

بررسی روند تغییرات منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با خشک‌سالی هواشناسی (SPI) (مطالعه موردی: در بافق)

۱- کمال امیدوار^{*۱}

۲- نظام تنی^۲

۳- راضیه عزیزی^۳

* نویسنده مسئول: komidvar@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

چکیده

خشک‌سالی‌ها به‌طور مؤثری بر اقتصاد، محیط زیست، مهاجرت، کاهش سطوح آب‌های زیرزمینی و بسیاری از مشکلات دیگر، بشر را دچار چالش‌های جدی کرده است. هدف از این مطالعه بررسی روند تغییرات آب‌های زیرزمینی چاه‌های پیژومتری و اثرگذاری بارش بر روی نوسانات آب‌های زیرزمینی حوضه بافق طی دوره ۱۴ ساله (۱۳۹۵-۱۳۸۲) است. در ادامه داده‌ها به صورت میانگین فصلی و سالانه تنظیم و تحلیل شد. بنابراین با استفاده از روش آماری ناپارامتری من-کندال معنی‌داری روند بارش و تراز آب‌های زیرزمینی بررسی شد. همچنین با استفاده از روش برآورد کننده شیب‌خط سنس، میزان شیب خط روند آزمون شد. نتایج نشان داد که به‌طور کلی در بارش ایستگاه بافق روند معنی‌داری وجود ندارد. اما خروجی آماره آزمون سنس در سطوح احتمال ۹۹٪ و ۹۵٪ تأییدکننده افزایش ۰/۸ میلی‌متری بارش در هر سال است. همچنین مشخص شد در اکثر چاه‌های مورد نظر تراز آب روند نزولی دارد. این مقدار کاهش در حوضه هر چاه متفاوت است و در هر سال به ترتیب در چاه شماره ۸۱ کاهش ۵۰ سانتیمتری، چاه شماره ۷ و ۳۹ کاهش ۴۰ سانتیمتری، چاه شماره ۱۶ و ۱۱ به ترتیب کاهش ۲۰ سانتیمتری را در روند سطح آب‌های زیرزمینی ثبت کرده‌اند. همچنین مشخص شد بین نوسانات بارش و تغییرات سطح آب‌های زیر زمینی (GRI) در چاه‌های پیژومتری شماره ۷ و ۷۴ در مقیاس ۳ ماهه همبستگی معنی‌داری در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ که با افزایش مقیاس زمانی ۶ تا ۴۸ ماهه میزان همبستگی در سطح اطمینان ۰/۰۱ می‌شود.

واژگان کلیدی: خشک‌سالی، روند، بافق، شاخص GRI، بارش.

^۱ استاد گروه آب و هواشناسی-برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه یزد.

^۲ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، مخاطرات محیطی، دانشگاه یزد.

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، آب و هواشناسی کاربردی، دانشگاه یزد.

مقدمه

2016). نتایج یک پژوهش بر روی پاسخ دهی سطح آب زیرزمینی به تغییرپذیری بارش در سفره‌های آبی مدیترانه نشان داد تغذیه برخی از سفره‌های زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، با تغییرپذیری بارندگی در محدوده مکانی محدود مرتبط است، در حالی که برای سفره‌های زیرزمینی واقع در دشت‌ها، تغییرپذیری بارش بر مناطق بسیار بزرگ‌تری تأثیر می‌گذارد. (Lorenzo et al., 2017). مطالعه توسعه خطر خشکسالی آب‌های زیرزمینی در منطقه آفریقا و خاورمیانه با استفاده از شاخص GRI مشخص شد سطح آب‌های زیر زمینی به سرعت در حال کاسته شدن می‌باشد (Lezzaik et al., 2018). در یک مطالعه ارزیابی چالش‌های خشکسالی در منطقه مدیترانه تحت سناریوهای آب و هوایی آینده نشان داد تأثیرات خشکسالی قابل توجهی در آینده برای کشورهای در حال توسعه در مناطق جنوبی و شرقی حوضه دریای مدیترانه انتظار می‌رود (Yves et al., 2020). نتایج یک پژوهش با استفاده از شاخص استاندارد برای تعیین کمیت خشکسالی آب‌های زیرزمینی در ایالات متحده مشخص شد در چاه‌های پیژومتری با افزایش مقیاس زمانی، میزان همبستگی بین شاخص SWI و SGI با زمان تأخیر در جورجیا و اوکلاهما نیز افزایش می‌یابد، اما زمان تأخیر در ماساچوست و واشنگتن تقریباً بدون تغییر بود (Guo et al., 2021).

نتایج یک پژوهش بر روی تغییرات روند آب زیرزمینی در مقیاس زمانی ماهانه در منطقه دشت اردبیل در دوره آماری ۱۳۸۷-۱۳۶۷ با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال نشان داد که تراز آب زیرزمینی اغلب ایستگاه‌های این منطقه دارای روند منفی و معنی‌دار می‌باشد (Daneshvar et al., 2011). نتایج یک مطالعه بر روی افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت الشتر در لرستان نشان داد به طور متوسط در هر سال ۶۵ سانتی‌متر آب‌های زیرزمینی افت داشته است (Asadi et al., 2016). بررسی روند سالیانه بارش و تغییرات سطح آب آبخوان در حوضه آبریز جهان‌بین و دشت شهرکرد با استفاده از شاخص‌های SPI، PNI، RAI، SWI، SIAP نشان از عملکرد منفی تراز آبی دارد (Ali

خشکسالی یکی از پدیده‌های پیچیده مخاطرات طبیعی است که هر سال به درجات مختلف در برخی از نقاط جهان رخ می‌دهد (Hesdal and Tallkesen, 2000). طبق برنامه سازمان محیط زیست سازمان ملل متحد، ایران تا سال ۲۰۱۵ به‌طور جدی و خطرناکی دچار کمبود آب خواهد شد. نشانه‌های این واقعه از سال ۱۳۷۶ نمایان و در سال ۱۳۸۰ در تهران و در سایر استان‌های کشور از جمله، خراسان، سیستان و بلوچستان، کرمان و سایر استان‌ها به اوج خود رسید. (Zadeh Nabouti, 2009). در میان ویژگی‌های خشکسالی، سه خصوصیت شدت، مدت و گسترش مکانی از اهمیت بیشتری برخوردارند. میزان استمرار خشکسالی در یک منطقه گویای شدت خشکسالی در آن منطقه است. زمان بر شدت خشکسالی تأثیر زیادی دارد. همچنین، خشکسالی می‌تواند در منطقه‌ای با وسعت چند صد کیلومتر مربع رخ دهد، ولی ممکن است شدت و مدت تداوم آن در سرتاسر منطقه یکسان نباشد (Pirmoradian et al. 2008). وضعیت استان یزد از لحاظ بارندگی در ۱۳ سال گذشته خشک و خیلی خشک بوده است. استان یزد طی ۴۳ سال گذشته تنها ۶ سال پرآب را تجربه کرده است. (Mohammadi et al., 2012). افزایش تقاضای آب و وقوع تغییر اقلیم، سال‌های اخیر را با حالات مختلفی از خشکسالی روبه‌رو کرده است (Mishra and Singh, 2010). نتایج یک مطالعه بر روی الگوی مکانی و زمانی مقادیر حداقل و حداکثر تراز آب زیرزمینی در ناحیه دلتای رودخانه پرل چین با روش من کندال نشان داد در قسمت بالایی دلتا روند تغییرات تراز آب زیرزمینی کاهشی و در قسمت‌های میانی و پایینی افزایشی است (Zhang et al., 2009). در یک مطالعه با استفاده از دو شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SDI و GRI در مقیاس‌های زمانی مختلف در حوضه رودخانه کریشنا در یک دوره آماری ۳۶ ساله مشخص شد همبستگی خوبی بین دو شاخص در مقیاس نه ماهه وجود دارد که با افزایش مقیاس زمانی به ۱۲ ماهه این ارتباط بیشتر می‌شود (Abhishek et al.,

