

جغرافیا و توسعه شماره ۴۸ پاییز ۱۳۹۶

وصول مقاله : ۱۳۹۵/۰۱/۰۲

تأیید نهایی : ۱۳۹۵/۱۰/۲۰

صفحات : ۷۹ - ۹۴

## بررسی و تحلیل ارتباط فضایی خشکسالی‌ها با دبی حوضه‌ی آبی قزل‌اوزن

دکتر غلامحسن جعفری<sup>۱\*</sup>، فاطمه بختیاری<sup>۲</sup>، مهدی دوستگامیان<sup>۳</sup>

### چکیده

خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی و خطرناک است که بطور دوره‌ای در اثر کمبود رطوبت ناشی از کاهش میزان بارندگی به وقوع می‌پیوندد. در این مقاله سعی بر آن است که خشکسالی‌های فراگیر حوضه‌ی آبی قزل‌اوزن در دو دهه‌ی اخیر مورد مطالعه قرار گیرد. برای دست‌یابی به اهداف تحقیق، از داده‌های ایستگاه‌های اقلیمی با طول دوره‌ی آماری ۲۱ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۰) استفاده گردید. در گام نخست ویژگی‌های عمومی بارش و دبی حوضه مورد بررسی قرار گرفت.

در مرحله‌ی بعد با استفاده از نرم‌افزارهای Excel, Gis, Matlab و Surfer سایر محاسبات صورت گرفت، سپس بر اساس شاخص موران نمایه‌ی I، نقشه‌های توزیع مکانی فراوانی، احتمال وقوع و الگوی خودهمبستگی فضایی خشکسالی دبی و بارش ترسیم گردید. بررسی نقشه‌های خشکسالی حاکی از این است که؛ بین خشکسالی دبی با بارش منطقه قزل‌اوزن رابطه‌ی معناداری وجود دارد. نتایج حاصل از تحلیل الگوی خودهمبستگی فضایی موران حاکی از آن است که آثار خشکسالی‌های دبی و بارش بیشتر در نیمه‌های جنوبی حوضه تشکیل الگوی بالا را داده است، این در حالی می‌باشد که در سایر نواحی رابطه خشکسالی‌های دبی و بارش از یک الگوی تصادفی پیروی می‌کند.

کلیدواژه‌ها: خشکسالی، شاخص SPI، شاخص موران، قزل‌اوزن.

## مقدمه

خداوند در آیه‌ی ۱۵۵ سوره‌ی بقره اصولاً یکی از روش‌های آزمونی خود را ایجاد خشکسالی و کمبود مواد غذایی و گرسنگی بیان می‌کند و می‌فرماید: و لنبونکم بشیء من الخوف و الجوع و نقص من الاموال؛ که بی‌گمان مراد از جوع و گرسنگی همان قحطی است. در حقیقت خداوند می‌خواهد بیان کند که ما مردمان را به چیزی چون قحطی (گرسنگی) می‌آزماییم (قرآن کریم، سوره بقره، آیه ۱۵۵).

به کرات در اساطیر ایرانی داستان‌هایی در خصوص آب و خشکسالی دیده می‌شود، برای مثال: در دوران کهن نقل بوده که تیشتر ایزد باران بوده و به جنگ دیو خشکسالی یعنی اپوش می‌رود. اگر شکست یابد آب و گیاه نابود می‌شوند و خشکسالی برنده می‌شود و اگر پیروزی یابد آب‌ها جریان پیدا کرده و رودها و رودخانه‌ها پرآب می‌شدند (کسائیان، ۱۳۸۶: ۴ و ۳۴). خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی و خطرناک است که در نتیجه‌ی کمبود بارش کم‌تر از حد بهنجار یا مورد انتظار پدید می‌آید، همچنین پدیده‌ای اقلیمی است که بطور دوره‌ای در اثر کمبود رطوبت ناشی از کاهش میزان بارندگی به وقوع می‌پیوندد (خسروی و همکاران، ۱۳۹۱: ۵۳). خشکی هوا ویژگی خاص مناطقی با بارندگی کم و تبخیر زیاد و منحصر به بخش‌های خاصی از کره‌ی زمین است. اما خشکسالی عبارت است از کاهش میزان بارندگی به کم‌تر از شرایط معمولی، طی یک یا چند سال. خشکسالی در تمام نقاط دنیا و حتی مناطق مرطوب رخ می‌دهد (گندم‌کار، ۱۳۸۱: ۱). خشکسالی به همراه پدیده‌هایی مانند زلزله، آتش‌فشان، سیلاب و لغزش از خطرات و تهدیدات زیست‌محیطی محسوب می‌گردد که در اثر عوامل هیدرو اقلیمی در طی یک یا چند سال آبی رخ

می‌دهد. تعاریف گوناگونی از خشکسالی ارائه گردیده که عمده‌ی آن‌ها کاهش غیرمترقبه‌ی بارش در یک منطقه را مدنظر قرار داده است. در تعریف خشکسالی، هدف محقق از بررسی بسیار اهمیت دارد؛ برای مثال، چنانچه هدف، کشاورزی باشد، درواقع به کاهش بارش توأم با کم شدن رطوبت خاک و افت میزان تولید محصولات کشاورزی خشکسالی اطلاق می‌گردد و یا اگر موضوع مورد بررسی مربوط به مسائل آب‌شناختی باشد، کاهش دبی در ایام سال نسبت به میانگین را خشکسالی می‌دانند و یا چنانچه مشخصات اقلیمی مدنظر باشد، کاهش غیر منتظره بارش در مدتی معین در منطقه‌ای را خشکسالی اقلیمی می‌نامند (کاوایی، ۱۳۸۰: ۷۱). خشکسالی یکی از جنبه‌های ذاتی تغییرپذیری شرایط اقلیمی است. گرچه برخی آن را واقعه‌ای نادر و تصادفی می‌دانند، اما خشکسالی ویژگی موقت تمام مناطق اقلیمی است، هر چند مشخصات آن از یک نقطه به منطقه‌ی دیگر متفاوت باشد (خسروی، ۱۳۸۳: ۱۶۷). همه‌ی نقاط جهان بطور موقت و در فواصل زمانی ظاهراً نامنظم دچار خشکسالی می‌شوند ولی اثر این پدیده و در نگاهی گسترده اثر هر گونه تغییر اقلیمی در مناطق حاشیه‌ای بارزتر و مهم‌تر است (غیور، ۱۳۷۶: ۲۵). خشکسالی از جمله مخاطرات طبیعی است که به‌صورت متناوب جوامع بشری را از طریق اثرات منفی بر روی منابع آب و کشاورزی و به‌تبع آن اقتصاد، دچار مشکل می‌سازد (خوش‌خلاق و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۱۹). بروز خشکسالی می‌تواند آثار منفی بر کشاورزی منطقه داشته باشد. برای مثال، در خشکسالی ۱۳۷۸-۱۳۷۷، حدود ۷۰ درصد از محصولات دیم و ۱۰ درصد از محصولات آبی کشور آسیب دید، بطوری‌که تولید گندم حدود ۲/۴ میلیون تن و تولید برنج ۴۰۰ هزار تن کاهش داشت (عزیزی، ۱۳۷۹: ۷۱).

چیوک و همکاران (۱۹۹۵) در تحقیق خود کوشیده‌اند که با استفاده از روش میانینانی کریجینگ الگوی زمانی- مکانی خشکسالی‌های مراکش را شناسایی کنند و پس از کشف ساختار زمانی- مکانی خشکسالی‌ها این الگوها را با سامانه‌ی همدید توضیح دادند.

