

تغییرات زمانی و مکانی تراز آب‌زیرزمینی دشت قروه و دهگلان و رابطه آن با خشکسالی

فریده عباسی^۱، مریم آذرخشی^{۲*}، کامران چپی^۳، مهدی بشیری^۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت حیدریه

۲- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت حیدریه

۳- استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان

۴- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت حیدریه

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: azar39m@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر پدیده خشکسالی باعث کاهش شدید آب‌های سطحی در دشت قروه و دهگلان شده است. این امر موجب افزایش بهره‌برداری از منابع آب‌زیرزمینی و تشدید افت سطح ایستابی سفره‌های این دشت گردیده است. هدف از این پژوهش بررسی واکنش آب‌های زیرزمینی دشت قروه و دهگلان نسبت به وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها و نیز میزان همبستگی بین آن‌هاست. ابتدا مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی به ترتیب با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص منبع آب‌زیرزمینی (GRI) محاسبه شد. سپس ضریب همبستگی بین شاخص SPI و GRI بدون اعمال تأخیر زمانی و با ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴ و ۴۸ ماه تأخیر محاسبه شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقادیر ضرایب همبستگی مثبت معنی‌دار بین SPI-24 و GRI-48 با تأخیر ۴۸ ماهه بوده و در ۸/۸۹ درصد از چاه‌ها SPI با GRI با تأخیر ۴۸ ماهه همبستگی مثبت معنی‌دار داشته است. بنابراین خشکسالی هیدروژئولوژیکی با تأخیر زمانی نسبت به خشکسالی هواشناسی اتفاق افتاده است. برای بررسی وجود و یا عدم وجود روند در تغییرات سطح آب‌زیرزمینی از آزمون من-کندال استفاده گردید. نتایج نشان داد که در سطح اطمینان ۹۹٪ در طول دوره آماری مورد مطالعه سطح تراز آب چاه‌های پیژومتری کاهش یافته است و متوسط کاهش تراز آب‌زیرزمینی در منطقه ۰/۸۲ متر در سال بود. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی، بیشترین روند تغییرات سطح آب‌زیرزمینی مربوط به بخش مرکزی دشت است که بین ۱/۵ تا ۲/۴ متر در سال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، قروه- دهگلان، کمیّت آب، SPI، GRI

Spatial and Temporal Variations of Groundwater Level in Qorveh-Dehgolan Plain and its Relationship with Drought

F Abasi¹, M Azarakhshi ^{*2}, K Chapi³, M Bashiri⁴

Received: 28 September 2015 Accepted: 3 July 2016

¹ – M.Sc. Student, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Torbat Heydarieh

² - Assist. Prof., Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Torbat Heydarieh

³ - Assist. Prof., Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan

⁴ - Assist. Prof., Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Torbat Heydarieh

*Corresponding author, Email: azar39m@gmail.com

Abstract

In recent years, drought caused a sharp decline in surface water resources in Qorveh-Dehgolan plain. This caused increasing exploitation of groundwater resources and exacerbation of aquifer level declining. The aim of this study is to evaluate interaction between groundwater and drought and wet periods in Qorveh-Dehgolan as well as to determinate correlation between them. At first, meteorological and hydrogeological drought characteristics were calculated by Standardized Precipitation Index (SPI) and Groundwater Resource Index (GRI), respectively. Then correlation coefficient between SPI and GRI were calculated without lag time also with 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 and 48 months lag times. The results showed that the highest value of positive and significant correlations were between 24-month SPI and 48-month GRI with 48 months delay and in 89.8% of wells, SPI and GRI had positive and significant correlation with 48 months delay. Therefore, the hydrological drought happened with lag time to meteorological drought. The Mann-Kendall test was used for determining the trend existence or inexistence in groundwater level changes. The results showed that the water level of piezometer wells declined during the studied period at 99% confidence level. The average of groundwater level declining was 0.82 m/year. Regarding to the plotted maps, the steepest trend of groundwater level happened in central parts of Qorveh-Dehgolan plain that was between 1.5-2.4 m/year.

Key words: Drought, GRI, Qorveh-Dehgolan, SPI, Water Quantity

مقدمه

جوی، رشد بی‌رویه جمعیت، مصرف فزاینده آب، منابع آبی به‌ویژه ذخایر آب زیرزمینی را تهدید می‌نماید. تاکنون در رابطه با پدیده خشکسالی و تغییرات تراز آب-زیرزمینی مطالعات زیادی در داخل و خارج کشور انجام شده است. بیشتر مطالعات جدید نشان داده است که در یک اقلیم مشخص، دوره خشکسالی هیدرولوژیکی رابطه قوی با پاسخ سیستم آب‌زیرزمینی دارد (ون لون و لاه

کشور ما به‌علت قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه‌خشک از نظر منابع آب در وضعیتی نامطلوب‌تر نسبت به متوسط دنیا قرار دارد. وقوع خشکسالی‌های متناوب، طولانی و نوسانات زیاد آب و هوایی کمبود آب به‌ویژه منابع آب سطحی را تشدید می‌کند. بدین ترتیب، شرایط اقلیمی، نحوه توزیع زمانی و مکانی ریزش‌های

نمودند. نتایج نشان داد که متوسط سالانه تغذیه آب-زیرزمینی در سطح اعتماد ۹۵٪ کاهش داشته است و میزان کاهش ۰/۹۲ میلی‌متر در سال بوده است. صیف و همکاران (۱۳۹۱) تأثیر خشکسالی بر منابع آب‌زیرزمینی آبخوان دشت فسا را ارزیابی کردند و نشان دادند که مقدار شاخص GRI روند کاهشی داشته و در سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ خشکسالی هیدروژئولوژیکی با شدت بالا در منابع آب-زیرزمینی این منطقه رخ داده است. همچنین شاخص SPI در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه با میانگین ارتفاع سطح آب‌زیرزمینی و شاخص GRI رابطه معنی‌داری را در سطح اطمینان ۹۹ درصد نشان داد. یاسمنی و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی اثر خشکسالی بر سطح ایستابی آبخوان دشت تربت جام-فریمان در استان خراسان رضوی با استفاده از شاخص SPI و GRI نشان دادند که بیشترین همبستگی بین شاخص SPI-48 در مقیاس درازمدت با شاخص GRI و همچنین مقادیر تراز آب‌زیرزمینی آبخوان دشت می‌باشد. محمدی قلعه‌نی و همکاران (۱۳۹۰) در بررسی رابطه بین خشکسالی و تغییرات تراز آب‌زیرزمینی در آبخوان دشت ساوه با استفاده از شاخص SPI نشان دادند که شاخص SPI با مقیاس زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه با تراز سطح آب‌زیرزمینی با تأخیر زمانی ۵ ماهه بیشترین همبستگی را داشته است. خلیقی سیگارودی و همکاران (۱۳۸۷) در بررسی نمایه‌های ارزیابی پدیده ترسالی و خشکسالی در استان مازندران با شاخص‌های SPI و PNPI و نیچه^۵ دریافتند که سال‌های با وضعیت نرمال از نظر بارش از فراوانی و استمرار بیشتری نسبت به سال‌های خشک و مرطوب برخوردارند. ملکی نژاد و سلیمانی مطلق (۱۳۹۰) در بررسی دوره‌های متوالی خشکسالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی در استان لرستان با استفاده از دو شاخص SPI و SWI نشان دادند که یک