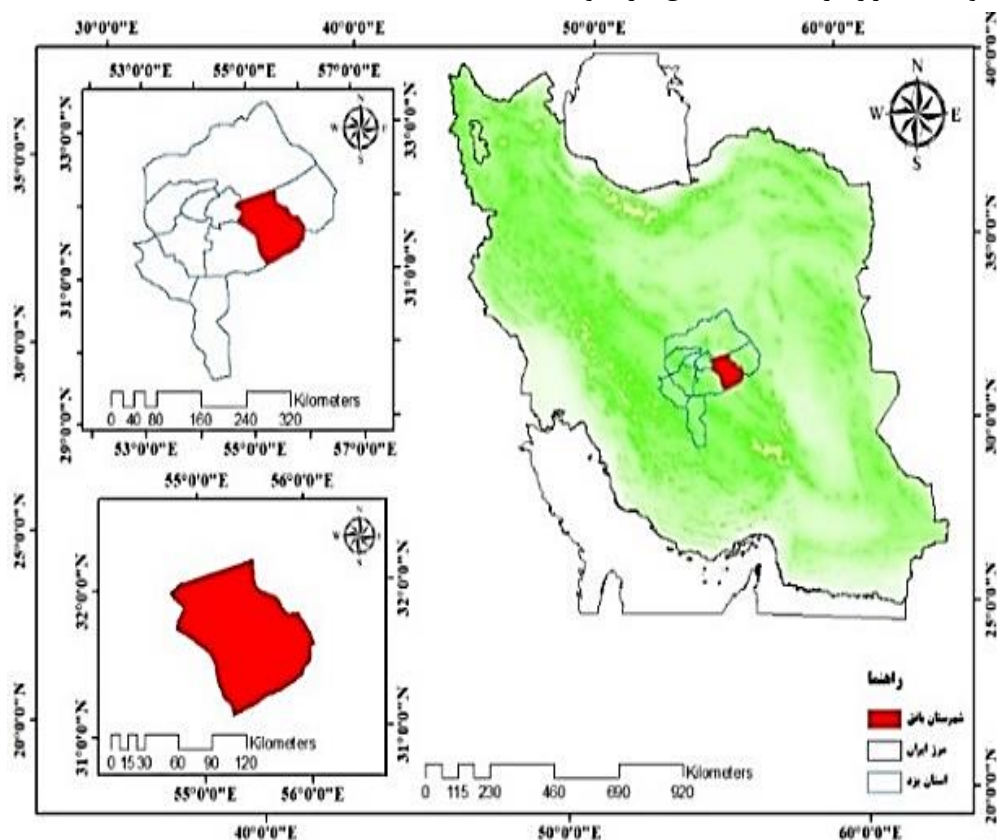
بسیار کم آب و وجود فعالیت‌های سنگین صنعتی، معدنی در این منطقه و اثرگذاری نوسانات آب‌های زیرزمینی بر روی فعالیت‌های کشاورزی و نیاز آب شرب این حوضه، بررسی روند آب ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش، مطالعه اثرگذاری بارش بر تغییرات تراز سفره‌های آب زیرزمینی با به‌کارگیری شاخص GRI است.

داده‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

شهرستان بافق (شکل ۱) در استان یزد از شمال و شمال غربی به شهرستان اردکان، از شمال شرقی به شهرستان طبس، از مشرق به شهرستان‌های کرمان و زرنند، از جنوب به شهرستان رفسنجان و از مغرب به شهرستان‌های یزد و مِه‌ریز محدود است. کوه بافق (بلندترین قله: ۲۲۰۲ متر) و بدبخت کوه (بلندترین قله: ۲۲۴۹ متر) در مغرب آن واقع است (Geographical Organization, 2002) موقعیت داده‌های دریافتی تغییرات سطوح آب زیر زمینی در چاه‌های مورد مطالعه نیز (جدول-۱) مشخص است.

(Mohammadi and Salehi 2017). نتایج یک مطالعه با استفاده از مدل کمترین مربعات به منظور بررسی تأثیر عوامل هیدرولوژیکی و هواشناسی بر خشک‌سالی آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد در استان اصفهان نشان داد که سطح آب زیرزمینی و دبی رودخانه، مؤثرترین متغیرها در پیش‌بینی خشک‌سالی آب زیرزمینی می‌باشند (Kamali and Asghari, 2009). در یک مطالعه ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی و تغییرات آب‌های زیرزمینی در دشت مهران استان ایلام نشان داد طی دوره آماری مدنظر ۴ دوره خشک‌سالی شدید اتفاق افتاده که شدیدترین آن سال آبی ۹۰-۹۱ بوده که مقدار شاخص SPI آن ۱/۷۳- می‌باشد. همچنین نتایج به‌دست آمده از شاخص GRI در منطقه نشان می‌دهد که یک دوره خشک‌سالی ۱۱ ساله آب‌های زیرزمینی اتفاق افتاده یعنی از سال آبی ۸۷-۸۸ شروع شده و تا سال آبی ۹۸-۹۷ ادامه داشته است که شدیدترین آن سال ۹۰-۹۱ با مقدار شاخص ۱/۱۱- می‌باشد (Abbasinia et al., 2020). با توجه به قرارگیری ایستگاه بافق در حوضه



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه (باقف).

Figure (1): Geographical location of the study basin (Bafq).

جدول (۱): موقعیت چاه‌های مورد مطالعه در حوضه بافق.

Table (1): Location of studied wells in Bafgh basin.

