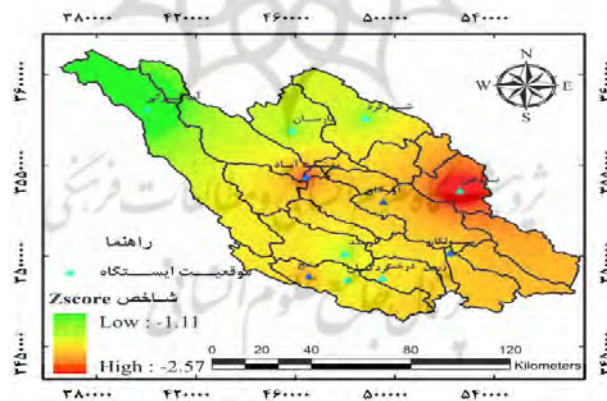
به طور کلی نتایج محاسبات شاخص‌های هیدرولوژیکی حاکی از وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی با تأخیر زمانی یک‌ساله نسبت به خشک‌سالی هواشناسی می‌باشد؛ و شدت وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی در سال‌های اخیر نسبت به شدت خشک‌سالی هواشناسی بیشتر بوده و منطقه‌ی مورد مطالعه در طی سال‌های اخیر خشک‌سالی هیدرولوژیکی را بیشتر تجربه نموده است. دلیل اصلی عدم انطباق خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به لحاظ توزیع زمانی و مکانی بارش و مکانیزم ذخیره‌ای آب زیرزمینی می‌باشد. نتایج حاصل‌شده از شاخص GRI با نتایج مطالعات اکرامی و همکاران (۱۳۹۲)، مندسیتو و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد. توزیع مکانی شاخص Z score با استفاده از دو روش کریجینگ و IDW انجام شد و در نهایت با توجه به ارزیابی روش‌ها نقشه‌ی پهنه‌بندی خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از بهترین مدل با کمترین خطا برای سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ ترسیم شد. تحلیل نقشه‌ی پهنه‌بندی تهیه شده با استفاده از شاخص Z نشان‌دهنده‌ی رخداد خشک‌سالی حاد با شدت بیشتری در ایستگاه بروجن است و هر چه از محل ایستگاه به سمت شمال و جنوب حوضه حرکت کنیم از شدت خشک‌سالی کاسته می‌شود همچنین در مرکز حوضه‌ی خشک‌سالی با شدت بیشتری نسبت به نقاط مجاور رخ داده و از سمت مرکز به غرب حوضه از شدت خشک‌سالی کاسته می‌شود. نقشه‌های پهنه‌بندی شدت خشک‌سالی آب زیرزمینی با توجه به چاه‌های پیرومتری موجود در دشت‌ها برای دشت‌های شهرکرد، بروجن- سفیددشت و گندمان- بلداجی در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ با استفاده از بهترین مدل در روش کریجینگ ترسیم شده است. پهنه‌بندی خشک‌سالی آب زیرزمینی نشان می‌دهد شدت خشک‌سالی آب زیرزمینی در شمال شرقی و جنوب شرقی دشت بیشتر است. دشت شهرکرد یکی از مهم‌ترین دشت‌های موجود در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی است که در طی سال‌های اخیر با افت شدید آب‌های زیرزمینی مواجه شده؛ که این افت در سال ۹۴-۱۳۹۳ به بیشترین حد خود رسیده است.



شکل (۶) فرآوانی خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی بر اساس GRI در حوضه آبخیز کارون شمالی (۹۴-۱۳۶۴)

جدول (۴) مناسب‌ترین مدل میان‌یابی بر مبنای معیارهای خطا برای شاخص Z score (۸۷-۱۳۸۶)

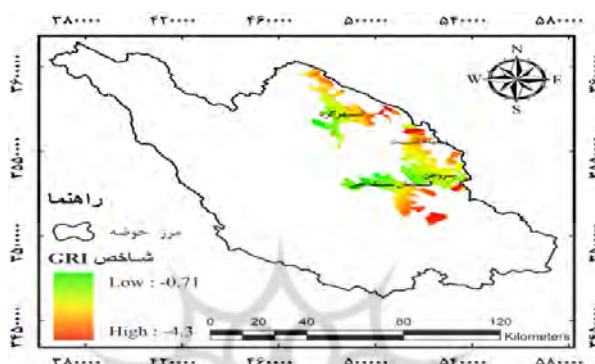
معیار خطا			R ²	مدل	روش میان‌یابی
RMSE	MAE	MSE			
۰/۴۳	۰/۳۵	۰/۱۸	۰/۹۸	Spherical	Kriging
۰/۴۰	۰/۳۳	۰/۱۶	۰/۹۳	Exponential	
۰/۳۹	۰/۳۱	۰/۱۵	۰/۸۰	Gaussian	IDW
۰/۳۸	۰/۲۸	۰/۱۴	-	-	