خان و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده^۱ (SPI) در اراضی یکی از حوضه‌های زراعی استرالیا در ارتباط با سطح آب‌زیرزمینی پرداختند. نتایج نشان داد در موارد زیادی بین شاخص SPI و نوسانات سطح آب-زیرزمینی در زمین‌های زراعی ارتباط قوی وجود دارد. همچنین از همبستگی حاصل می‌توان برای بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر روی نوسانات سطح آب‌زیرزمینی استفاده نمود. بوردی و سوترا (۲۰۰۷) در بررسی خشکسالی در منطقه ماک^۲ در ایتالیا، با استفاده از شاخص SPI سه و ۲۴ ماهه به این نتیجه رسیدند که در مقیاس بلندمدت، منطقه مرکزی و جنوبی ایتالیا در شرایط نرمال است و بقیه تحت اثر خشکسالی قرار دارد. مندیسینو و سناتور (۲۰۰۸) در پژوهشی شاخص منابع آب‌زیرزمینی^۳ (GRI) را برای مناطق کالابریا^۴ با اقلیم مدیترانه‌ای برای دوره ۴۵ ساله به‌کار برده و با SPI منطقه مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که همبستگی GRI با SPI در مقیاس زمانی بالاتر مناسب‌تر است. خصوصیات سنگ‌شناسی حوضه بر شاخص GRI مؤثر بوده و باعث تأخیر GRI نسبت به SPI می‌شود، ضمن آن که شاخص GRI نسبت به شاخص SPI در پیش‌بینی وضعیت منابع آب‌زیرزمینی عملکرد بهتری دارد. ون لون (۲۰۱۳) اثرات اقلیم، خاک و سیستم آب-زیرزمینی را روی تغییرات توزیع احتمال دوره خشکسالی و میزان کاهش آن بررسی کردند. نتایج نشان داد پاسخ آب‌زیرزمینی به‌اندازه اقلیم در توسعه خشکسالی هیدروژئولوژیکی مؤثر است. شی و همکاران (۲۰۱۵) روند تغییرات طولانی مدت تغذیه آب‌زیرزمینی جنوب استرالیا را با روش ناپارامتری من-کندال بررسی کردند. همچنین برای تعیین علل تغییرات تغذیه آب-زیرزمینی، از ضریب همبستگی پیرسون بین بارش سالانه و ارتباط آن با تغذیه آب‌زیرزمینی استفاده

³ - Groundwater resource index

⁴ - Calaberia

⁵ - Nitzche

¹ - Standardized precipitation index

² - Madak

این تحقیق بنا دارد که تغییرات زمانی و مکانی کمیت آب-زیرزمینی و ارتباط آن با خشکسالی را در دشت‌های قروه و دهگلان در استان کردستان بررسی نماید.

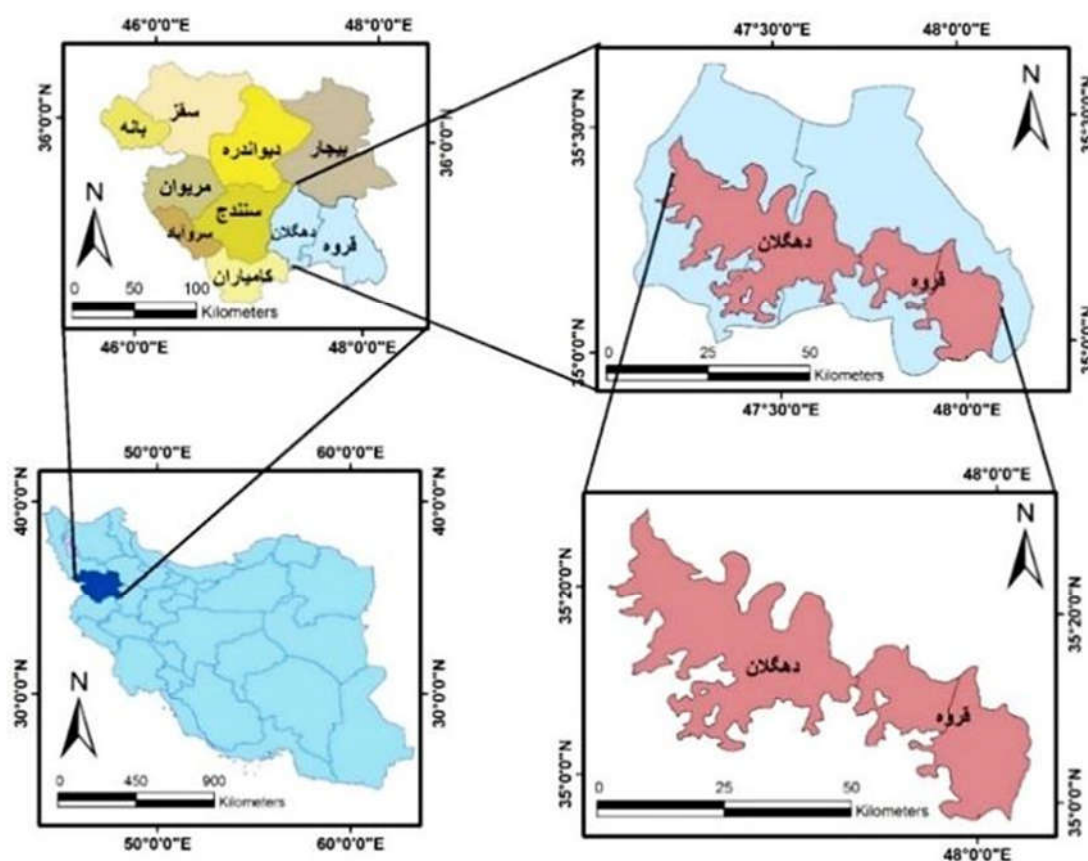
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت قروه و دهگلان با متوسط بارندگی سالانه ۳۵۲ میلی‌متر و اقلیم نیمه‌مرطوب و سرد، در شرق شهرستان سنندج و شمال غربی همدان بین طول‌های جغرافیایی $47^{\circ} 14' 42''$ تا $48^{\circ} 04' 06''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $35^{\circ} 06' 21''$ تا $35^{\circ} 20' 09''$ شمالی قرار دارد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