نام ایستگاه	UTM Y	UTM X	آمار از سال
چاه شماره ۱۶	۳۵۱۰۰۰۱	۹۲۰۳۰۱	۱۳۸۲-۱۳۹۵
چاه شماره ۲۳	۳۵۲۱۰۰۱	۹۳۰۳۰۱	۱۳۸۲-۱۳۹۵
چاه شماره ۷	۳۴۹۷۰۰۱	۹۲۰۳۰۱	۱۳۸۲-۱۳۹۵
چاه شماره ۳۹	۳۵۰۸۰۰۱	۹۳۰۳۰۱	۱۳۸۲-۱۳۹۵
چاه شماره ۷۴	۳۵۰۳۹۰۱	۹۲۱۳۰۱	۱۳۸۲-۱۳۹۵
چاه شماره ۱۱	۳۵۰۳۹۰۱	۹۱۴۷۰۱	۱۳۸۲-۱۳۹۵
چاه شماره ۸۱	۳۵۰۲۹۰۱	۹۱۶۷۰۱	۱۳۸۲-۱۳۹۵

EXCEL2019 محاسبه گردید. به منظور محاسبه شاخص GRI می‌توان عمق مشاهداتی آب‌های زیرزمینی را در مقیاس ماهانه و سالیانه و یا متوسط مجموع (میانگین متحرک) در هر بازه زمانی نظیر سه ماهه، شش ماهه و یا مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از یک توزیع مناسب مانند توزیع گاما یا پیرسون تیپ سه برازش داد. در سال ۱۹۸۸ برای شاخص مشابه، SPI که اساس محاسباتی آن بسیار شبیه به شاخص خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی است، گاتمن توزیع پیرسون تیپ سه را مناسب‌ترین توزیع برای برازش به داده‌های بارندگی پیشنهاد کرد (Guttman et al., 1999: 11).

مقدار شاخص بر پایه تابع چگالی توزیع احتمالی گاما برای $X < 0$ به صورت معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (2)$$

در معادله (۲) $a < 0$ پارامتر شکل $\beta < 0$ پارامتر مقیاس توزیع گاما و $X < 0$ مقدار عمق آب می‌باشد. در این رابطه $\Gamma(a) < 0$ نیز تابع گاما است.

مقدار شاخص GRI همانند شاخص SPI برای آبخوان دشت بافق یزد، طی دوره آماری ۱۴ ساله از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$GRI = (D_{y,m} - \mu_{D,m}) / \sigma_{D,m} \quad (3)$$

که در آن، GRI شاخص منابع آب زیرزمینی، $D_{y,m}$ مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در سال y و ماه m و $\mu_{D,m}$ میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی در ماه m و

روش پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی-توسعه‌ای و روش آن توصیفی-تحلیلی است. در این پژوهش به منظور تعیین روند بارش و آب‌های زیر زمینی چاه‌های پیژومتری حوضه بافق طی دوره ۱۴ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۵) اثرگذاری بارش بر روی نوسانات آب‌های زیرزمینی انجام شده است. ابتدا داده‌های اقلیمی مورد نیاز (بارش) از اداره هواشناسی کاربردی استان یزد به صورت روزانه برای یک دوره ۱۴ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۵) جهت تحلیل و واکاوی استفاده به عمل آمد. سپس داده‌های مربوط به چاه‌های پیژومتری موجود در دشت بافق از شرکت آب منطقه‌ای استان یزد دریافت شد. سپس به منظور انتخاب پایه زمانی مشترک تعداد ۷ چاه که آمار کامل‌تری داشت انتخاب گردید. شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) توسط (Mckee et al. 1993) ارائه شد. برای اولین بار در ایالت کلرادو آمریکا به کار بردند و دریافت کردند که توزیع گاما مناسب‌ترین توزیع هست و با توجه به بررسی تأثیرات متفاوت کمبود بارش بر روی آب‌های زیرزمینی، ذخایر و منابع آب سطحی، رطوبت خاک و جریان آبراهه ارائه شده است. شاخص SPI از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$SPI = \frac{X_{ji} - X_{j,m}}{SD} \quad (1)$$

X_{ji} = مقدار بارش در دوره موردنظر؛ $X_{j,m}$ = میانگین درازمدت بارش برای دوره موردنظر؛ SD = انحراف معیار مقدار بارش است. سپس با استفاده از شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی (GRI) در مقیاس زمانی مختلف برای چاه‌های مورد نظر بر اساس روابط موجود در نرم‌افزار

محاسبه و فرمول‌های محاسباتی این شاخص‌ها توسط (Mendicino et al., 2008). آورده شده است (جدول-۲).

$\sigma_{D,m}$ انحراف معیار سطح آب زیرزمینی در ماه m می‌باشد. طبقه‌بندی و تعیین وضعیت رطوبتی در مدل GRI شبیه مدل SPI است، زیرا در هر دو روش از توزیع نرمال استفاده شده است (Niko et al., 2010). شاخص‌های SPI و GRI یک مقدار نرمال شده با میانگین صفر و انحراف معیار یک می‌باشد. مراحل

جدول(۲): طبقه بندی شدت شاخص GRI و شاخص (SPI)

Table (2): Classification of GRI Index Intensity and SPI Index

شاخص SPI	مقادیر GRI	گروه
+۲ و بیشتر	۲ و بالاتر	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	۱ تا ۱/۴۹	ترسالی ملایم
۰/۹۹ تا -۰/۹۹	۰ تا ۰/۹۹	نزدیک به نرمال-ترسالی
-۱ تا -۱/۴۹	۰ تا -۰/۹۹	نزدیک به نرمال-خشک‌سالی
-۱/۵ تا -۱/۹۹	-۱ تا -۱/۴۹	خشک‌سالی ملایم
-۱ و کمتر	-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشک‌سالی شدید
	-۲ و کمتر	خشک سالی بسیار شدید

آزمون آماره‌های S میانگین صفر دارد و واریانس آن نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (۶)$$

در رابطه بالا t اندازه یک بازه زمانی در سری داده‌ها است و $\sum t$ نیز مجموع بازه‌ها (سری زمانی داده‌ها) است. برای مواردی که مدت سری زمانی داده‌های بیش‌تر از ۱۰ باشد ($n > 10$) آماره Z استاندارد شده را باید به کمک رابطه زیر محاسبه کرد (Lettenmaier et al, 1994).

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (۷)$$

مقادیر مثبت روند Z روند صعودی و مقادیر منفی Z روند نزولی سری داده‌ها را نشان می‌دهند (Vivekanandan, 2007). اگر روند در سری داده‌ها مشاهده شد، شیب واقعی (میزان تغییر در واحد زمان) را می‌توان با استفاده از روش ناپارامتری ساده‌ای که توسط سنس توسعه داده شده برآورد نمود. ابتدا باید شیب هر جفت داده متوالی

همچنین جهت بررسی روند بارش و بررسی روند تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی از روش ناپارامتری من-کندال و شیب سنس در مقیاس زمانی فصلی و سالانه استفاده شد. آزمون ناپارامتری من-کندال ابتدا توسط (Mann, 1945) ارائه و سپس توسط (Kendal, 1975). بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه یافت. این آزمون در سال ۱۹۸۸ به وسیله سازمان جهانی هواشناسی پیشنهاد شد و در بررسی معنی داری روند سری‌های اقلیمی به کرات و در موارد مختلف استفاده شده است.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (۴)$$

با قبول فرض H_0 توزیع S در حد $n \rightarrow \infty$ نرمال است. n مدت سری زمانی داده‌ها؛ x_k و x_j نیز داده‌های متوالی k ام و j ام سری است. که در این رابطه $k \leq j \leq n$ است و $\text{Sgn } k \neq j$ تابع علامت است؛ و تابع علامت نیز از روابط زیر مشخص می‌شود.