هونگ و همکاران (۲۰۰۱) سه نمایه‌ی بهنجار محصول (CZI)، بارندگی استاندارد شده (SPI) و بارش بهنجار استاندارد شده (ZSI) را در چهار ناحیه‌ی چین در شرایط خشک تا مرطوب، با استفاده از ۴۸ سال آمار بارندگی (۱۹۹۸-۱۹۵۱) و دوره‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه ارزیابی کردند. در این تحقیق نمایه SPI مبنای قرار داده شد و سایر نمایه‌ها و عکس‌العمل آن‌ها در سال‌های خشک و تر نسبت به این نمایه ارزیابی گردید. برای این بررسی از همبستگی خطی بین مقادیر این نمایه‌ها با SPI استفاده شد. همبستگی بین مقادیر SPI و CZI بیانگر این است که SPI و CZI معمولاً رابطه‌ی خوبی در مقیاس‌های زمانی مختلف، بجز در مقیاس زمانی ۳ ماهه و در شرایط بسیار خشک از خود نشان می‌دهند. در مجموع نتایج تحقیق فوق نشان داد این نمایه‌ها توانایی خوبی برای پیش خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف دارند. برتری ZSI و CZI نسبت به SPI از این بابت است که این دو نمایه، برخلاف SPI نواقص آماری را در بین سری داده‌ها قبول می‌کند و محاسبات ساده‌تری دارد. از طرف دیگر CZI نسبت به کمبود بارندگی و شرایط خشکسالی از دو نمایه‌ی دیگر عکس‌العمل بیشتری نشان می‌دهد و مقادیر منفی بزرگ‌تری نسبت به بقیه ارائه می‌نماید. در صورتی که ZSI برای خشکسالی‌های شدید قابلیت زیادی از خود نشان نمی‌دهد.

با پیش‌بینی بموقع خشکسالی و برنامه‌ریزی مناسب و اعمال مدیریت قوی در زمینه‌ی منابع آب، می‌توان شدت خسارات آن‌را کاهش داد (گندم‌کار، ۱۳۸۸: ۴).

یکی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مهم و نادر حوضه‌ی آبریز قزل‌اوزن این است که خط تقسیم البرز را شکافته و با جدا کردن حوضه‌های بسته‌ی دریاچه‌ی ارومیه و مسیله قم از یکدیگر، آب‌های بخشی از منطقه‌ی داخلی فلات را به دریای خزر هدایت می‌کند. این یک پدیده‌ی استثنایی و کم‌نظیر در جهان است که آب یک منطقه‌ی خشک به منطقه مرطوب می‌رود (زمردیان، ۱۳۹۱: ۱۰۲). بررسی خشکسالی دبی و بارش حوضه قزل‌اوزن می‌تواند درک بهتری از این ویژگی منحصر به فرد ارائه دهد. توزیع ارتفاعی در حوضه‌ی حاکی از وجود قله‌های بالاتر از ۳۰۰۰ متر در سراب (کوه‌های چهل چشمه کردستان) و پایاب (منطقه طارم) و قله‌های کمتر از ۲۲۰۰ متر در میاناب (اطراف بیجار) است.

### پیشینه‌ی تحقیق

به دلیل اهمیت خشکسالی و تأثیر آن بر رویدادهای محیطی، این پدیده مورد توجه بسیاری از اندیشمندان بوده است. گام‌های نخستین توجه علمی به خشکسالی از اواسط قرن بیستم به وسیله‌ی محققانی چون کوپن (۱۹۳۱)، تورنت وایت (۱۹۴۸) و کنراد (۱۹۵۰) انجام گرفت (کسائیان، ۱۳۸۶: ۱۰).

مک‌کی و همکاران (۱۹۹۵) خشکسالی منابع آب کلرادو را با استفاده از نمایه‌ی بارش استاندارد شده (SPI) مطالعه کردند. به‌علت تأثیر متفاوت خشکسالی بر بخش‌های مختلف، این روش را در مقیاس زمانی مختلف از ۱ تا ۷۲ ماهه به کار بردند و دریافتند که برای برازش داده‌های بارندگی توزیع گاما مناسب‌ترین توزیع می‌باشد.

این سه نمایه را مورد بررسی قرار داده و بهترین نمایه را برای منطقه روش SPI پیشنهاد دادند. نظری پور و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی الگوهای توزیع فضایی دما، بارش و رطوبت با استفاده از تحلیل اکتشافی زمین‌آمار در نواحی مرکزی ایران پرداختند. آن‌ها از روش درون‌یابی کریجینگ برای داده‌ها استفاده کردند، نتایج نشان داد که روش درون‌یابی کریجینگ، به بهترین شکل الگوی توزیع فضایی دما، بارش و رطوبت را در نواحی مرکزی ایران تبیین می‌کند.

### روش‌شناسی

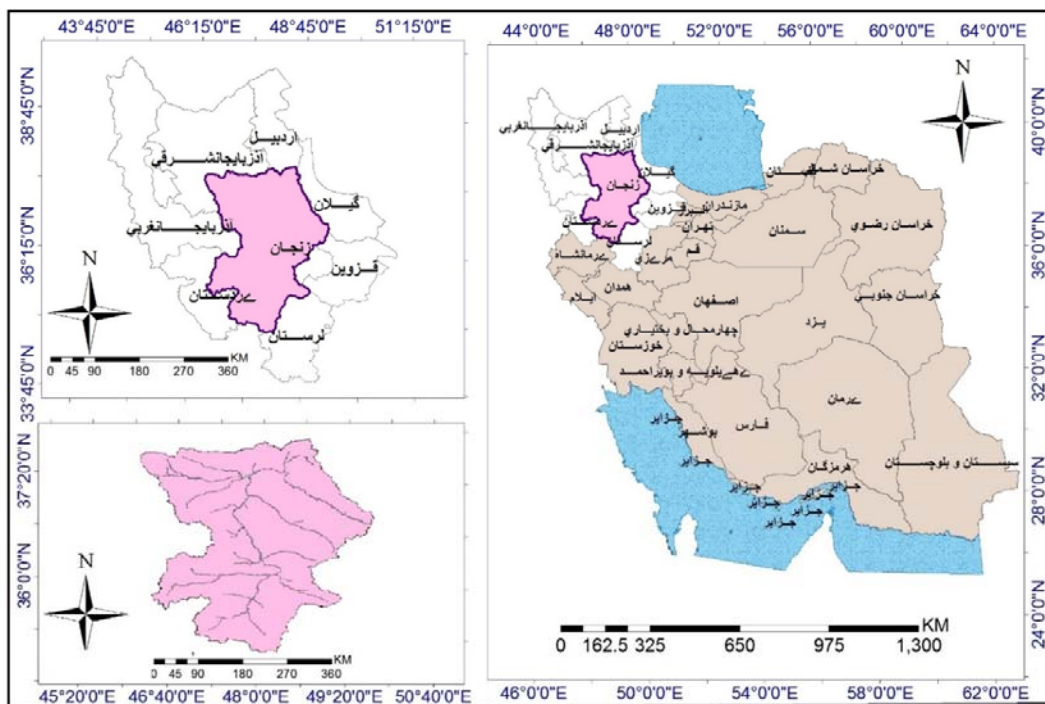
سرچشمه رودخانه‌ی قزل‌اوزن از ارتفاعات چهل چشمه کردستان بوده و با طولی بالغ بر ۵۵۰ کیلومتر پس از عبور از استان‌های زنجان، آذربایجان شرقی و اردبیل ضمن دریافت شاخه‌های متعدد در طول مسیر خود در استان گیلان با رودخانه‌ی شاهرود تلاقی و وارد مخزن سفیدرود می‌گردد. وسعت حوضه‌ی آبخیز آن نزدیک به ۴۹۴۰۰ کیلومتر مربع است (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۰: ۴) و در بین استان کردستان، زنجان، آذربایجان شرقی، اردبیل، همدان و بخش کوچکی از استان‌های قزوین، آذربایجان غربی و گیلان می‌باشد و در عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی گسترده شده است (شکل ۱).

لوکاس و همکاران (۲۰۰۳) برای مطالعه‌ی خشکسالی‌های هواشناسی در مقیاس‌های زمانی متفاوت در کشور یونان از ۳ نمایه‌ی عددی  $Z$ ، ناهنجاری بارش و بارش استاندارد استفاده کرده و نتیجه گرفتند که هر سه نمایه برای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه روند یکسانی داشته و همچنین مطابقت خوبی با نمایه‌ی پالمر (PDSI) دارد.