تأخیر زمانی یک تا دو ساله بین رخداد خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی منابع آب-زیرزمینی در بخش‌های مختلف حوضه وجود دارد.

در دشت قروه و دهگلان وقوع خشکسالی‌های اخیر، افزایش فعالیت‌های کشاورزی، دامداری و صنعتی و همچنین افزایش جمعیت به‌خصوص در ۱۰ سال اخیر باعث افزایش مصرف آب و در نتیجه کاهش ذخایر آب-زیرزمینی و بیلان منفی سفره‌های آب‌زیرزمینی شده است. برای اعمال مدیریت صحیح منابع، شناخت وضعیت کمی آب‌زیرزمینی و عوامل اثرگذار الزامی است. از جمله عواملی که بر کمیت منابع آب‌زیرزمینی اثر می‌گذارد میزان بارش و تغییرات آن طی سال‌های مختلف است. لذا



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت قروه و دهگلان.

در این تحقیق از داده‌های بارش ماهانه و سطح ایستابی ماهانه چاه‌های پیزومتری موجود در دشت قروه و

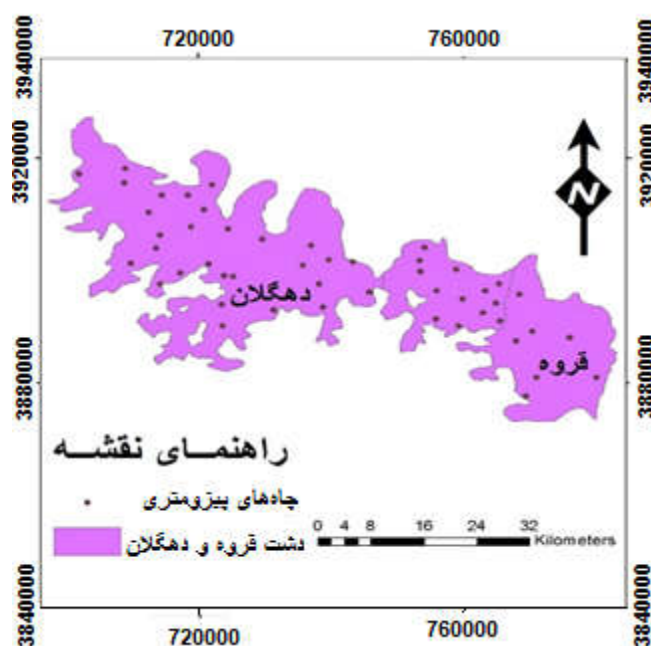
آمار و داده‌های مورد نیاز

هواشناسی مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۲ موقعیت چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه در دشت قروه و دهگلان را نشان می‌دهد.

دهگلان استفاده شد. این آمار از شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان تهیه گردید. طول دوره آماری ۲۲ سال (۱۳۷۱ تا ۱۳۹۲) می‌باشد. مشخصات ایستگاه‌های

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در منطقه مورد مطالعه.

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)	ارتفاع از سطح دریا (m)
بلیان‌آباد	تبخیرسنجی	۳۸۹۱۴۹۳	۷۱۱۴۲۴	۲۰۳۵
دوسر	تبخیرسنجی	۳۸۸۸۲۸۲	۲۲۹۰۰۵	۱۸۳۸
حسن‌آباد	باران‌سنجی	۳۹۲۴۹۰۷	۷۴۴۰۹۱	۱۷۰۰
خسروآباد	تبخیرسنجی	۳۹۳۴۲۰۲	۷۳۷۵۶۸	۱۸۷۹
صلوات‌آباد	باران‌سنجی	۳۹۱۲۴۶۷	۶۹۵۱۸۹	۲۱۳۰
قروه	باران‌سنجی	۳۹۹۵۳۳۰	۷۵۵۵۵۶	۱۹۲۵
ناصرآباد	تبخیرسنجی	۳۹۰۸۵۱۴	۷۲۸۱۰۹	۱۷۹۹



شکل ۲- موقعیت چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه دشت قروه و دهگلان در استان کردستان.

محاسبه شد. برای محاسبه وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی چاه‌های پیزومتری از شاخص GRI استفاده شد.

بررسی وضعیت خشکسالی

وضعیت خشکسالی و ترسالی هواشناسی دشت قروه و دهگلان در دوره آماری از سال (۹۲-۱۳۷۱) با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده SPI در ۴ پایه زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه با استفاده از نرم‌افزار DIP^۶

⁶-Drought index package

$$t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{(H(X))^2}\right]} \quad [5]$$

$$t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{1.0-H(X)}\right]} \quad [6]$$

ثابت‌های معادله عبارتند از:

$$C_0=2.515517 \quad C_1=0.802853 \quad C_2=0.010328$$

$$d_1=1.432788 \quad d_2=0.189269 \quad d_3=0.001308$$

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

مقدار شاخص GRI با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$GRI = \frac{D_{Y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad [7]$$

که در آن $D_{Y,m}$ مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی در سال Y و ماه m و $\mu_{D,m}$ و $\sigma_{D,m}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر ارتفاع تراز آب زیرزمینی در ماه m می‌باشند (مندیسینو و سناتور ۲۰۰۸). طبقات مختلف رطوبتی در شاخص GRI همانند شاخص SPI بوده و در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