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (۵)$$

سری را از رابطه زیر به دست آورد:

$$Q_1 = \frac{(x_i - x_k)}{j - k} \text{ for } i - 1 \times 2 \times n \quad (8)$$

که در این رابطه X_i و X_k به ترتیب مقادیر داده‌ها در زمان‌های j و k است که با هم یک واحد زمانی اختلاف دارند. Q_1 مقدار میان‌ه‌ی n برآورد شده شیب نمودار سنس است. اگر n فرد باشد، برآورد کننده شیب سنس به این صورت محاسبه خواهد شد:

$$Q_{med} = Q_{(n+2)/2} \quad (9)$$

و اگر n زوج باشد، برآورد کننده شیب سنس از این رابطه به دست می‌آید:

$$Q_{med} = \frac{Q_n + Q_{(n+2)}}{2} \quad (10)$$

در ادامه سطح احتمال همبستگی بین مقادیر بارندگی و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش پیرسون در حوضه مورد نظر محاسبه شد. در این پژوهش به منظور بررسی خشک‌سالی از آمار چاه‌هایی استفاده شده است که علاوه بر پراکنش مناسب در محدوده مورد مطالعه، دارای آمار بلند مدت تری نیز باشند.

نتایج و بحث

بررسی روند تغییرات بارش در ایستگاه بافق به صورت فصلی و سالانه برای دوره ۱۴ ساله محاسبه و تحلیل گردید. نتایج به صورت جداول و نمودارهای منظم ترسیم و تحلیل شد. طبق نتایج اگر مقادیر Z بزرگ‌تر از $1/96$ یا پایین‌تر از $-1/96$ باشد نشان دهنده روند معنی‌داری است. تقریباً ۲۵ درصد از بارش‌ها سالانه ایستگاه بافق مربوط به بارش‌های فصل بهار است. بررسی روند و نقاط جهش در سری زمانه مورد مطالعه نشان داد هیچ‌گونه رابطه معنی‌دار و مشخصی در بارش‌های بهاره مشاهده نمی‌شود. (جدول-۳). آماره‌های آزمون سنس (Q) در سطوح احتمال ۹۹٪ و ۹۵٪ درصد نیز نشان داد به طور متوسط بارش بهاره ایستگاه بافق در هر سال چیزی در حدود $0/3$ میلی‌متر افزایش یافته است این شرایط به صورت کمینه و بیشینه بارش در سطح احتمال ۹۹٪ درصد به ترتیب برابر با $1/6$ و $1/9$ میلی‌متر بوده است. در حالی که کمینه و

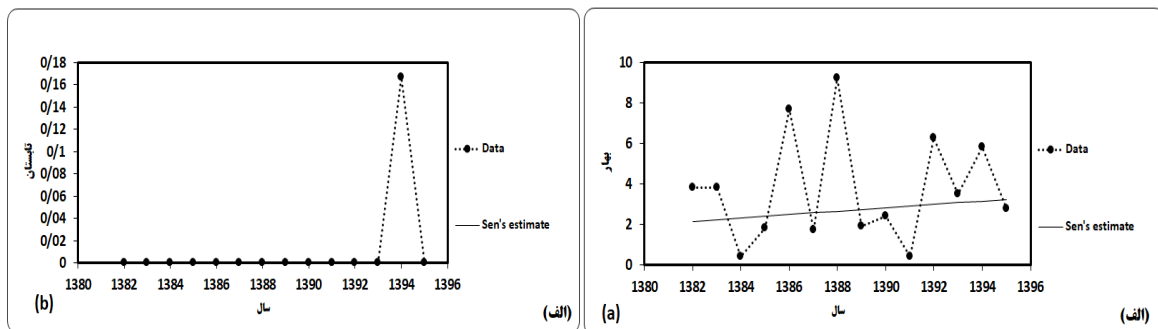
بیشینه کاهش و افزایش بارش در فصل بهار در سطح احتمال ۹۵٪ برابر با $1/10$ و $1/3$ میلی‌متر برآورد شده است (جدول-۳) و (شکل ۲-الف). شهرستان بافق در فصل تابستان به شدت گرم، خشک و کم بارش است. طبق نتایج آماره من-کندال (Z) روند معنی‌داری در میانگین بارش تابستانه مشاهده نشده است. همچنین آماره آزمون سنس (Q) در فصل تابستان در سطوح احتمال ۹۹٪ و ۹۵٪ درصد نیز روند افزایشی یا کاهش‌ی را در طول دوره مورد مطالعه نشان نمی‌دهد (جدول-۳) و (شکل ۲-ب). روند بارش فصل پاییز نیز همانند دیگر فصول سال مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت طبق نتایج به دست آمده در سری زمانی میانگین بارش بافق روند معنی‌داری مشاهده نشده است (جدول-۳). آماره آزمون سنس در سطوح احتمال مورد بررسی نشان داد که به طور کلی متوسط بارش پاییزه در هر سال کاهش $0/3$ میلی‌متری داشته است. (جدول-۳) و (شکل ۳-الف). در ایستگاه بافق بیشتر بارش‌ها در دوره سرد سال اتفاق می‌افتد (آذر، دی، بهمن) بیش از ۴۱٪ درصد از بارش‌های این ایستگاه مربوط به فصل زمستان است. هرگونه تغییر روند در میزان بارش این فصل می‌تواند بر روی روند سالانه بارش به شدت تأثیرگذار باشد. نتایج تحلیل آماره من-کندال (Z) نشان داد در سری زمانی میانگین بارش زمستانه روند معنی‌داری وجود ندارد. آماره‌های آزمون سنس (Q) در سطوح اطمینان مورد مطالعه تأییدکننده افزایش بارش زمستانه است. بدین ترتیب بارش ایستگاه مورد مطالعه در فصل زمستان هر سال افزایش $0/6$ میلی‌متری داشته است. ضمن اینکه کمینه و بیشینه کاهش بارش در سطح ۹۹٪ به ترتیب برابر با $3/2$ و $3/8$ میلی‌متر بوده است. در حالی که کمینه و بیشینه کاهش و افزایش بارش در فصل زمستان در سطح ۹۵٪ برابر با $2/10$ و $2/4$ میلی‌متر برآورد شده است (جدول-۳) و (شکل-۳:ب). نتایج تحلیل سالانه روند بارش نشان داد که به طور کلی روند معنی‌داری مشاهده نشده است (شکل ۴-ب) و نمودارهای U و U' در بالاتر از خطوط هم‌دیگر در سطح ۹۹٪ و ۹۵٪ درصد را قطع نکرده‌اند در واقع عدم قطع این نمودارها در بالاتر از خطوط معنی‌داری، به

داشته است (شکل ۴-الف و ب). بیشترین تأثیرگذاری بر روی افزایش بارندگی مربوط به فصل زمستان است.