کنسلیر و همکاران (۲۰۰۷) خشکسالی‌های ماهانه را با توابع انتقال احتمال، نمایه‌ی SPI و فرض بهنجار بودن داده‌های بارندگی ماهانه پیش‌بینی کردند. آن‌ها مقادیر آبی نمایه SPI را به‌وسیله‌ی ماتریس ضریب همبستگی که از روش تحلیلی به‌وسیله‌ی توابع آمار مشتق شده بود، پیش‌بینی کردند، ضمن این‌که نتایج آن‌ها تفاوت چندانی با مقادیر بارش اندازه‌گیری شده نداشت.

ثنایی‌نژاد (۱۳۷۹) به بررسی خشکسالی و ارزیابی نمایه‌های بارش استاندارد شده و درصد بهنجار استان خراسان پرداخت و نتیجه گرفت که آستانه‌های نمایه‌های بارش استاندارد شده برای تعریف وضعیت اقلیمی، باید مجدداً ارزیابی شود.

بداق‌جمالی و همکاران (۱۳۸۰) سه روش را برای تعیین نمایه خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان مورد ارزیابی و محاسبه قرار دادند که این روش‌ها عبارتند از: نمایه استاندارد شده بارش، نمایه‌ی دهک‌ها (DPI) و درصد بهنجار. آن‌ها در نهایت ارتباط



شکل ۱: موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

$$SPI = \frac{Pi-p}{s} \quad \text{رابطه ۱:}$$

$P_i$  = مقدار بارش در دوره‌ی مورد نظر؛  $P$  = میانگین دراز مدت بارش دوره‌ی مورد نظر؛  $S$  = انحراف معیار مقدار بارش. ابزار تحلیل خودهمبستگی فضایی موران نیز به بررسی خودهمبستگی فضایی بر اساس مکان دو مقدار خصیصه‌ی مورد نظر عوارض جغرافیایی می‌پردازد. این ابزار در حقیقت آماره و یا شاخص موران (Moran) را محاسبه می‌کند و با استفاده از امتیاز استاندارد  $Z$  و  $P$ -Value به ارزیابی و معنادار بودن شاخص محاسبه شده می‌پردازد. شاخص موران برای خودهمبستگی فضایی به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود (علیچانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۸۱-۷۱):

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad \text{رابطه ۲:}$$

هدف از این پژوهش بررسی و تحلیل الگوی خودهمبستگی فضایی خشکسالی‌های رودخانه‌ی قزل-اوزن می‌باشد، برای این منظور ابتدا داده‌های بارش و دبی ۵۶ ایستگاه استخراج گردید، سپس از بین ایستگاه‌ها، آن‌هایی انتخاب شدند که دارای طول دوره‌ی آماری طولانی‌تر و مشترکی در طی سال‌های ۱۳۷۰-۱۳۹۰ بودند. به‌منظور بررسی خشکسالی و احتمال تواتر و تداوم سال‌های خشک و تر با استفاده از شاخص‌های  $SPI$  و به‌منظور تحلیل ارتباط فضایی خشکسالی‌ها با دبی از شاخص خودهمبستگی فضایی موران استفاده شده است. شاخص  $SPI$ ، بستگی به احتمال بارش در هر زمان و مقیاس دارد و برای مقیاس‌های زمانی مختلف کاربرد دارد و می‌تواند هشدار اولیه جهت پایش خشکسالی و کمک به ارزیابی شدت آن باشد، شاخص  $SPI$  از رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید:

در رابطه‌ی فوق:

$\beta > 0$  پارامتر مقیاس  $\alpha > 0$  پارامتر شکل  $e$  عدد نپیرین  $x > 0$  داده‌های بارش  $\Gamma(\alpha)$  تابع گامای

به منظور برازش توزیع گاما بر داده‌ها، ابتدا بایستی پارامترهای تابع چگالی گاما  $g(x)$ ، یعنی پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  تخمین زده شود. این پارامترها را می‌توان به روش‌های مختلفی مانند روش گشتاورها، روش بیشینه درست‌نمایی و غیره برآورد کرد. در این پژوهش از روش بیشینه درست‌نمایی برای برآورد پارامترها استفاده شد (رابطه ۵) (Rodrigo, 2009: 3).

رابطه ۵:

$$a = \frac{1}{4 * A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4 * A}{3}} \right) \quad \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad A = \ln(\bar{x}) = -\frac{\sum \ln(x)}{n}$$

در این رابطه  $n$  تعداد مشاهدات سری و  $\bar{x}$  میانگین سری می‌باشد. پارامترهای مذکور جهت محاسبه فراوانی وقوع نسبی بارش  $g(x)$  و محاسبه‌ی احتمال تجمعی وقوع بارندگی  $G(x)$  به کار برده شدند احتمال تجمعی نظیر مقدار بارش  $X$  میلی‌متر از رابطه زیر به دست می‌آید (Abramowitz, 1965: 320)

$$\int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad \text{رابطه ۶:}$$

پس از محاسبه‌ی احتمال تجمعی نظیر مقادیر بارش  $G(x)$  مقادیر  $Z$  استاندارد یا SPI برای هر مقدار بارش  $(X)$  از طریق روابط (۷ و ۸) محاسبه می‌شوند:

$$0 < G(x) \leq 0.5 \quad \text{رابطه ۷:}$$

$$z = spi = - \left[ t - \frac{c_0 + c_1 * t + c_2 * t^2}{1 + d_1 * t + d_2 * t^2 + d_3 * t^3} \right]$$

که در اینجا  $Z_i$  اصل بین مقادیر خصیصه عارضه  $i$  با میانگین آن  $(x_i - \bar{X})$  می‌باشد. وزن فضایی بین عارضه  $z$ ،  $I$  می‌باشد،  $n$  تعداد کل عوارض جغرافیایی موجود در لایه‌ی مورد استفاده بوده و  $S_0$  جمع کل وزن‌های فضایی می‌باشد. این روش نشان می‌دهد که آیا داده‌ها به صورت پراکنده، خوشه‌بندی شده‌اند و یا بطور تصادفی در فضا پخش شده‌اند.

در نهایت آزمون نکوئی برازش، به‌وسیله‌ی آزمون کلموگروف-اسمیرنف به عنوان مناسب‌ترین توزیع انتخاب شد و احتمال وقوع تجربی مشاهدات با استفاده از رابطه‌ی ویبول به دست آمد (رابطه ۳) (صفوی، ۱۳۹۳: ۵۰۰):

$$p = \frac{m}{n+1} \quad \text{رابطه ۳:}$$

در این رابطه:  $m$  شماره ردیف مشاهدات و  $n$  تعداد مشاهدات سری می‌باشد. سپس سری زمانی بارش حوضه به‌وسیله‌ی توزیع‌های مختلف برازش شد و احتمال تجمعی وقوع داده‌ها در توزیع‌های مختلف به دست آمد. پس از محاسبه‌ی تفاوت احتمال تجمعی برازش شده بر داده‌ها با احتمال تجمعی تجربی و با استفاده از آزمون نکوئی برازش به‌وسیله‌ی آزمون کلموگروف - اسمیرنف، احتمالات تجمعی توزیع گاما با داشتن کمترین تفاوت نسبت به احتمالات تجمعی تجربی، به عنوان توزیع مناسب برای بارش حوضه‌ی قزل‌اوزن انتخاب گردید. تابع توزیع گاما به‌صورت رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود (Sonmez, 2005: 243)

$$(x, \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad \text{رابطه ۴:}$$

جدول ۱: طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی بر اساس مقادیر SPI

مقادیر SPI	طبقه
< ۲	ترسالی بسیار شدید
۱/۵۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	ترسالی ملایم
- ۰/۹۹ تا - ۰/۴۹	نرمال
- ۱ تا - ۱/۴۹	خشکسالی ملایم
- ۱/۵ تا - ۱/۹۹	خشکسالی شدید
> - ۲	خشکسالی بسیار شدید