شکل (۷) توزیع شاخص Zscore در سال خشک‌سالی شدید - روش IDW (۸۷-۱۳۸۶)

در پژوهش حاضر برای انجام پهنه‌بندی خشک‌سالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی از روش درون‌یابی کریجینگ با مدل نمایی و گوسی به دلیل پایین بودن مقادیر خطا استفاده نمودیم که انتخاب روش مذکور در این پژوهش با پژوهش‌های معروفی و

همکاران (۱۳۸۸)، رئیسی و وفاخواه (۱۳۹۰)، ذبیحی و همکاران (۱۳۹۰)، امیدوار و همکاران (۱۳۹۳)، بهشتی راد (۱۳۹۴) افضلی و همکاران (۲۰۱۶)، مطابقت دارد.



شکل (۸) وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی دشت‌های حوضه آبخیز کارون شمالی - GRI، روش Kriging (۹۴-۱۳۹۳)

جدول (۵) مناسب‌ترین مدل میان‌یابی بر مبنای معیارهای خطا برای دشت‌های حوضه آبخیز کارون شمالی (۹۴-۱۳۹۳)

ضریب تبیین R^2	معیار خطا			مدل	روش میان‌یابی	منطقه	شاخص سال آبی ۱۳۹۳-۹۴
	RMSE	MAE	MSE				
۰/۹۵	۰/۳۵	۰/۲۸	۰/۱۲	Gaussian	Kriging	دشت شهرکرد	GRI ۱۳۹۳-۹۴
۰/۸۴	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۳۱	Gaussian	Kriging	دشت بروجن	
۰/۸۹	۰/۵۴	۰/۳۶	۰/۲۹	Exponential	Kriging	دشت گندمان بلداجی	

نتیجه‌گیری

میزان تداوم و شدت خشکسالی‌ها به ویژه در مورد منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر در طول دوره آماری مورد مطالعه قابل ملاحظه بوده است. استفاده هم‌زمان از

شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌تواند ابزاری مناسب جهت جداسازی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و همچنین ارزیابی خشک‌سالی منطقه باشد.

میزان تأخیر خشک‌سالی هیدرولوژیکی در منابع آب سطحی و زیرزمینی نسبت به خشک‌سالی هواشناسی یکسان نیست و علت این تفاوت در سرعت حرکت جریان‌های سطحی و زیرزمینی است. در منطقه‌ی مورد مطالعه در ادامه خشک‌سالی هواشناسی با تأخیر زمانی یک‌ساله با خشک‌سالی هیدرولوژیکی در منطقه مواجه می‌شویم، وقوع یک سال بسیار کم باران حتی با نرمال بودن بارش در سال بعد از آن، می‌تواند تأثیرات منفی درازمدتی بر منابع آب زیرزمینی بگذارد. همچنین از لحاظ مکانی هرچه از مناطق شمالی به سمت جنوب شرقی و جنوب حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی حرکت کنیم شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی افزایش می‌یابد. تداوم و شدت خشک‌سالی‌ها به‌ویژه خشک‌سالی آب زیرزمینی در سال‌های اخیر در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی شدید بوده است و تمامی دشت‌های موجود در حوضه طی سال‌های اخیر با افت شدید سطح ایستابی روبرو بوده‌اند در حالی که کاهش معنی‌بارندگی در منطقه فقط یک سال اتفاق افتاده است؛ بنابراین به دلایلی چون تغییر در نظام بارندگی، از جمله تغییر شکل بارش از برف به باران و تغییر زمانی ریزش‌های جوی، همچنین بهره‌برداری بیش از حد و غیراصولی از منابع آب زیرزمینی این افت در حال افزایش می‌باشد.

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان‌دهنده:

- ۱- شدت وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی یکسان نیست.
- ۲- خشک‌سالی هواشناسی با تأخیر زمانی یک‌ساله در حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی منجر به وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی آب زیرزمینی می‌گردد.
- ۳- در مناطقی از حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی که شدت وقوع پدیده خشک‌سالی هواشناسی شدید است به همان میزان شدت وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی نیز شدید می‌باشد.

۴- در اعلام وضعیت خشک‌سالی مناطق، تنها شاخص خشک‌سالی نقش ندارد و با همان اهمیت، روشی که برای تحلیل مکانی استفاده می‌شود، نیز اهمیت دارد.