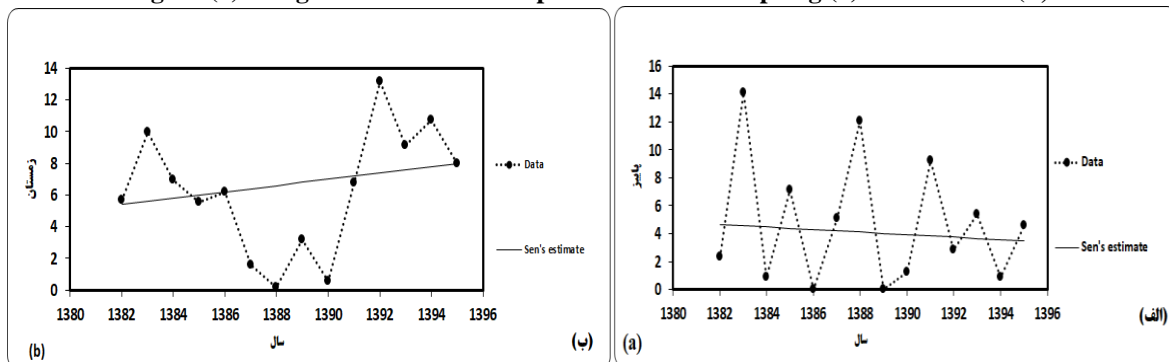
معنای قبول تصادفی بودن (قبول فرض H_0) و عدم وجود روند معنی‌داری (H_1) متغیر میانگین بارش بافق است. آماره‌های آزمون سنس در سطوح اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪ تأییدکننده افزایش بارش ایستگاه بافق است. بدین ترتیب بارش ایستگاه مورد مطالعه در طول سری زمانی مورد مطالعه در هر سال روند افزایش ۰/۸ میلی‌متری

جدول (۳): تغییرات روند میانگین فصلی و سالانه بارش ایستگاه بافق با استفاده از آزمون من-کندال و شیب سنس.
Table (3): Changes in the trend of seasonal and annual average rainfall of Bafgh station using Mann-Kendall test and Sen's slope.

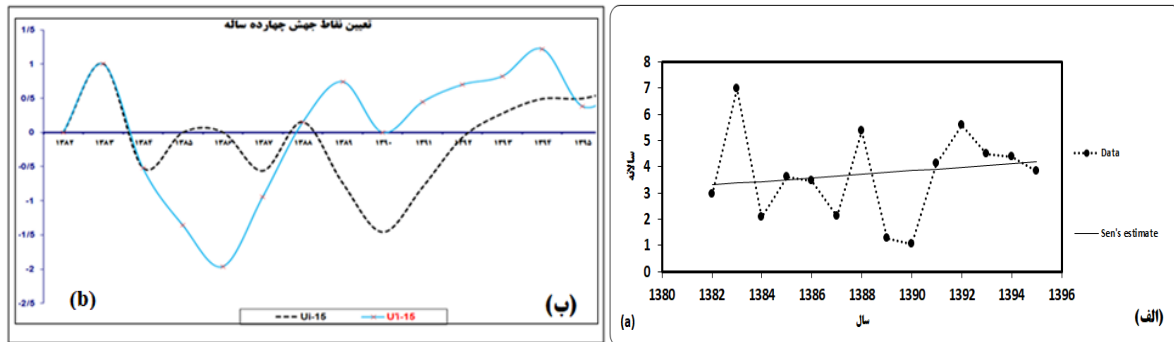
Test	Q	Qmin	Qmax	Qmin	Qmax	B	Bmin	Bmax	Bmin	Bmax	Time series
Z		99	99	95	95		99	99	95	95	
۰/۴۴	۰/۸	-۴/۳	۴/۸	-۲/۹	۳/۳	۳۹/۶	۷۳/۴	۱۰/۴	۶۴/۴	۱۸/۹	سالانه
۰/۳۳	۰/۳	-۱/۶	۱/۹	-۱	۱/۳	۶/۵	۱۸/۷	-۳/۵	۱۴/۳	۰/۱	بهار
۱/۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	تابستان
-۰/۲۲	-۰/۳	-۳/۵	۲/۴	-۲/۷	۱/۷	۱۴	۳۸/۵	-۶	۳۲/۲	-۱/۵	پاییز
۰/۷۷	۰/۶	-۳/۲	۳/۸	-۲	۲/۴	۱۶/۲	۳۱/۶	-۱۳/۴	۲۵/۸	۱/۸	زمستان



شکل (۲): آماره آزمون شیب سنس بارش ایستگاه بافق در فصل بهار (الف) و فصل تابستان (ب).
Figure (2): Bafgh station rainfall slope test statistics in spring (a) and summer (b).



شکل (۳): آماره آزمون سنس بارش ایستگاه بافق در فصل پاییز (الف) و فصل زمستان (ب).
Figure (3): Bafgh station rainfall test statistic in autumn (a) and winter (b).



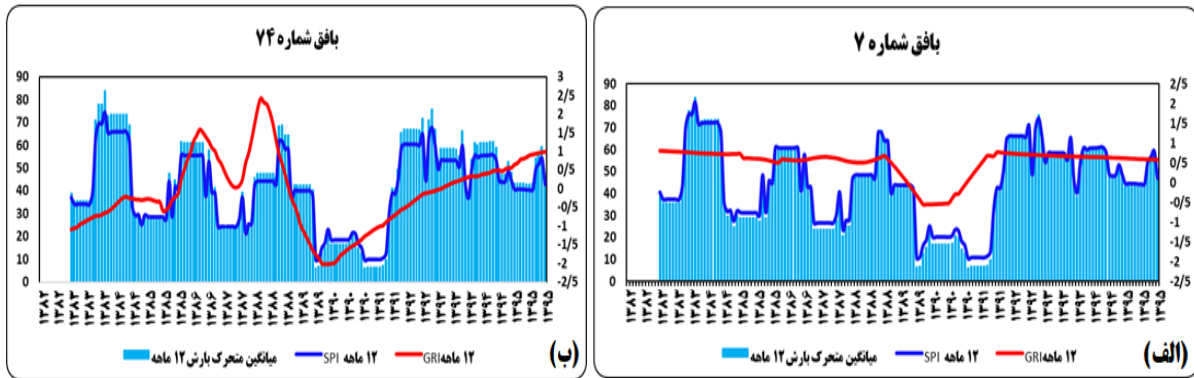
شکل (۴): آماره سالانه آزمون سنس (الف) و آماره آزمون من-کندال بارش ایستگاه بافق.

Figure (4): Annual statistics of Sen's test (a) and Mann-Kendall test statistics of Bafgh station.