مأخذ: *Mckee et al, 1993*

رابطه ۸:  $0.5 < G(x) \leq 1$   

$$z = spi = + \left[ t - \frac{c_0 + c_1 * t + c_2 * t^2}{1 + d_1 * t + d_2 * t^2 + d_3 * t^3} \right]$$

که در آن t با توجه به مقادیر G(x) از یکی از روابط (۹) به دست می‌آید:

رابطه ۹: 
$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{1 - (H(x))^2} \right]}$$

رابطه ۱۰: 
$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(H(x))^2} \right]}$$

در روابط فوق ضرایب ثابت به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$c_1 = 0.802853$        $c_2 = 0.010328$

$d_3 = 0.001308$        $c_0 = 2.515517$

$d_1 = 1.432788$        $d_2 = 0.189269$

پس از محاسبه‌ی شاخص SPI برای بارش هر سال، جهت تعیین وضعیت خشکسالی و ترسالی از طبقه‌بندی که توسط مک‌کی و همکاران ارائه شد استفاده شده است (*Mckee et al, 1993: 179*) (جدول ۱). در نهایت، با توجه به این محاسبات، نقشه‌ی توزیع مکانی فراوانی و احتمال وقوع و همچنین نقشه‌ی الگوی خودهمبستگی فضایی خشکسالی‌های دبی و بارش ترسیم گردید.

جدول ۲: فراوانی خشکسالی بارش

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ترسالی بسیار شدید	ترسالی شدید	ترسالی ملایم	نرمال	خشکسالی ملایم	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
گیلوان	۴۹/۱۳	۳۶/۷۷	۰	۰	۰	۱۹	۰	۱	۱
مهرآباد	۴۷/۸۹	۳۵/۸۵	۰	۰	۱	۱۶	۲	۲	۰
بیانلو	۴۷/۸۵	۳۶	۰	۰	۰	۱۷	۱	۳	۰
میانه	۴۷/۷۲	۳۷/۴۲	۰	۰	۰	۱۸	۱	۲	۰
ینکی‌کند	۴۸	۳۶/۲۵	۰	۰	۱	۱۶	۲	۲	۰
حسن‌خان	۴۷/۶۸	۳۵/۴۳	۰	۰	۰	۱۹	۰	۰	۲
کوهسالار	۴۷/۳۵	۳۷/۵۴	۰	۰	۰	۱۸	۱	۰	۲

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۵

### یافته‌ها

#### تحلیل الگوی خودهمبستگی خشکسالی‌ها

شاخص SPI، نمایه‌ای است که بستگی به احتمال بارش هر زمان و مقیاس دارد و برای مقیاس‌های زمانی مختلف قابل مقایسه است و می‌تواند هشدار اولیه جهت پایش خشکسالی و کمک به ارزیابی شدت آن باشد. پس از به دست آوردن شاخص SPI پارامترهای بارش و دبی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، مشخص گردید که هر کدام از ایستگاه‌ها چند سال دوره‌ی ترسالی، نرمال و خشکسالی را پشت سر نهاده‌اند (جدول ۲، ۳، ۴ و ۵).

جدول ۳: درصد احتمال وقوع خشکسالی بارش

گیلوان	۰	۰	۰	۰/۸۵۷۱۴۳	۰	۰/۰۴۷۶۱۹	۰/۰۴۷۶۱۹
مهرآباد	۰	۰	۰/۰۴۷۶۱۹	۰/۷۶۱۹۰۵	۰/۰۴۷۶۱۹	۰/۰۹۵۲۳۸	۰
بیانلو	۰	۰	۰	۰/۷۶۱۹۰۵	۰/۰۴۷۶۱۹	۰/۱۴۲۸۵۷	۰
میانه	۰	۰	۰	۰/۸۵۷۱۴۳	۰	۰/۰۹۵۲۳۸	۰
ینکی کند	۰	۰	۰/۰۴۷۶۱۹	۰/۷۶۱۹۰۵	۰/۰۹۵۲۳۸	۰/۰۹۵۲۳۸	۰
حسن خان	۰	۰	۰	۰/۹۰۴۷۶۲	۰	۰	۰/۰۹۵۲۳۸
کوهسالار	۰	۰	۰	۰/۸۵۷۱۴۳	۰/۰۴۷۶۱۹	۰	۰/۰۹۵۲۳۸

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۵

جدول ۴: فراوانی خشکسالی دبی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ترسالی بسیار شدید	ترسالی شدید	ترسالی ملایم	نرمال	خشکسالی ملایم	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
گیلوان	۴۹/۱۳	۳۶/۷۷	۰	۰	۰	۱۴	۷	۰	۰
مهرآباد	۴۷/۸۹	۳۵/۸۵	۰	۰	۰	۱۸	۳	۰	۰
بیانلو	۴۷/۸۵	۳۶	۰	۰	۰	۱۵	۶	۰	۰
میانه	۴۷/۷۲	۳۷/۴۲	۰	۰	۰	۱۵	۴	۲	۰
ینکی کند	۴۸	۳۶/۲۵	۰	۰	۰	۱۸	۱	۲	۰
حسن خان	۴۷/۶۸	۳۵/۴۳	۰	۰	۰	۱۷	۳	۱	۰
کوهسالار	۴۷/۳۵	۳۷/۵۴	۰	۰	۰	۱۵	۵	۱	۰