با آنکه حوضه‌ی آبخیز کارون شمالی سرچشمه بخش قابل توجهی از منابع آب سطحی است تکیه مصارف بر آب زیرزمینی است که به دلیل تمرکز جمعیت، افزایش نیاز آبی حوضه و حوضه‌های مجاور، رخداد خشک‌سالی‌های شدید به ویژه در طی دهه‌ی اخیر و تأمین آب بخش صنعت و کشاورزی به شدت تحت تنش آبی قرار دارد و این امر موجب شده است دشت‌های موجود در این حوضه در محدوده‌ی دشت‌های ممنوعه قرار بگیرند. برداشت‌های مازاد و بی‌رویه علاوه بر تشدید تنگناها در تأمین آب بخش‌های اقتصادی و جمعیتی باعث افت کیفیت آب در این دشت‌ها شده است. بنابر این، بر اساس پتانسیل منابع و توان بالقوه دشت‌ها می‌توان با تغذیه‌ی مصنوعی، توسعه‌ی شیوه‌های بهره‌برداری از منابع آب به صورت چند مصرفی (فاضلاب تولیدی) و افزایش ورودی هیدرولوژیکی به دشت از طریق تسریع در عملیات انتقال آب برای احیا دشت‌ها اقدام نمود. نتایج این پژوهش می‌تواند در جهت مدیریت بهینه‌ی منابع آبی و برنامه‌ریزی‌های عرضه و تقاضای آب مفید باشد و مدیران و برنامه‌ریزان و کارشناسان را قادر سازد تا به‌موقع تمهیدات لازم را تدارک دیده و راهکارهای عملی را ارائه دهند.

منابع

- اکرامی، محمد؛ ملکی‌نژاد، حسین و محمدرضا اختصاصی (۱۳۹۲)، بررسی تأثیر خشک‌سالی‌های اقلیمی و آب‌شناختی بر منابع آب زیرزمینی، نشریه‌ی علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، سال هفتم، شماره ۲۰، صص ۴۷-۵۴.
- بهشتی‌راد، مسعود (۱۳۹۴)، بررسی تغییرات مکانی خشک‌سالی با روش‌های زمین‌آماری و شاخص توزیع استاندارد در استان کرمان، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال پنجم، شماره ۲۰، صص ۱۱۸-۱۳۰.
- خلیقی سیگارودی، شهرام (۱۳۸۷)، تعیین بهترین روش زمین‌آماری در تهیه‌ی نقشه‌ی خطوط هم‌باران (مطالعه موردی استان مازندران)، اولین همایش بین‌المللی تغییر اقلیم و گیاه‌شناسی درختی در اکوسیستم‌های خزری، ۲۵ و ۲۶ اردیبهشت، ساری.
- ذبیحی، علیرضا؛ سلیمانی، کریم؛ شعبانی، مرتضی و آبروش صادق (۱۳۹۰)، بررسی توزیع مکانی بارش سالانه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری (مطالعه‌ی موردی: استان قم)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۳، شماره ۷۸، صص ۱۰۱-۱۱۲.
- کریمی، مهشید؛ شاهدی، کاکا و خسروی، خهبات (۱۳۹۵)، بررسی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی در حوضه‌ی آبخیز قره‌سو، مجله‌ی فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۲، شماره ۱، صص ۱۵۹-۱۷۰.
- وفاخواه، مهدی و منصور رجبی (۱۳۸۴)، کارایی نمایه‌های خشک‌سالی هواشناسی برای پایش و ارزیابی خشک‌سالی‌های حوضه‌ی آبخیز دریاچه‌های، بختگان، طشک و مهارلو، مجله‌ی بیابان، دوره ۱۰، شماره ۲، صص ۳۶۹-۳۸۲.
- Oloruntade, A,J. Mohammad, T,A. Ghazali, A,H. Wayayok, A. (2017), **Analysis of meteorological and hydrological droughts in the Niger-South Basin, Nigeria**, Global and Planetary Change, Vol. 155, PP. 225-233
- Bhuiyan, C. Singh, R.P. and Kogan, F.N. (2006), **Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based**

- on ground and remote sensing data**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol.8, PP.289–302.
- Edossa, DC. Babel, MS. Gupta, AD. (2010), **Drought analysis in the awash river basin, Ethiopia**, Water resources management, 24(7): PP. 1441-60.
- Fisher, T. Gemmer, M. Su B. and Scholten, T. (2013), **Hydrological long-term dry and wet periods in the Xijiang River basin, South China**, Hydrology and Earth system Sciences, Vol.17, PP, 135-148.
- Kim, D.W. Byun, H.R. and Choi, K.S. (2009), **Evaluation, modification and application of the effective drought index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea**, Journal of Hydrology 378: PP.1-12.
- Mendicino, G. Senatore, A. and. Versace, P., (2008), **A groundwater resource index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate**, Journal of Hydrology, 357(3-4): PP. 282-302.
- Zhao, X. and Liu, Y., (2016), **Evapotranspiration Partitioning and Response to Abnormally Low Water Levels in a Floodplain Wetland in China**, Advances in Meteorology, 2016: 3695427, PP. 11.