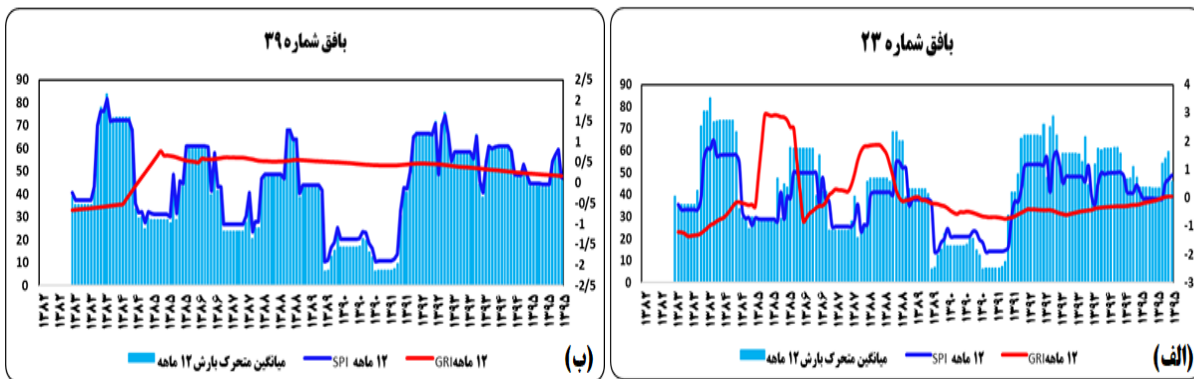
ب) در چاه شماره ۷۴ از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۱ شاخص SPI و شاخص GRI به صورت نسبتاً منظمی با نوسانات شاخص SPI واکنش نشان داده است (شکل ۵-ب). در چاه شماره ۲۳ از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ شاخص GRI به صورت تأخیری به نوسانات بارشی واکنش نشان داشته است. از سال ۱۳۸۹ که دوره خشک سالی شدید آغاز شد میزان تراز آب نیز کاهش یافته است. این شرایط تأییدکننده واکنش تراز سطح آب‌های این چاه به ترسالی و خشکسالی هواشناسی است. از ابتدای سال ۱۳۸۹ که حوضه مورد مطالعه وارد فاز خشکسالی هواشناسی شده است مقادیر شاخص GRI به سمت ارقام منفی و خشک سالی هیدرولوژیکی سوق پیدا کرده است. همچنین از سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ آغاز دوره ترسالی هواشناسی و بهبود وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی است. (شکل ۶-الف). به نظر می‌رسد نوسانات تراز آبی چاه شماره ۳۹ کمتر به نوسانات ترسالی و خشکسالی هواشناسی واکنش نشان داده است (شکل ۶-ب). در مورد خروجی چاه‌های شماره ۱۱، ۱۶ و ۸۱ می‌توان ادعا کرد که تراز آب در طول دوره مورد مطالعه به صورت ترسالی هیدرولوژیکی خروجی نداشته است. از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۵ وضعیت تراز آب چاه‌های ذکر شده به صورت مستمر از خشک سالی به سمت نرمال شدن سوق داشته است. می‌توان ادعا کرد که وضعیت نرمال و مطلوب ترسالی سال‌های بعد از سال ۱۳۹۱ توانسته است شاخص GRI را به مقادیر نرمال هیدرولوژیکی نزدیک کند و این شرایط باعث ایجاد بهبودی نسبی تراز آب‌های زیرزمینی گردد (شکل‌های ۷ و ۸).

مقایسه شاخص استاندارد سطح آب (SPI) و شاخص (GRI) در چاه‌های مورد مطالعه

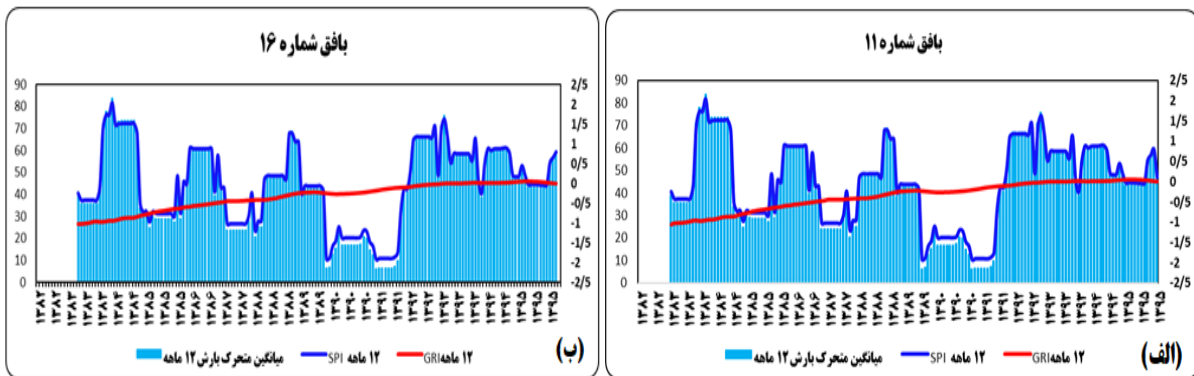
از بهترین روش‌های محاسبه کمی تغییرات آب‌های زیرزمینی، استفاده از شاخص تغییرات سطح ایستابی چاه‌های پیژومتری است. به طور کلی در یک دوره بلند مدت، هر قدر مقیاس زمانی مورد مطالعه کوتاه‌تر باشد، شدت خشکسالی کمتر خواهد بود (Bazrafshan et al., 2011). همچنین هر چقدر مقیاس زمانی مورد مطالعه افزایش یابد، تداوم خشکسالی بیشتر و تکرار آنها کمتر می‌شود (Asadi et al., 2009). در این مطالعه به دلیل تعداد زیاد نمودارهای ترسیمی فقط نمودارهای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه به عنوان نمونه نمایش داده شده است. به طور کلی در اکثر چاه‌های مورد مطالعه نوسانات مختلفی در تراز آب زیر زمینی مشاهده شده است نتایج حاصل از خروجی شاخص GRI با توجه به حداقل و حداکثر مقادیر به دست آمده در مقیاس‌های زمانی مختلف متفاوت است. بررسی ماهانه شاخص SPI و GRI نشان داد که از اواخر سال ۱۳۸۸ خشکسالی هواشناسی به حداکثر دوره تداوم و شدت خود رسیده است. طی همین دوره زمانی روند خشکسالی هیدرولوژیکی تداوم دار شاخص GRI آغاز شده است. اما با آغاز دوره خشک سالی متداوم و شدید سال ۹۰-۱۳۸۹ تا اواخر سال ۱۳۹۱ روند کاهش تراز آب در اکثر چاه‌ها آغاز شده است. از اواخر سال ۱۳۹۱ که شرایط نرمال بارشی به صورت ترسالی سوق پیدا کرده است شاخص GRI نیز به سمت افزایشی و بهبود سوق پیدا کرده است. (شکل: ۵-الف و



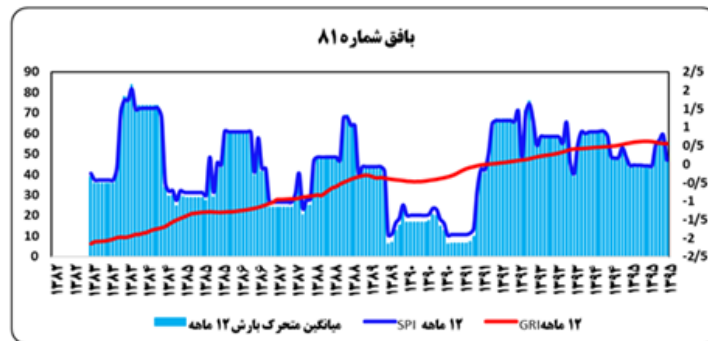
شکل (۵): تغییرات شاخص GRI و SPI در مقیاس ۱۲ ماهه در چاه شماره ۷ (الف) و چاه شماره ۷۴ (ب).
 Figure (5): Changes in GRI and SPI index on a 12-month scale in well number 7 (a) and well number 74 (b).