تحلیل روند تراز آب زیرزمینی

یکی از روش‌هایی که در بررسی روند جهت تحلیل سری‌های زمانی داده‌های هیدرولوژیکی به کار گرفته می‌شود استفاده از آزمون‌های آماری می‌باشد. آزمون من-کندال جزء متداول‌ترین آزمون‌های ناپارامتری در تعیین روند داده‌ها می‌باشد. این آزمون در مطالعات مختلفی برای بررسی میزان روند آب زیرزمینی استفاده شده است (چانگ ۲۰۰۸، واهلین و گراموال ۲۰۰۹ و مایر و فارس ۲۰۱۰). در آزمون من-کندال هر مقدار در سری زمانی، پیوسته و پشت سر هم، با بقیه مقادیر سری مقایسه می‌شود. برای آزمون من-کندال نخست باید مقدار S را، که جمع شمارش‌ها را نشان می‌دهد، مشخص کرد (رابطه ۸).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{K=i+1}^n \text{sgn}(X_K - X_i) \quad [8]$$

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

این شاخص که توسط مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شده، فقط از داده‌های بارندگی ماهانه استفاده می‌کند و برای تشخیص کمبود مقدار بارندگی در مقیاس‌های زمانی چندگانه طراحی شده است. شرط استفاده از شاخص SPI برآزش داده‌های بارش با توزیع گاما می‌باشد (فاضلی و همکاران ۲۰۰۷، بذرافشان ۱۳۸۲). تابع چگالی احتمال توزیع گاما به صورت زیر تعریف شده است.

$$g(x) = \frac{1}{B^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \cdot X^{-1} \cdot e^{-x/B} \quad [9]$$

که در آن α پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس، X مقدار بارندگی و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما بوده که از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$\Gamma(\alpha) = \int y^{-1} e^{-y} dy \quad [2]$$

چون تابع گاما برای $X=0$ (بارندگی صفر میلی‌متر) تعریف نشده است و توزیع بارندگی ممکن است دارای مقادیر صفر باشد، تابع احتمال تجمعی که در برگزیده مقادیر صفر هم باشد از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$H(X) = q + (1 - q)G(X) \quad [3]$$

که در آن q احتمال صفر بودن مقدار بارندگی می‌باشد. تغییر شکل احتمالی تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z (یا SPI) با میانگین صفر و واریانس یک صورت می‌گیرد. برای دستیابی راحت‌تر به مقادیر Z یا SPI از تقریب آبراموویتز و استگان (۱۹۶۵) استفاده می‌شود (رابطه ۴) (بذرافشان ۱۳۸۲).

$$Z = SPI = \pm \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad [4]$$

برای $0.5 < H(X) < 1.0$ از رابطه ۵ و برای $0 < H(x) \leq 0.5$ از رابطه ۶ استفاده می‌شود.

که در آن $\text{Var}(S)$ از رابطه ۱۰ به دست می‌آید:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^n t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad [10]$$

که در آن X_i و X_k مقادیر پشت سر هم سری زمانی‌اند. n طول دوره آماری و $\text{sgn}(\theta)$ نیز تابع علامت است. نتیجه آزمون Z بر اساس رابطه ۹ ارزیابی می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad [9]$$

جدول ۲- شدت خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها برحسب مقادیر SPI (مکی و همکاران ۱۹۹۳) و GRI (مندیسینو و سناتور ۲۰۰۸).

GRI	SPI	طبقات خشکسالی
+۲ و بیشتر	+۲ و بیشتر	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط
-۰/۹۹ تا -۰/۹۹	-۰/۹۹ تا -۰/۹۹	نرمال
-۱ تا -۱/۴۹	-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۹۹ تا -۱/۵	-۱/۹۹ تا -۱/۵	خشکسالی شدید
-۲ و کمتر	-۲ و کمتر	خشکسالی بسیار شدید

$$Q = \frac{X_j - X_k}{j - k} \quad [12]$$

که در Q شیب خط و X_j و X_k به ترتیب مقادیر J ام و K ام سطح آب زیرزمینی در سری زمانی می باشد. وضعیت روند مثبت، منفی یا بدون روند در چاه‌های مورد مطالعه مشخص شد و در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار GIS و روش IDW^8 پهنه‌های دارای روند مثبت یا منفی یا بدون روند مشابه مشخص شده است. این روش به دلیل سرعت بالای تجزیه و دقت قابل قبول در تجزیه و تحلیل مسائل آب‌های زیرزمینی رایج است (و همکاران ۲۰۰۵). برای تعیین رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی از ضریب همبستگی استفاده شد. ضریب همبستگی بین SPI در چهار پایه زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه و GRI با تأخیرهای ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۸ ماهه و بدون تأخیر با استفاده از نرم‌افزار SPSS محاسبه شد.

که در آن t_p تعداد مقادیر مشابه برای مقدار P ام و q تعداد مقادیر مشابه در سری است. در یک آزمون دو دامنه‌ای برای روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر در حالتی پذیرفته می‌شود که رابطه ۱۱ برقرار باشد:

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad [11]$$

که α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α می‌باشد که با توجه به دو دامنه بودن آزمون از $\alpha/2$ استفاده شده است. چنانچه $Z > 0$ روند مثبت و چنانچه $Z < 0$ روند داده‌ها منفی است. در این تحقیق سطوح معنی‌داری ۵٪ و ۱٪ مورد استفاده قرار گرفته است. برای برآورد شیب واقعی خط روند (میزان تغییر در هر سال) از روش ناپارامتری سن^۷ به شرح زیر استفاده شده است:

⁸ - Inversre distance weighted

⁷ - Sen's method

نتایج

کمترین و بیشترین مقادیر SPI-3، SPI-6، SPI-12، SPI-24 و SPI-24 ماهه و سال وقوع آن در ایستگاه‌های مورد مطالعه به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. فراوانی وقوع وضعیت‌های خشکسالی و ترسالی

ایستگاه‌های مورد مطالعه در شاخص SPI در چهار پایه زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه در ایستگاه‌های مورد مطالعه محاسبه شده است. میانگین فراوانی وقوع وضعیت‌های خشکسالی و ترسالی با استفاده از شاخص SPI در همه ایستگاه‌ها در دوره آماری مورد بررسی در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۳- کمترین مقادیر SPI-3، SPI-6، SPI-12 و SPI-24 و سال وقوع آن در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