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۵

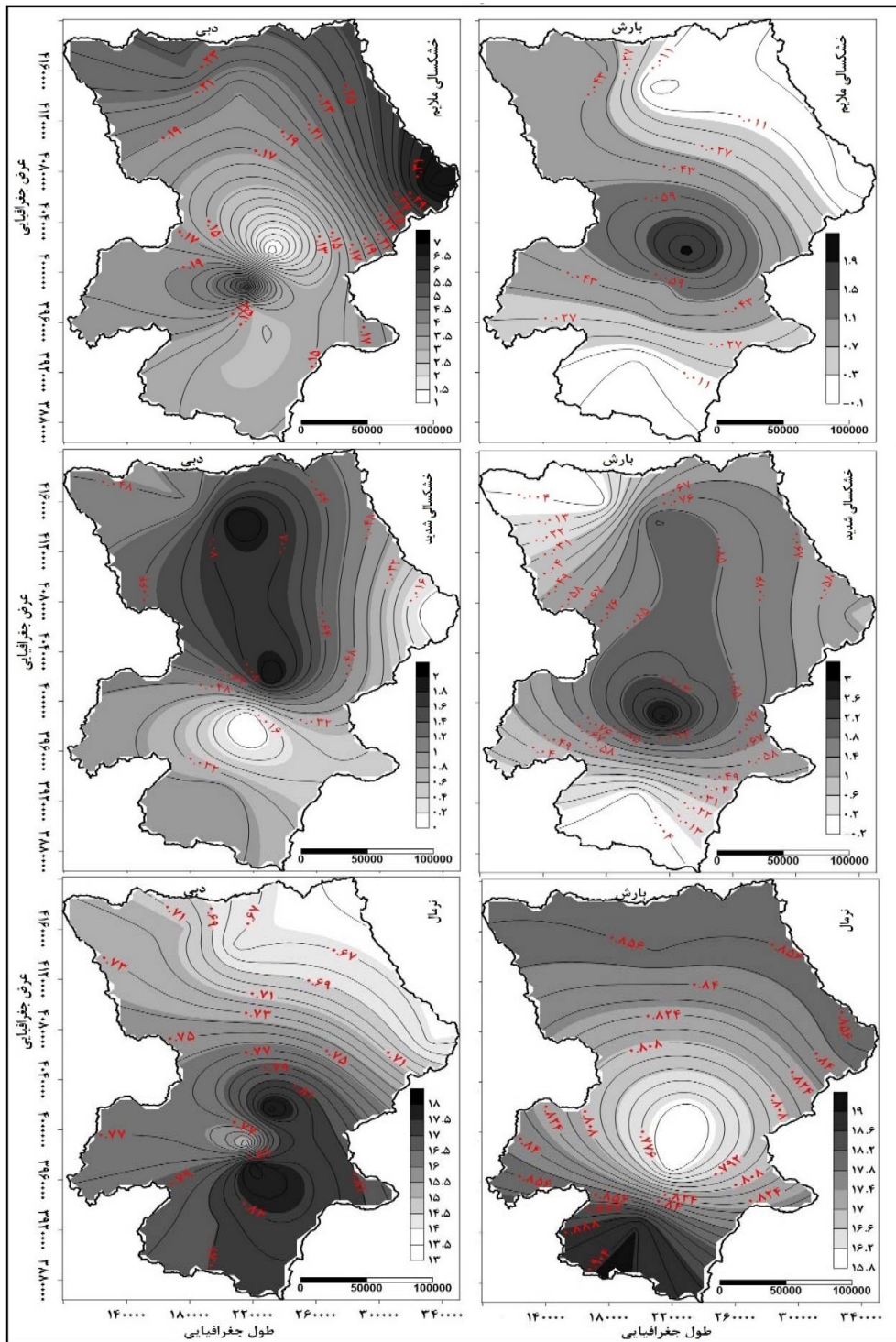
جدول ۵: درصد احتمال وقوع خشکسالی دبی

گیلوان	۰	۰	۰/۳۳۳۳۳۳	۰/۶۶۶۶۶۷	۰	۰	۰
مهرآباد	۰	۰	۰/۱۴۲۸۵۷	۰/۸۵۷۱۴۳	۰	۰	۰
بیانلو	۰	۰	۰/۲۸۵۷۱۴	۰/۷۱۴۲۸۶	۰	۰	۰
میانه	۰	۰/۰۹۵۲۳۸	۰/۱۹۰۴۷۶	۰/۶۶۶۶۶۷	۰	۰	۰
ینکی کند	۰	۰/۰۹۵۲۳۸	۰/۰۴۷۶۱۹	۰/۸۵۷۱۴۳	۰	۰	۰
حسن خان	۰	۰/۰۴۷۶۱۹	۰/۱۴۲۸۵۷	۰/۸۰۹۵۲۴	۰	۰	۰
کوهسالار	۰	۰/۰۴۷۶۱۹	۰/۲۳۸۰۹۵	۰/۷۱۴۲۸۶	۰	۰	۰

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۵

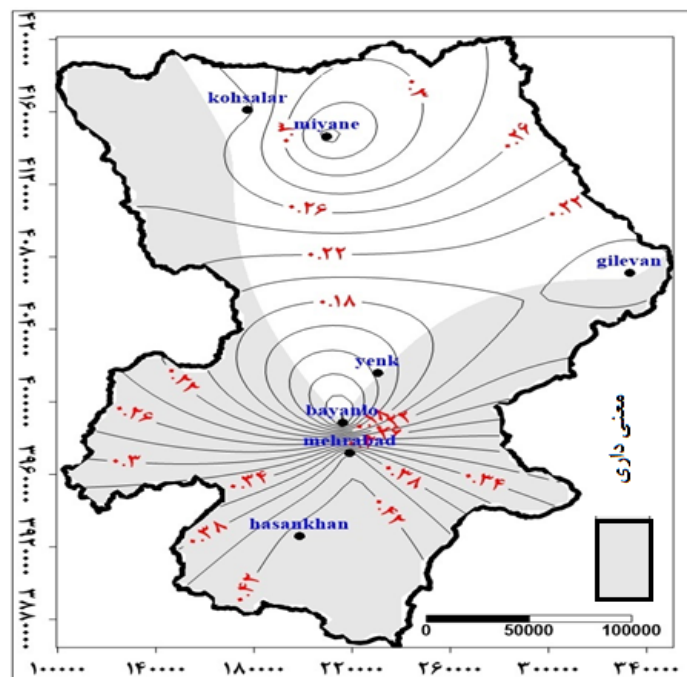
بنابراین می‌توان گفت در توزیع مکانی بین بارش و دبی در خشکسالی شدید رابطه‌ی نسبتاً مستقیمی وجود دارد. در تحلیل توزیع مکانی بارش و دبی نرمال منطقه، فراوانی احتمال وقوع بارندگی در مرکز حوضه به کم‌ترین مقدار خود رسیده درحالی‌که در جنوب حوضه بیشترین مقدار بارندگی مشاهده شده است. سایر قسمت‌ها روند متوسطی را نشان می‌دهند. در برآورد فراوانی دبی نیز همین روند مشاهده گردیده با این تفاوت که بارش‌های نرمال به قسمت‌های جنوب شرقی نیز کشیده شده است؛ بنابراین می‌توان گفت که رابطه‌ی بینابینی بین بارندگی و دبی وجود دارد. سایر انواع ترسالی‌ها و خشکسالی بسیار شدید در هیچ‌کدام از سال‌های آماری مورد نظر اتفاق نیفتاده، در واقع خشکسالی‌ها از نرمال آغاز شده و به مرحله‌ی شدید رسیده است. به‌منظور بررسی و تحلیل ارتباط خشکسالی‌ها با دبی، توزیع مکانی ضریب همبستگی بین خشکسالی‌های حوضه با دبی در شکل ۳ آورده شده است.

همان‌طور که در نقشه خشکسالی ملاپم از شکل (۲) مشاهده می‌شود؛ توزیع مکانی فراوانی و احتمال وقوع بارش بیانگر این است که در نواحی مرکزی حوضه احتمال وقوع خشکسالی‌ها به‌صورت ملاپم و درصد احتمال وقوع خشکسالی بطور متوسط  $0/059$  است. درحالی‌که این مقدار در نواحی شمالی به‌خصوص شمال شرق و بخش‌های جنوبی حوضه به کم‌ترین حد خود می‌رسد. با این حال احتمال وقوع چنین حالتی در بخش‌های غرب حوضه متوسط است. خشکسالی دبی این محدوده، حالت عکس بارش اتفاق افتاده؛ قسمت شرق حوضه بیشترین مقدار فراوانی دبی و سایر قسمت‌ها فراوانی متوسط دارند. در توزیع مکانی خشکسالی‌های شدید بارش منطقه طبق شکل (۲)، نواحی جنوبی متمایل به مرکز حوضه احتمال وقوع خشکسالی‌ها شدید و درصد احتمال وقوع خشکسالی بطور متوسط  $0/064$  می‌باشد. در صورتی‌که نواحی شمالی به‌خصوص شمال غرب و بخش‌های جنوبی حوضه این مقدار به کم‌ترین ارزش خود می‌رسد، در بخش‌های شمال شرق و شرق حوضه نیز احتمال وقوع خشکسالی متوسط هست. احتمال وقوع خشکسالی دبی نیز در این نوع از خشکسالی در نواحی شمالی متمایل به مرکز حوضه شدید است، درحالی‌که در نواحی غربی و جنوبی متمایل به مرکز، به کم‌ترین مقدار می‌رسد.



شکل ۲: توزیع مکانی فراوانی و احتمال وقوع خشکسالی‌های بارش و دبی

تهیه و ترسیم: نگارنگان، ۱۳۹۵



شکل ۳: ضریب همبستگی خشکسالی‌های و دبی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

نیمه‌ی جنوبی حوضه‌ی قزل‌اوزن به ۰/۴۲ (رابطه مستقیم) می‌رسد. درحالی‌که توزیع ارتباط مکانی بین خشکسالی‌ها و دبی در نیمه‌ی شمالی حوضه علاوه بر اینکه تقریباً ناچیز است در سطح ۹۵ درصد اطمینان آماری معنی‌دار نیست. در مجموع با توجه به این نقشه، می‌توان گفت که بین خشکسالی دبی و بارش در حوضه‌ی قزل‌اوزن رابطه وجود داشته ولی بجز دو ایستگاه مهرآباد و حسن‌خان، در سطح ۹۵ درصد اطمینان معنادار نبوده‌است. شمال حوضه از همبستگی تقریباً یکنواختی برخوردار می‌باشد (شکل ۳). توزیع مکانی ضریب همبستگی بین بارش و دبی در حوضه‌ی قزل‌اوزن بیانگر این است که بیشترین اثر بارش بر نوسانات دبی درجایی مشاهده می‌شود که از بیشترین میانگین مکانی برخوردار بوده است. به این معنی که با افزایش بارش، دبی افزایش و با کاهش بارش، دبی کاهش می‌یابد بطوری‌که این ارتباط به سمت عرض‌های پایین‌تر (مناطق جنوبی مورد مطالعه) محسوس‌تر می‌باشد.