شکل (۶): تغییرات شاخص GRI و SPI در مقیاس ۱۲ ماهه در چاه شماره ۲۳ (الف) و چاه شماره ۳۹ (ب).
 Figure (6): Changes in GRI and SPI index on a 12-month scale in well number 23 (a) and well number 39 (b).



شکل (۷): تغییرات شاخص GRI و SPI در مقیاس ۱۲ ماهه در چاه شماره ۱۱ (الف) و چاه شماره ۱۶ (ب).
 Figure (7): Changes in GRI and SPI index on a 12-month scale in well number 11 (a) and well number 16 (b).



شکل (۸): مقایسه تغییرات شاخص GRI و SPI در مقیاس ۱۲ ماهه در چاه شماره ۸۱.
 Figure (8): Comparison of changes in GRI and SPI index on a 12-month scale in well number 81.

تحلیل روند تراز سفره آب زیر زمینی

نتایج آماره Z فصلی و سالانه حاصل از آزمون روند سطح آب‌های زیر زمینی در حوضه شهرستان بافق در یک دوره ۱۴ ساله تجزیه و تحلیل شد. از نتایج خروجی به دست آمده می‌توان استنباط کرد به طور کلی در اکثر چاه‌های مورد بررسی دسترسی به سطح آب‌های زیر زمینی بیشتر شده و مثبت شدن مقادیر آماره من-کندال (Z) تأییدکننده این مسئله است کمترین آماره Z فصلی مربوط به مقادیر چاه شماره ۲۳ است که در این چاه روند معنی داری در تغییرات سطح آب‌های زیر زمینی مشاهده نمی‌شود. بیشترین آماره Z ثبت شده مربوط به چاه‌های شماره ۷ و ۱۱ با مقدار ۴/۹۳ در فصل بهار است که نشان از تغییرات بسیار شدید و معنی دار در فصل بهار در چاه‌های نام برده است. در مقیاس سالانه چاه شماره ۷ با نمره ۴/۸۲ بیشترین روند معنی داری را

به خود اختصاص داده است (جدول ۴). نتایج خروجی شیب روند نشان از کاهش ۵۰ سانتی‌متری تراز آب در هر سال برای چاه شماره ۸۱ دارد که نشان از شرایط بحرانی کاهش تراز آب در این چاه است. با ادامه این روند کاهش طی یک دوره ۲۰ ساله کاهش ۱۰ متری تراز آب را برای چاه مورد نظر اتفاق می‌افتد. میزان کاهش سالانه تراز آب زیر زمینی در هر چاه متفاوت است و این مقدار به ترتیب در چاه شماره ۷ کاهش ۴۰ سانتی‌متری، در چاه شماره ۳۹ کاهش ۳۰ سانتی‌متری، در چاه شماره ۱۶ و ۱۱ به ترتیب کاهش ۲۰ سانتی متری و چاه شماره ۷۴ کاهش ۱۰ سانتی متری وجود دارد. در چاه شماره ۲۳ روند افزایشی یا کاهش مشاهده نشده است. بنابراین می‌توان ادعا کرد در تمام حوضه بافق سالانه بین ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر تراز آب زیر زمینی کاهش می‌یابد (جدول ۵) و (شکل‌های ۹ تا ۱۲).

جدول (۴): مقادیر آماره Z تراز سطح آب در حوضه‌های مورد مطالعه در شهرستان بافق طی دوره ۱۴ ساله (متر).

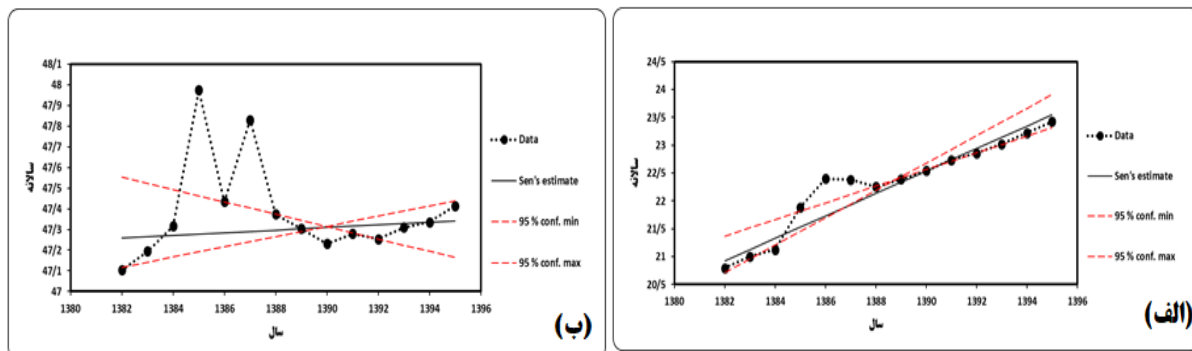
Table (4): Z-level statistics of water level in the studied basins in Bafgh city during a period of 14 years.

مقیاس زمانی	چاه شماره ۲۳	چاه شماره ۱۶	چاه شماره ۷	چاه شماره ۳۹	چاه شماره ۷۴	چاه شماره ۱۱	چاه شماره ۸۱
بهار	۱/۰۹	۴/۴۹	۴/۹۳	۴/۷۱	۱/۶۴	۴/۹۳	۴/۶۰
تابستان	۰/۱۱	۴/۳۸	۴/۹۳	۴/۶۰	۱/۵۳	۴/۴۹	۴/۴۹
زمستان	۱/۵۳	۴/۱۶	۴/۸۲	۴/۱۶	۱/۳۱	۴/۰۵	۴/۷۱
پاییز	۱/۵۳	۴/۷۱	۴/۹۳	۴/۳۳	۱/۵۳	۴/۶۰	۴/۷۱
سالانه	۰/۴۴	۴/۴۹	۴/۹۳	۴/۸۲	۱/۳۱	۴/۷۱	۴/۷۱

جدول (۵): شیب روند تراز سطح آب (Q) در حوضه‌های مورد مطالعه در شهرستان بافق طی دوره ۱۴ ساله (متر).