نام ایستگاه	سال وقوع	SPI-3	سال وقوع	SPI-6	سال وقوع	SPI-12	سال وقوع	SPI-24
قروه	۸۶-۸۷	-۰/۹۶	۹۱-۹۲	-۱/۳۰	۹۱-۹۲	-۱/۷۸	۹۱-۹۲	-۱/۳۱
دوسر	۸۶-۸۷	-۰/۵۹	۷۷-۷۸	-۰/۸۵	۹۱-۹۲	-۰/۹۱	۷۸-۷۹	-۱/۱۴
ناصرآباد	۷۷-۷۸	-۰/۹۲	۷۷-۷۸	-۱/۶۳	۷۸-۷۹	-۱/۴۶	۷۸-۷۹	-۱/۹۹
بلبان‌آباد	۷۷-۷۸	-۰/۷۹	۷۵-۷۶	-۱/۳۱	۷۸-۷۹	-۱/۸۱	۷۹-۸۰	-۲/۱۶
صلوات‌آباد	۷۷-۷۸	-۱/۱۲	۷۷-۷۸	-۱/۹۳	۷۸-۷۹	-۱/۸۷	۷۸-۷۹	-۲/۱۲
حسن‌خان	۸۶-۸۷	-۰/۸۵	۸۶-۸۷	-۱/۲۹	۸۶-۸۷	-۱/۳۵	۸۶-۸۷	-۱/۲۸
خسروآباد	۸۶-۸۷	-۱/۱۵	۸۶-۸۷	-۱/۶۷	۸۶-۸۷	-۱/۱۷	۸۷-۸۸	-۱/۴۷

جدول ۴- بیشترین مقادیر SPI-3، SPI-6، SPI-12 و SPI-24 و سال وقوع آن در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ایستگاه	سال وقوع	SPI-3	سال وقوع	SPI-6	سال وقوع	SPI-12	سال وقوع	SPI-24
قروه	۷۳-۷۴	۱/۲۳	۷۳-۷۴	۱/۶۸	۷۳-۷۴	۲/۱۴	۷۳-۷۴	۲/۴۱
دوسر	۷۳-۷۴	۱/۳۵	۷۳-۷۴	۱/۸	۷۳-۷۴	۲/۰۷	۷۴-۷۵	۱/۹۶
ناصرآباد	۷۳-۷۴	۱/۴۱	۷۳-۷۴	۱/۸۷	۷۳-۷۴	۱/۹۶	۷۴-۷۵	۲/۰۱
بلبان‌آباد	۷۳-۷۴	۱/۰۲	۷۳-۷۴	۱/۲۲	۸۳-۸۴	۱/۳۶	۸۳-۸۴	۱/۲۴
صلوات‌آباد	۷۳-۷۴	۱/۲۹	۷۳-۷۴	۱/۷۲	۷۳-۷۴	۱/۸۲	۷۴-۷۵	۱/۶۶
حسن‌خان	۷۳-۷۴	۱/۳۳	۷۳-۷۴	۱/۷۱	۷۳-۷۴	۱/۸۶	۷۳-۷۴	۱/۸۷
خسروآباد	۷۳-۷۴	۱/۴۰	۷۳-۷۴	۱/۲	۷۳-۷۴	۲/۴۷	۷۳-۷۴	۲/۴۸

جدول ۵- میانگین درصد فراوانی وقوع وضعیت‌های خشکسالی و ترسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI.

ایستگاه	خشکسالی بسیار شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	نرمال	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی بسیار شدید
بلبان‌آباد	۳/۱۵	۴/۵۷	۸/۹۴	۶۷/۳۸	۹/۵۵	۵/۵۹	۰/۸۱
دوسر	۰/۶۱	۲/۴۴	۶۰/۴۰	۷۵/۵۱	۷/۴۲	۳/۷۶	۳/۸۶
قروه	۰/۹۱	۳/۲۵	۸/۱۳	۶۸/۹۰	۹/۶۵	۵/۱۸	۳/۹۶
حسن‌خان	۰/۹۱	۳/۹۶	۷/۸۳	۶۸/۰۹	۱۰/۳۷	۵/۸۹	۲/۹۵
خسروآباد	۱/۵۲	۳/۹۶	۷/۱۱	۷۳/۹۸	۶/۰۰	۳/۰۵	۴/۳۷
ناصرآباد	۳/۶۶	۳/۳۵	۴/۹۸	۷۳/۵۸	۸/۲۳	۳/۷۶	۲/۴۴
صلوات‌آباد	۴/۱۷	۲/۲۴	۷/۹۳	۶۹/۷۲	۸/۲۳	۵/۷۹	۱/۹۳

نداشت و همه همبستگی‌ها منفی معنی‌دار بوده است در ۲/۰۴ درصد از چاه‌ها با GRI با تأخیر ۲۴ ماهه همبستگی معنی‌دار مثبت وجود دارد. در ۸۹/۸ درصد چاه‌ها SPI با GRI با تأخیر ۴۸ ماهه همبستگی مثبت معنی‌دار وجود داشت همچنین بیشترین درصد فراوانی SPI24 ماهه با GRI48 ماهه به میزان ۸۵/۷۱ درصد می‌باشد.

تغییرات تراز آب‌زیرزمینی در طول زمان

جدول ۹ شیب خط تغییرات تراز آب‌زیرزمینی را طی دوره مورد مطالعه بر اساس آزمون من-کندال نشان می‌دهد. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که عمق آب در همه چاه‌های پیژومتری مورد بررسی در سطح ۹۹٪ و ۹۹/۹٪ دارای روند مثبت معنی‌دار بوده یعنی در طول دوره آماری مورد بررسی سطح آب چاه‌های مورد بررسی پایین‌تر رفته و عمق دسترسی به آب افزایش یافته است. میانگین شیب خطوط روند در منطقه نشان داد میزان افت به‌طور متوسط ۰/۸۲ متر در سال می‌باشد.

میانگین درصد فراوانی وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌های هیدرولوژیکی محاسبه شده برای چاه‌های پیژومتری مورد مطالعه در جدول ۶ آمده است. نتایج نشان داد که به‌ترتیب بیشترین و کمترین درصد فراوانی وقوع مربوط به وضعیت نرمال و خشکسالی بسیار شدید است.