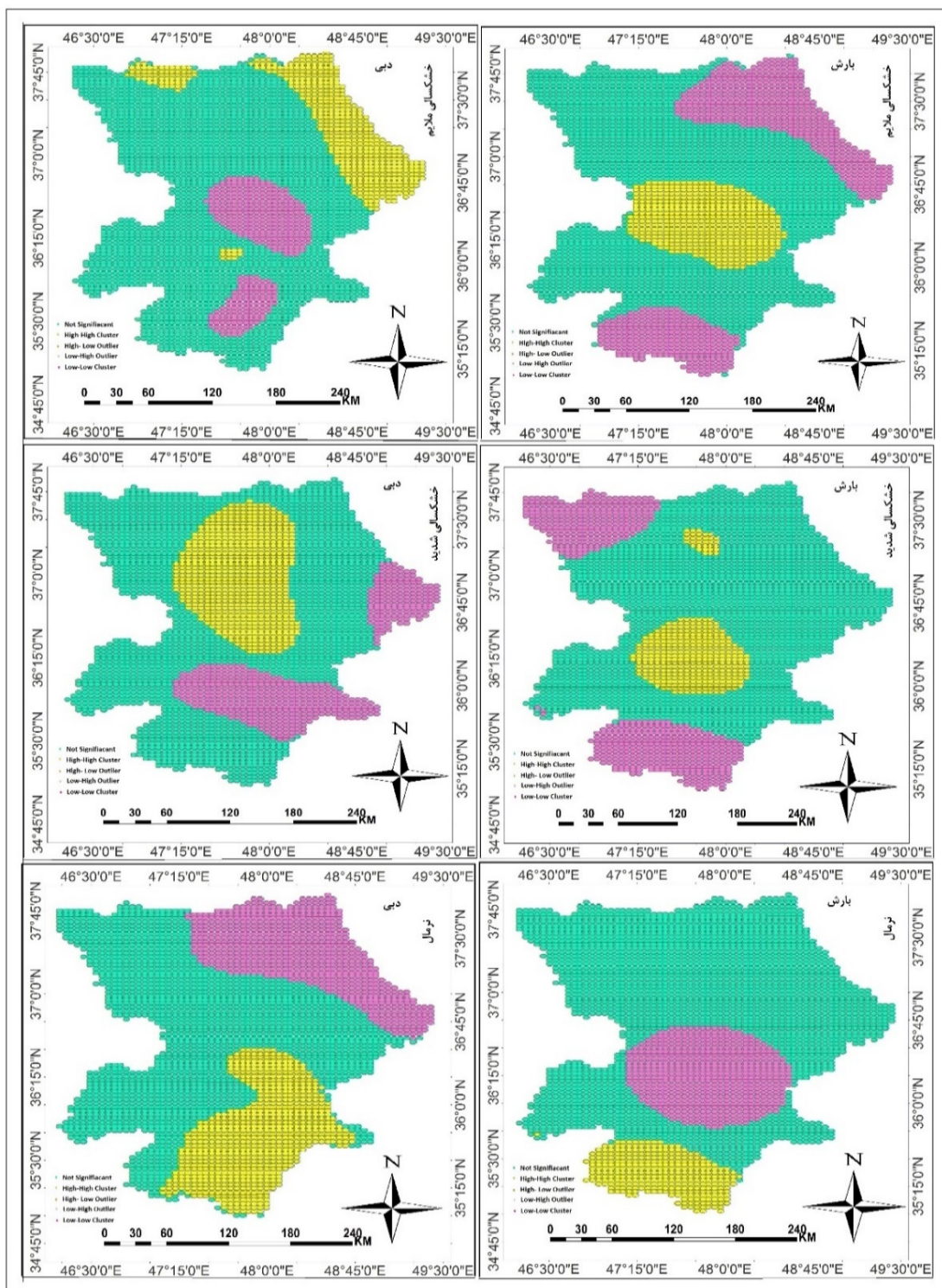
در بررسی رابطه میان دو متغیر، نخستین گام منطقی، ترسیم داده‌ها به صورت نقاطی در یک دستگاه مختصات متعامد می‌باشد؛ بنابراین کشف رابطه بین متغیرها و چگونگی تأثیرپذیری آن‌ها از یکدیگر یکی از اهداف این مدل می‌باشد. بطوری‌که متغیر بودن این عوامل باعث تغییر عامل وابسته می‌شود. بااطلاع از رابطه بین متغیر وابسته و متغیر مستقل، می‌توان از این رابطه و مدل به منظور استنباط در مورد چگونگی تأثیرگذاری متغیرهای مستقل و مقایسه عملکرد این متغیرها بر روی متغیر وابسته و همچنین پیش‌بینی متغیر وابسته با معلوم بودن مقادیر متغیرهای مستقل استفاده کرد که برای این منظور می‌توان از خط برازش یافته رگرسیون استفاده کرد. مقصود از برازندگی خط، در حقیقت پیدا کردن معادله‌ای است که بیان‌کننده‌ی رابطه‌ی بین متغیر باشد که از آن معادله بتوان نمره‌های یک متغیر را از روی نمره‌های متغیر دیگر پیش‌بینی نمود. همان‌طوری‌که مشاهده می‌شود ضریب همبستگی بین خشکسالی‌ها و دبی در

### تحلیل اکتشافی داده‌های فضایی

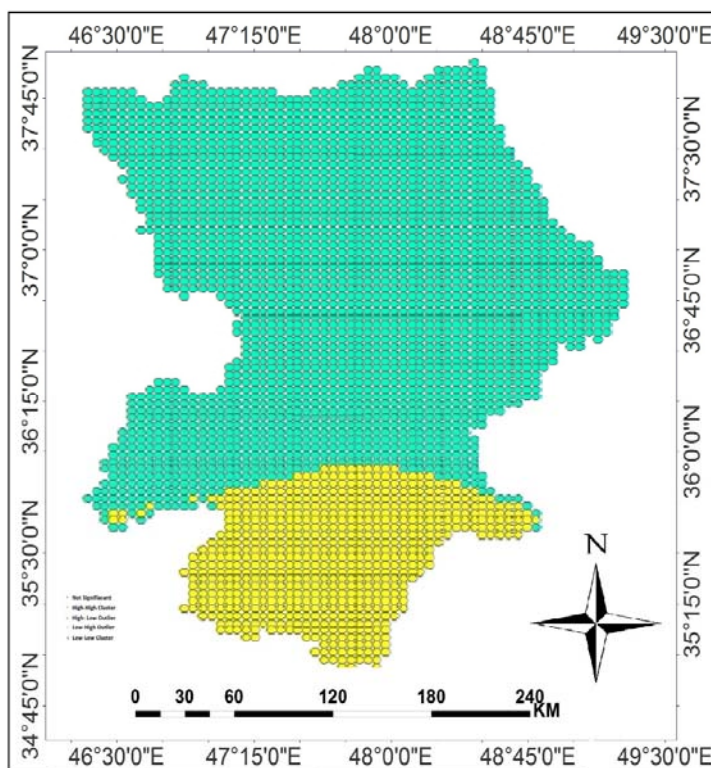
دارای مقدار کم، توسط عوارض دارای مقادیر زیاد محاصره شده‌اند و از نظر آماری معنادار (سطح ۵ درصد) هستند را از یکدیگر متمایز می‌گرداند (شکل ۴). پس از ترسیم نقشه‌های الگوی خودهمبستگی فضایی هر یک از طبقات خشکسالی دبی و بارش، یک نقشه بین دبی و بارش رابطه سنجی شده، به‌عنوان خروجی نهایی ترسیم گردید که مطابق با نقشه توزیع مکانی ضریب همبستگی دبی و بارش است و این نتیجه که بین خشکسالی دبی و بارش رابطه‌ی معناداری وجود داشت را تأیید می‌کرد. به این صورت که خشکسالی‌های دبی و بارش بیشتر در نیمه‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه تشکیل الگوی بالا را داده، در حالی که در سایر نواحی، رابطه خشکسالی‌های دبی و بارش دارای الگوی تصادفی می‌باشند (شکل ۵). توزیع الگوی خودهمبستگی فضایی بین خشکسالی‌های بارش و دبی بر اساس شاخص موران بیانگر این است که آثار بارش بر دبی در نواحی جنوبی منطقه‌ی مورد مطالعه الگوی خوشه‌ای بالا برخوردار است. چنین وضعیتی بیانگر این است که بارش در این منطقه از حوضه بر دبی بیشترین تأثیر را داشته است. در حالی که الگوی خودهمبستگی فضایی در بخش‌های شمالی حوضه منفی است. به عبارت دیگر آثار بارش بر دبی در شمال حوضه دارای تشکیل الگوی خوشه‌ای پایین (حالت تصادفی) را داده است.