نتایج همبستگی SPI و GRI نشان داد که تقریباً در همه‌ی چاه‌ها، مقدار شاخص SPI با پایه‌های زمانی مختلف با GRI48 ماهه دارای همبستگی مثبت معنی‌دار بوده است. یعنی زمانی که خشکسالی اتفاق می‌افتد و مقدار بارش کم می‌شود، ۴۸ ماه بعد سطح آب‌زیرزمینی کاهش می‌یابد. در بیشتر چاه‌های مورد بررسی SPI در مقیاس زمانی درازمدت (۲۴ ماهه) همبستگی بیشتری با شاخص GRI نشان داده است. ضرایب همبستگی مثبت معنی‌دار بین شاخص SPI با شاخص GRI در چند چاه پیژومتری به‌عنوان نمونه در جدول ۷ آمده است. درصد فراوانی همبستگی‌های مثبت معنی‌دار SPI در پایه‌های مختلف زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه با GRI در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در ۸/۱۶ درصد از چاه‌ها SPI همبستگی مثبت معنی‌دار با GRI

جدول ۶- میانگین درصد فراوانی وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها هیدرولوژیکی چاه‌های پیژومتری مورد مطالعه.

وضعیت	ترسالی بسیار شدید	ترسالی شدید	ترسالی متوسط	نرمال	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
میانگین	۲/۳۲	۴/۷۵	۱۱/۳۹	۶۴/۵۵	۱۴/۹۹	۱/۳۶	۰/۶۳

جدول ۷- ضرایب همبستگی بین شاخص SPI و GRI در چند چاه‌های پیژومتری.

نام چاه پیژومتری	شاخص GRI	SPI ₃	SPI ₆	SPI ₁₂	SPI ₂₄
آب باریک	GRI ₄₈	ns	ns	۰/۲۱۸**	۰/۳۰۹**
آونگان	GRI ₄₈	ns	ns	۰/۱۹۱**	۰/۲۲۹**
شمال شرقی حاجی پموق	GRI ₂₄	ns	ns	ns	۰/۱۶۰**
مبارک‌آباد	GRI ₁₈	ns	ns	ns	۰/۵۲۱**
مبارک‌آباد	GRI ₄₈	۰/۳۲۵**	۰/۳۶۶**	۰/۴۳۱**	ns

ضرایب همبستگی غیرمعنی‌دار و ns در سطح ۵ درصد معنی‌دار، ** در سطح ۱ درصد معنی‌دار

جدول ۸- درصد فراوانی همبستگی مثبت معنی‌دار SPI و GRI در چاه‌های پیزومتری.

SPI ₂₄	SPI ₁₂	SPI ₆	SPI ₃	شاخص GRI با تأخیر زمانی
۲/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۰۴	GRI
۲/۰۴	۲/۰۴	۰/۰۰	۴/۰۸	GRI ₃
۲/۰۴	۲/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	GRI ₆
۲/۰۴	۲/۰۴	۲/۰۴	۰/۰۰	GRI ₉
۲/۰۴	۴/۰۸	۲/۰۴	۰/۰۰	GRI ₁₂
۲/۰۴	۸/۱۶	۶/۱۲	۲/۰۴	GRI ₁₅
۸/۱۶	۱۰/۲۰	۸/۱۶	۴/۰۸	GRI ₁₈
۶/۱۲	۱۰/۲۰	۱۰/۲۰	۴/۰۸	GRI ₂₁
۱۲/۲۴	۱۰/۲۰	۸/۱۶	۲/۰۴	GRI ₂₄
۸۵/۷۱	۸۱/۶۳	۳۸/۷۸	۱۸/۳۷	GRI ₄₈

تغییرات مکانی سطح آب‌زیرزمینی دشت قروه و دهگلان

نقشه‌های پهنه‌بندی عمق آب‌زیرزمینی در ابتدا،

وسط و انتهای دوره مطالعاتی تهیه شد. نتایج نشان داد

که متوسط عمق آب‌زیرزمینی در چاه‌های موجود در

منطقه در سال آبی ۷۲-۱۳۷۱ برابر ۱۰/۶۹ متر و متوسط

آن در سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ برابر ۱۷/۳۹ و در سال آبی

۹۲-۱۳۹۱ برابر ۲۷/۹۶ متر می‌باشد. مشاهده می‌شود که

به‌طور میانگین اختلاف بین عمق آب‌زیرزمینی دشت از

سال ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۲ یعنی در بازه زمانی ۲۲ سال در

حدود ۱۷/۲۷ متر می‌باشد. در شکل ۳ نقشه پهنه‌بندی

میزان افت سطح آب‌زیرزمینی نشان داده شده است.

همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد، بیشترین افت سطح آب-

زیرزمینی مربوط به بخش مرکزی دشت دهگلان است.

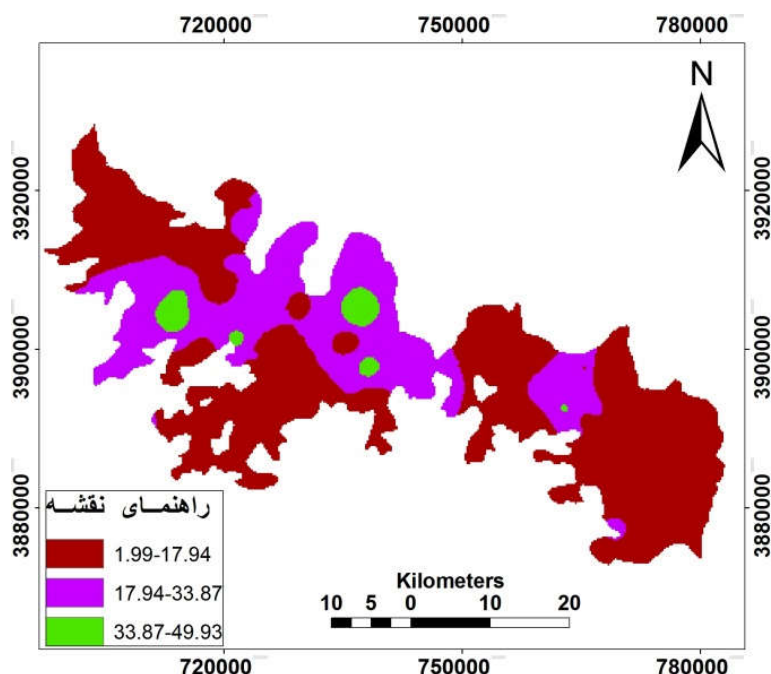
جدول ۹- نتایج شیب خط روند (Q) آزمون من- کندال در چاه‌های پیزومتری مورد بررسی دشتهای قروه و دهگلان.