در مرحله‌ی آخر جهت شناسایی لندفرم‌های غالب ژئومورفولوژیکی منطقه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، محدوده‌ی رخساره‌ها و لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی مشخص گردید سپس با بازدید میدانی میزان صحت یافته‌های به‌دست آمده از نقشه‌ها مورد بازبینی قرار گرفت. مناطقی که خشکسالی حاکم است محیط مناسبی برای حاکمیت بیابان و عوارض و لندفرم‌های ژئومورفیک می‌باشد (حبیبی، ۱۳۹۳: ۷).

پس از اینکه بین خشکسالی دبی و بارش تحلیل مکانی صورت گرفت لازم بود که مشخص شود که خشکسالی‌های حوضه‌ی قزل‌اوزن در کدام قسمت‌ها تشکیل الگوی بالا به‌صورت معناداری را داده‌اند. به همین منظور از روش تحلیل فضایی خودهمبستگی داده‌ها استفاده شده و صحت تحلیل‌های مکانی دبی و بارش مبرم و مبرهن گردید. مجموعه روش‌هایی که برای پی‌ریزی کردن نمایش تصویری داده‌های فضایی، مشاهده اندازه، وابستگی فضایی یا ناهمگونی فضایی به کار می‌رود با عنوان تحلیل اکتشافی داده‌های فضایی شناخته می‌شود. این تحلیل مجموعه‌ای از روش‌هایی است که توزیع‌های فضایی را توصیف می‌کند و نمایش می‌دهد و همچنین مکان‌ها، الگوهای فضایی پیوند فضایی و تجمع را که دارای صورت‌های متفاوت ناهمگونی فضایی هستند، بررسی می‌کند. ابزار آمار خودهمبستگی فضایی یکی از کاربردی‌ترین و مهم‌ترین ابزارهای تحلیلی برای تحقیق در مورد داده‌های فضایی است (نظری‌پور و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۱۵). این تحلیل نه تنها به خودی خود اطلاعات مفیدی در مورد ارتباط درونی عوارض به دست می‌دهد، بلکه نتایج آن برای بسیاری از تحلیل‌های پیچیده‌تر آماری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (علی‌جانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۹۱-۸۷). برای بررسی توزیع الگوی خودهمبستگی فضایی خشکسالی بارش و دبی، از روش زمین‌آمار خودهمبستگی فضایی موسوم به موران استفاده گردید. این شاخص در چارچوب امتیاز استاندارد محاسبه شده و سطح معنی‌داری قابل تفسیر و تحلیل است. در این ابزار، HH بیانگر خوشه‌های مقادیر زیاد یا خودهمبستگی فضایی مثبت در سطح ۹۹ درصد اطمینان، LL بیانگر خوشه‌های مقادیر کم یا خودهمبستگی فضایی منفی در سطح ۹۹ درصد اطمینان، HL نشانگر ناخوش‌های بودن است که در آن یک مقدار زیاد توسط مقادیر کم محاصره شده‌اند و LH تک‌سلول‌هایی که در آن عارضه



شکل ۴: توزیع الگوی خودهمبستگی فضایی خشکسالی‌های بارش و دبی محدوده ی قزل‌اوزن تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵



شکل ۵: توزیع الگوی خودهمبستگی فضایی خشکسالی‌های بارش و دبی منطقه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

سطوح کم شیب در برابر خشکسالی شدید حفر گالی‌های متعدد است.

#### نتیجه

به دلیل اهمیت خشکسالی و تأثیر آن بر رویدادهای محیطی، این پدیده مورد توجه بسیاری از اندیشمندان بوده است. هدف این بررسی استفاده تحلیلی اکتشافی داده‌های فضایی در تبیین الگوهای فضایی دو عنصر بارش و دبی حوضه آبریز قزل‌اوزن است. برای بررسی خشکسالی و احتمال تواتر و تداوم سال‌های خشک و تر از شاخص‌های SPI و Moran استفاده شده است. این روش‌ها نشان می‌دهند که داده‌ها به صورت پراکنده خوشه‌بندی شده‌اند یا بطور تصادفی در فضا پخش شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که بین خشکسالی دبی و بارش منطقه‌ی قزل‌اوزن رابطه‌ی معناداری وجود دارد. در این بین رابطه‌ی

بررسی‌ها نشان داد که بین شدت خشکسالی با لندفرم‌های مشاهده شده در سطح حوضه ارتباط منطقی وجود دارد. برای مثال در مناطقی که خشکسالی شدید حاکم باشد لندفرم‌هایی مانند سطوح فرسایشی، گالی و بدلند بیشتر مشاهده می‌شوند؛ بخش‌های مرکزی حوضه چنین وضعیتی دارد. در حوضه‌ی قزل‌اوزن رسوبات مارنی میوسن گسترش فراوانی دارند. این رسوبات در سطوح شیب‌دار به صورت بدلند و در سطوح کم‌شیب، به صورت گالی‌های عمیق و متراکم درآمدند. از این‌رو مطالعات میدانی حاکی از تمرکز چنین گالی‌هایی در قسمت‌هایی از حوضه است که خشکسالی‌ها از شدت بیشتری برخوردار بوده‌اند. به بیانی می‌توان وجود گالی‌ها را نوعی تمایل محیط در خروج از یک حالت تعادل متمایل به بیوستازی به شرایط رگزیستازی دانست. به عبارت دیگر عکس‌العمل