نام چاه‌های پیزومتری	Q	نام چاه‌های پیزومتری	Q	نام چاه‌های پیزومتری	Q
آب باریک	۱/۱۵	مبارک‌آباد	۰/۸۹۶	روستای مظفرآباد	۰/۶۳۷
تازه‌آباد چراغ‌آباد	۲/۵۹	احمدآباد پنجه	۰/۱۲۱	سریش‌آباد جاده قصلان	۰/۱۷۶
تلوار	۰/۸۵۵	آونگان	۱/۳۶	سلسله	۰/۳۶۷
جنوب کروندان	۲/۵۷	تازه‌آباد خلیل‌آباد	۲/۲۶	سنگین‌آباد جنب فدک	۲/۰۵
جوانمردآباد	۲/۱۵	جنوب مظفرآباد	۰/۶۵۳	شانوره	۱/۸۳
چراغ‌آباد	۱/۲۹	خلیل‌آباد پیر بابا علی	۰/۳۱	شهاب‌الدین	۱/۰۷
چرخه بیان	۰/۱۸۲	دزج	۰/۸۱۱	شهابیه	۱/۵۴
حسینی	۰/۳۶۲	دوسر	۰/۶۱۹	صندوق‌آباد	۰/۳۷۰
دهگلان	۰/۴۶۹	دیوزند جاده خریله	۱/۵۹	قروه	۰/۸۹۶
سرنجیانه	۰/۲۴۵	دیوزند	۱/۲۲	کامشگران	۰/۵۸۴
شمال‌شرقی حاجی پموق	۰/۷۸۵	روستای امین‌آباد	۰/۱۶۷	کیودخانی علیا	۰/۶۰۹
شمال‌غربی حاجی پموق	۰/۱۰۸	روستای خریله	۰/۹۴۷	کنگره	۰/۲۴۳
شمال‌غربی قروچای	۰/۷۲۰	روستای سنگین‌آباد	۰/۴۰۷	گنجی	۲/۴۰
عالی‌آباد	۰/۴۸۹	روستای شکوه‌آباد	۰/۹۴۷	مجین	۰/۴۴۴
عباسجوب	۱/۱۵	روستای قاسم‌آباد	۱/۴۳	ناظم‌آباد	۰/۹۲۷
غرب کروندان	۱/۲۷	روستای قلعه	۰/۳۳۴	وینسار	۰/۲۱۱
قروچای	۰/۵۷۷				

بحث

نتایج محاسبات شاخص SPI در طول دوره آماری ۹۲-۱۳۷۱ (جدول ۳ و ۴) نشان داد که در چهار ایستگاه، سال وقوع کمینه بارش با سال وقوع کمترین مقدار شاخص SPI سه و شش‌ماهه مطابقت دارد. سال وقوع بیشینه بارش با سال وقوع بیشترین مقدار شاخص SPI سه و شش‌ماهه در همه ایستگاه‌ها با هم مطابقت دارد. در مورد SPI₁₂ ماهه هم در همه ایستگاه‌ها غیر از ایستگاه بلبان‌آباد سال وقوع بیشینه بارش و بیشترین مقدار

شاخص با هم مطابقت دارد. در مورد SPI₂₄ ماهه در ۳ ایستگاه قروه، حسن‌خان و خسروآباد سال وقوع بیشینه بارش با سال وقوع بیشترین مقدار شاخص مطابقت دارد. بر اساس نتایج شاخص SPI (جدول ۵) در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه بیشترین درصد فراوانی مربوط به وضعیت نرمال می‌باشد و ترسالی بسیار شدید و خشکسالی بسیار شدید کمترین درصد فراوانی وقوع را دارند. این نتایج با نتایج بوردی و سوترا (۲۰۰۷) و خلیقی‌سیگارودی و همکاران (۱۳۸۷) مطابقت دارد.



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی میزان افت آب‌زیرزمینی دشت قروه و دهگلان در بازه زمانی از سال آبی ۷۲-۱۳۷۱ تا ۹۲-۱۳۹۱.

نتایج همبستگی بین خشکسالی هیدرولوژیکی و خشکسالی هواشناسی (جدول ۸) نشان داد که در بیشتر چاه‌های پیژومتری بیشترین ضرایب همبستگی مثبت معنی‌دار بین شاخص SPI-24 و GRI با تأخیر ۴۸ ماهه می‌باشد. در ۸۹/۸ درصد از چاه‌ها SPI با GRI با تأخیر ۴۸ ماهه همبستگی مثبت معنی‌دار داشته است. همچنین هرچه مقیاس زمانی SPI در دشت‌های قروه و دهگلان بزرگتر می‌گردد، همبستگی آن با شاخص GRI بیشتر می‌شود. نتایج این بخش از تحقیق با یافته‌های مندیسینو

و سناتور (۲۰۰۸)، یاسمنی و همکاران (۱۳۹۱)، صیف و همکاران (۱۳۹۱)، ملکی‌نژاد و سلیمانی مطلق (۱۳۹۰) و خان و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد در صورتی‌که محمدی قلعه‌نی و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهش خود تأخیر زمانی اثرات خشکسالی بر افت آبخوان دشت ساوه را ۵ ماهه گزارش کردند. تأثیر خشکسالی بر منابع آب-زیرزمینی در هر منطقه به عمق سطح آب‌زیرزمینی، خصوصیات خاک و خصوصیات هیدرولیکی آبخوان آن بستگی دارد و علت تفاوت این تأخیرهای زمانی در

نتیجه‌گیری کلی

خشکسالی اثرات زیانباری بر میزان آب قابل دسترس در حوضه‌ها داشته و وقوع آن باعث تنش‌های آبی در حوزه‌های آبخیز می‌شود. لذا در این تحقیق رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی در دشت قروه و دهگلان بررسی شد. طول دوره آماری ۲۲ سال (۱۳۷۱ تا ۱۳۹۲) بود. خشکسالی هواشناسی با شاخص SPI و خشکسالی هیدروژئولوژیکی با شاخص GRI محاسبه و رابطه بین SPI و GRI با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد. نتایج نشان داد شاخص‌های خشکسالی هیدروژئولوژیکی نمی‌توانند با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی هم‌زمانی داشته باشند و خشکسالی‌های هواشناسی با تأخیر زمانی و بعد از گذشت چهار سال بیشترین تأثیر خود را بر منابع آب-زیرزمینی دشت می‌گذارد. به این دلیل که در تبدیل فرآیند بارش به‌عنوان یکی از مهمترین متغیرهای هواشناسی به رواناب و پس از آن فرآیند نفوذ و پیوستن آن به منابع آب‌زیرزمینی عوامل دیگری از جمله ساختار زمین-شناسی منطقه و میزان نفوذپذیری سازندهای موجود در منطقه نیز نقش زیادی ایفا می‌کنند. از آنجا که پدیده نفوذ و حرکت آبهای زیرزمینی زمان بر است. وجود این تأخیر زمانی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی طبیعی است.

شرایط هر دشت نهفته است. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که میانگین شیب خط روند (Q) سطح آب ۰/۸۲ متر در سال بوده است. این مقدار برابر با میانگین افت سطح آب چاه‌های پیژومتری مورد بررسی در دوره آماری مورد مطالعه با روش مشخصات آماری است. اگرچه وقوع خشکسالی‌ها باعث افت سطح آب-زیرزمینی دشت‌های قروه و دهگلان شده است، اما عوامل دیگری نیز در این امر مؤثر هستند. از جمله این‌که در دشت مذکور به دلیل روند روبه‌رشد جمعیت و توسعه اجتماعی و اقتصادی و کشاورزی، افزایش برداشت و مصرف در بخش‌های شهری و روستایی و همچنین توسعه صنایع متوسط و کوچک در دشت مذکور، میزان برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی افزایش یافته است. با توجه به اینکه وقوع خشکسالی پدیده غیرقابل پیشگیری و اجتناب‌ناپذیر است بنابراین، انجام اقدامات مدیریتی مقابله با این پدیده و نیز مطالعات دقیق و اقدامات اصلاحی در بخش‌های مختلف مصرف‌کننده آب پیشنهاد می‌شود. همچنین با توجه به برفی بودن حوضه، بررسی شرایط اقلیمی مؤثر در ذوب برف در حوضه و تهیه یک مدل ذوب برف-رواناب، برای شناخت بهتر از منابع آبی حوضه، در مدیریت این منابع مؤثر است. توصیه می‌شود، در تحقیقات آینده جهت بررسی تأخیر حدود ۴ سال در اثر خشکسالی هواشناسی بر آب‌زیرزمینی عوامل دیگر از جمله نقش سازندها و نفوذپذیری آنها مطالعه گردد.

منابع مورد استفاده

- بذرافشان ج، ۱۳۸۲. مطالعه تطبیقی برخی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در چند نمونه اقلیمی ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- خلیقی سیگارودی ش، صادقی سنگدهی س، اوسطی خ و قویدل رحیمی ی، ۱۳۸۷. بررسی نمایه‌های ارزیابی پدیده‌های ترسالی و خشکسالی: (SPI, PNPI, Nitzche) (مطالعه موردی: استان مازندران). فصل‌نامه علمی-پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۶، شماره ۱، صفحه‌های ۴۴ تا ۵۴.
- صیف م، محمد زاده ح و مساعدی ا، ۱۳۹۱. ارزیابی تأثیر خشکسالی بر منابع آب‌زیرزمینی آبخوان دشت فسا با استفاده از شاخص‌های بارندگی معیار شده، منابع آب‌زیرزمینی و قابلیت هدایت هیدرولیکی معیار شده. مجله مهندسی منابع آب، شماره ۱۵، صفحه‌های ۴۵ تا ۵۹.

محمدی قلعه نی م، ابراهیمی ک و عراقی‌نژاد ش، ۱۳۹۰. ارزیابی تأثیر عوامل اقلیمی بر افت منابع آب‌زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان دشت ساوه). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۴، صفحه‌های ۱۸۹ تا ۲۰۰.

ملکی‌نژاد ح و سلیمانی‌مطلق م، ۱۳۹۰. بررسی شدت خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک در حوضه چغلوندی. مجله پژوهش آب ایران، شماره ۹، صفحه‌های ۶۱ تا ۷۳.

یاسمنی ی، محمدزاده ح و مساعدی ا، ۱۳۹۱. بررسی اثر خشکسالی بر تغییرات سطح آب‌زیرزمینی دشت تربت جام-فریمان با به‌کارگیری شاخص‌های SPI و GRI. صفحه‌های ۱ تا ۷. شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۱۴-۱۶ شهریور ماه، دانشگاه شیراز، شیراز.

- Abramowitz M and Stegun IA, 1985. Handbook of Mathematical functions. New York, Dover .
- Bordi I and Sutra A, 2007. Drought monitoring and forecasting at large scale, in (Methods and Tools for Drought Analysis and Management). Series Water Science and Technology Library, Springer Netherlands 62: 3-27.
- Chang H, 2008. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea. Water Research 42: 3285-3304.
- Fazeli F, Ghorbani M and Niknam V, 2007. Effect of drought on biomass, protein content, lipid per oxidation and antioxidant enzymes in two sesame cultivars. *Biologia Plantarum* 51(1): 98-103.
- Khan S, Gabriel HF and Rana T, 2008. Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on water tables in irrigation areas. *Irrigation and Drainage System* 22: 159-177.
- Mair A and Fares A, 2010. Influence of groundwater pumping and rainfall spatio-temporal variation on stream flow. *Journal of Hydrology* 393: 287-308.
- Mckee TB, Doesken NJ and Kleist J, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Pp.170-184. Proceeding of the Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California, USA.
- Mendicino G and Senatore A, 2008. A groundwater resource index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology* 357: 282-302.
- Shi X, Crosbie R S and Vaze J, 2015. Long term trend in the annual groundwater recharge estimates using the water table fluctuation method. Pp. 2068-2074. 21st International Congress on Modeling and Simulation, 29 Nov- 4 Dec., Gold Coast, Australia.
- Van Loon AF, 2013. On the propagation of drought. How climate and catchment characteristics influence hydrological drought development and recovery. Ph.D. Thesis, Institute for Environment and Climate Research (WIMEK), Hydrology and Quantitative Water Management, University of Wageningen.
- Van Loon AF and Laaha G, 2015. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology* 526:3-14.
- Wahlin K and Grimvall A, 2010. Roadmap for assessing regional trends in groundwater quality. *Environmental Monitoring and Assessment* 165(1):217-231.
- Wu J, Chunmiao Z and Calvin CC, 2005. Cost-effective sampling network design for contaminant plume monitoring under general hydrogeological conditions. *Journal of Contaminant Hydrology* 77: 41- 65.