## منابع

- خشکسالی‌های شدید دبی و بارش نسبت به سایر شاخص‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج حاصل از تحلیل الگوی خودهمبستگی فضایی موران نیز در مجموع بیانگر این است که آثار خشکسالی‌های دبی و بارش بیشتر در نیمه‌های جنوبی منطقه‌ی مورد مطالعه تشکیل الگوی بالا (رابطه خطی معنی‌دار) را داده است، درحالی که در سایر نواحی، رابطه خشکسالی‌های دبی و بارش دارای الگوی پایین (حالت تصادفی) است. بررسی‌های میدانی حاکی از آن است که بین خشکسالی با لندفرم‌های مشاهده شده در سطح حوضه ارتباط منطقی وجود دارد.
- در نواحی مرکزی که خشکسالی‌های شدید تواتر بیشتری دارند، شرایط بیابانی حاکمیت دارد و در لیتولوژی سست، لندفرم‌هایی همچون گالی و بدلند شکل گرفته‌اند. در تأیید یافته‌های زمردیان (۱۳۹۱) که قزل‌اوزن از یک محیط نیمه‌خشک و خشک وارد منطقه مرطوب می‌شود نتایج بیانگر آن است که الگوی خودهمبستگی بالای نواحی جنوبی یا سراب حوضه، وابستگی بیشتر دبی را به بارش نشان می‌دهد. درحالی‌که الگوی خودهمبستگی فضایی در بخش‌های شمالی حوضه منفی است. به عبارت دیگر اثرات بارش بر دبی در پایاب حوضه کمتر از سراب است و تشکیل الگوی پایین را داده است.
- در راستای یافته‌های تریکار (۱۳۶۹) در ارتباط با رودخانه‌های بومی، خشکسالی‌های دبی قزل‌اوزن در مناطق نیمه مرطوب طارم، کمتر از خشکسالی‌های بارش تبعیت کرده است؛ در صورتی که وابستگی بیشتر دبی به بارش در سراب (نیمه جنوبی حوضه)، به قزل‌اوزن خصوصیات رودخانه‌های غیربومی را داده است. دبی رودخانه‌ها در مناطق پایاب حوضه که در مقایسه با سراب رطوبت، پوشش گیاهی و نفوذپذیری مطلوب‌تری دارد؛ بیشتر وابسته به آب‌های زیرزمینی است.
- قرآن کریم، سوره بقره، آیه ۱۵۵.
- تریکار، ژان (۱۳۶۹). اشکال ناهمواری‌ها در مناطق خشک، ترجمه مهدی صدیقی و محسن پورکرمانی. آستان قدس رضوی.
- ثنایی‌نژاد، سیدحسین (۱۳۷۹). مروری بر نمایه‌های خشکسالی و ارزیابی نمایه‌های SPI و درصد بهنجار برای استان خراسان، اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با کم‌آبی و خشکسالی. کرمان. دانشگاه باهنر کرمان. صفحات ۹۶۰-۹۵۲.
- حبیبی، علیرضا (۱۳۹۳). کاربرد شاخص خشکسالی در شناسایی لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی مناطق بیابانی، دومین همایش ملی بیابان با رویکرد مدیریت مناطق خشک و بیابانی. صفحات ۷-۱.
- خسروی، محمود (۱۳۸۳). بررسی روابط بین الگوهای چرخش جوی کلان مقیاس نیمکره‌ی شمالی با خشکسالی‌های سالانه سیستان و بلوچستان، جغرافیا و توسعه. شماره ۳. صفحه ۱۶۷.
- خسروی، محمود؛ علیرضا موقری؛ محمدرضا منصوری دانشور (۱۳۹۱). ارزیابی نمایه‌های PNI، RAI، SIP و SPI برای پهنه‌بندی خشکسالی ایران با مقایسه دو روش میانگینی IDW و مدل ارتفاعی رقومی DEM. جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۵. صفحات ۷۰-۵۳.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ فیروز رنجبر؛ سجاد طولانی؛ معصومه مقبیل؛ جعفر معصوم‌پور سماکوش (۱۳۸۹). بررسی خشکسالی در سال ۸۷-۱۳۸۶ و اثرات آن بر منابع آب و کشاورزی (مطالعه موردی: شهرستان مرودشت)، فصلنامه علمی- پژوهشی انجمن جغرافیایی ایران. شماره ۲۴. صفحات ۱۳۶-۱۱۹.
- علیجانی، بهلول؛ مهدی دوست‌کامیان؛ سعیده اشرفی؛ فهیمه شاکری (۱۳۹۴). تحلیل الگوی خودهمبستگی فضایی درون دهه‌ای بارش ایران طی نیم قرن اخیر، مجله‌ی آمایش شهری و منطقه‌ای. شماره ۱۴. صفحات ۸۸-۷۱.

- رضایی مقدم، محمدحسین؛ محمدرضا ثروتی؛ صیاد اصغری سراسکانرود (۱۳۹۰). بررسی مقایسه‌ای الگوی پیچان‌رود با استفاده از تحلیل هندسه فراکتالی و شاخص‌های زاویه مرکزی و ضریب خمیدگی (مطالعه موردی: رودخانه قزل‌اوزن)، پژوهش‌نامه مدیریت حوضه آبخیز. سال دوم، شماره ۳، صفحات ۱۸-۱.
- زمردیان، محمدجعفر (۱۳۹۱). ژئومورفولوژی ایران، جلد دوم، چاپ ششم. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- صفوی، حمیدرضا (۱۳۹۳). هیدرولوژی مهندسی، چاپ چهارم. انتشارات ارکان.
- عزیزی، قاسم (۱۳۷۹). النینو و دوره‌های خشکسالی-ترسالی در ایران، پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۳۸، صفحات ۸۴-۷۱.
- غیور، حسنعلی؛ سیدابوالفضل مسعودیان (۱۳۷۶). بزرگی، گستره و فراوانی خشکسالی‌ها در ایران. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. شماره ۴۵، صفحات ۳۹-۲۵.
- کاویانی، محمدرضا (۱۳۸۰). بررسی اقلیمی نمایه‌های خشکی و خشکسالی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. شماره ۶۰، صفحات ۸۹-۷۱.
- کسائی‌ان، نوید (۱۳۸۶). تحلیل اقلیمی-آماری خشکسالی‌های استان گیلان طی دوره آماری (۲۰۰۲-۱۹۷۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی. دانشگاه زنجان.
- گندم‌کار، امیر (۱۳۸۸). تحلیل هم‌دیدی خشکسالی‌ها در بندر انزلی، دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان و ستاد غیرمترقبه استانداری اصفهان. صفحات ۵-۱.
- مقدم، حسین؛ جواد بداق‌جمالی؛ سهیلا جوانمرد؛ عبدالرضا مهدویان؛ لیلی خزانه‌داری (۱۳۸۰). پایش خشکسالی بر اساس نمایه‌های SPI، دهک‌ها و نرمال در استان سیستان و بلوچستان، اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب، زابل. دانشگاه زابل. صفحات ۸۰-۶۹.
- نظری‌پور، حمید؛ مهدی دوست‌کامیان؛ سارا علیزاده (۱۳۹۴). بررسی الگوهای توزیع فضایی دما، بارش و رطوبت با استفاده از تحلیل اکتشافی زمین‌آمار (بررسی موردی: نواحی مرکزی ایران). مجله فیزیک زمین و فضا. دوره ۴۱، شماره ۱، صفحات ۱۱۷-۹۹.
- Abramowitz, M., and Stegun, I (1965). Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, National Bureau of Standards Applied Mathematics Series 55, Dovers Publications, New York, 470 p.
- Cancelliere, A.G. Mauro, B. Bonaccorso, and G. Rossi (2007). Drought forecasting using the Standarized Precipitaion Index, J. Water Resour, Manage, 21: PP: 801-819.
- Chang, K.T (2004). Introduction to geographic information system. 2nd edition, MCGROW Hill. NewYork.
- Chobuk, N., Stockton, C.W., and Myers, d (1995). Spatio-temporal patterns of Drought in Morocco, International Journal of Climatology, Vol. 15, PP:187-205.
- Hong,W.,M.J. Hayes, A. Welss and Q. Hu (2001). An evaluation the standardized precipitation index, the china-z index and the statistical z-score, International Journal of Climatology, 21: PP: 745-758.
- Loukas, A.L. Vasiliades and N.R. Dalezios (2003). Inter comparison of Meteorological Drought indices for Drought Assessment and Monitoring in Greece, 8<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology Lemnos island, Greece, 8-10, PP:484- 491.
- Mckee, T. B, Doesken, N.Y, and Kleist J (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, Preprints, 8Th conference of Applied Climatology, 17-22 January Anaheim CA, 179-189.
- Mckee, T.B. Dosken, N.Y. and Kleist, J (1995). Drought monitoring with multiple time scales, 9 th Conf, Appl, Climatol, Jan, 15-20,PP:233-236.
- Rodrigo, F. S (2010). Changes in the probability of extreme daily precipitation observed from 1951 to 2002 in the Iberian Peninsula, International Journal of Climatology, Vol. 30, no. 10, PP: 1512-1525.
- Sonmez, F. K. Komuscu Ali. U. Erkan A. Turgu E (2005). An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standard precipitation index, Natural Hazards, 35: 243-264.