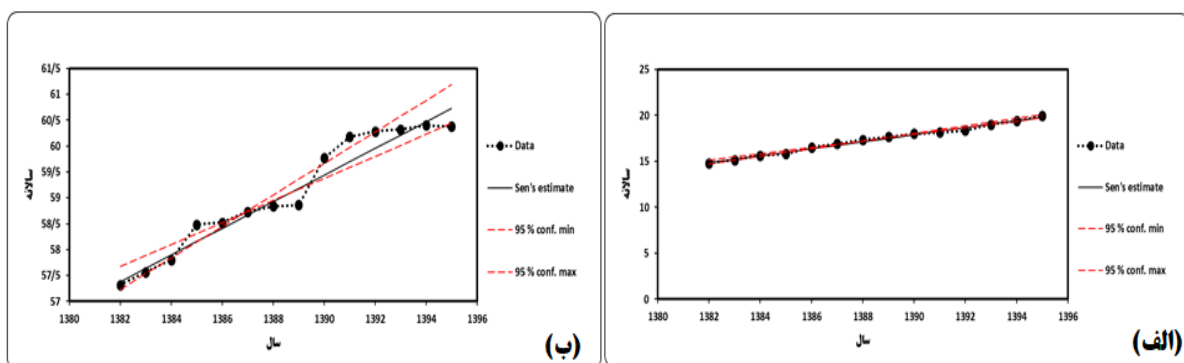
Table (5): Slope of water level (Q) trend in the studied basins in Bafgh city during a period of 14 years (m).

مقیاس زمانی	چاه شماره ۲۳	چاه شماره ۱۶	چاه شماره ۷	چاه شماره ۳۹	چاه شماره ۷۴	چاه شماره ۱۱	چاه شماره ۸۱
بهار	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۱	۰/۲	۰/۵
تابستان	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۱	۰/۲	۰/۴
زمستان	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۵
پاییز	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۱	۰/۲	۰/۵
سالانه	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۱	۰/۲	۰/۵



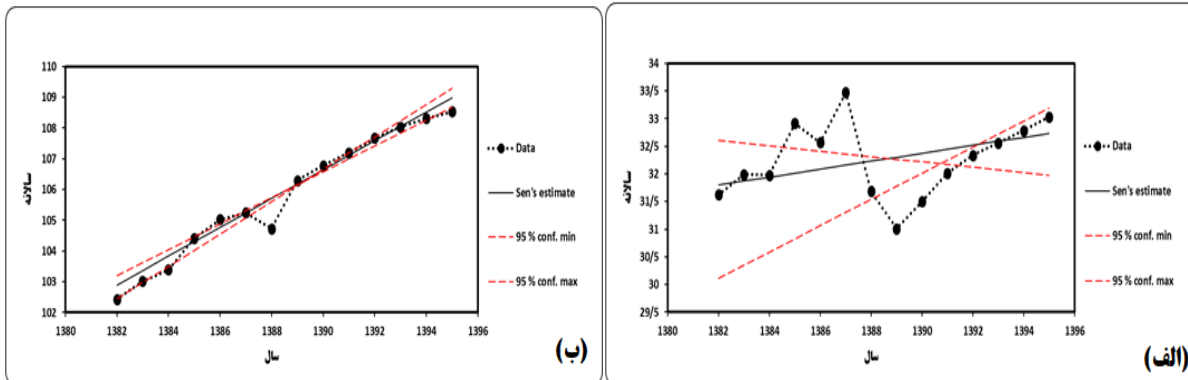
شکل (۹). آماره آزمون شیب سنس سالانه سطح آب‌های زیر زمینی چاه شماره ۱۶ (الف) و چاه شماره ۲۳ (ب).

Figure (9). Annual Sen's Slope Test Statistics of Groundwater Level No. 16 (a) and Well No. 23 (b).



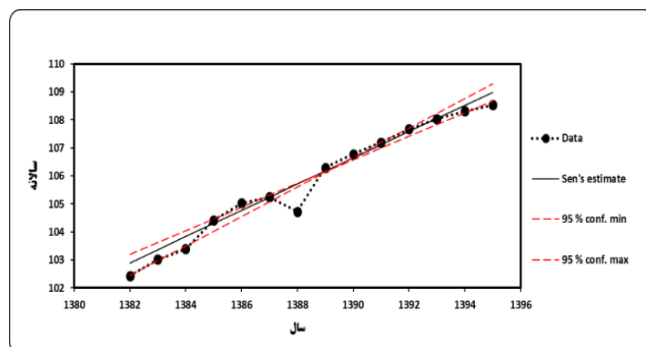
شکل (۱۰). آماره آزمون شیب سنس سالانه سطح آب‌های زیر زمینی چاه شماره ۷ (الف) چاه شماره ۳۹ (ب).

Figure (10). Annual Sen's Slope Test Statistics of Groundwater Surface of Well No. 7 (a) Well No. 39 (b).



شکل (۱۱). آماره آزمون شیب سنس سالانه سطح آب‌های زیر زمینی چاه شماره ۷۴ (الف) و چاه شماره ۱۱ (ب).

Figure (11). Annual Sen's Slope Test statistics of Groundwater level of well No. 74 (a) and well No. 11 (b).



شکل (۱۲). آماره آزمون شیب سنس سالانه سطح آب‌های زیر زمینی چاه شماره ۸۱ ایستگاه بافق.

Figure (12). Annual Sen's Slope Test Statistics of Groundwater Level No. 81 of Bafgh Station.

همبستگی بین بارش و شاخص (GRI)

معنی دار و مشخصی وجود ندارد اما در پیژومتر شماره ۷ و شماره ۷۴ در مقیاس زمانی ۳ ماهه میزان همبستگی در سطح ۵ درصد معنی داری است. همچنین در چاه شماره ۷ و ۷۴ در مقیاس‌های زمانی ۶ تا ۴۸ ماهه میزان همبستگی در سطح ۱ درصد دارای رابطه مثبت معنی داری است. به همین دلیل با توجه به مثبت و معنی دار بودن مقادیر همبستگی عمق آب‌های زیر زمینی با افزایش بارش (SPI) صعودی می‌شود. در پیژومتر شماره ۳۹ میزان همبستگی در مقیاس ۱۲ ماهه به بعد رابطه معنی دار می‌شود. بدین صورت که در مقیاس زمانی ۳ تا ۶ ماهه هیچ‌گونه رابطه معنی دار و مشخصی در چاه ذکر شده وجود ندارد اما از ۱۲ تا ۴۸ ماهه میزان همبستگی در سطح ۱ درصد داری رابطه معنی دار و مشخصی است. (جدول-۶). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در برخی از چاه‌های مورد مطالعه با افزایش مقیاس زمانی بین بارش و تراز آب زیر زمینی مقادیر همبستگی بیشتر می‌شود.

بررسی ارتباط نوسانات بارندگی و تغییرات سطح آب‌های زیر زمینی در دوره آماری مشترک در حوضه‌های مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته شد. بنابراین تعیین اثرات کاهشی و افزایشی بارش به عنوان عامل اصلی دوره‌های ترسالی و خشکسالی هیدرولوژیکی، با استفاده از همبستگی پیرسون ارزیابی شد. در واقع با استفاده از این روش به جستجوی ارتباط زمانی کاهشی یا افزایشی سطح آب زیرزمینی با بارش پرداخته شده است. بدین صورت که هر زمان مقدار بارندگی کاهش یافته، چه مدت زمان طول خواهد کشید تا تأثیر خود را بر روی آب‌های سطحی بگذارد. همان طور که مشخص است نوسانات شاخص GRI و بارش استاندارد شده در برخی از ایستگاه‌ها تقریباً رفتار مشابهی دارند. نتایج نشان داد بین بارش و تغییرات شاخص سطح آب زیر زمینی (GRI) در چاه‌های شماره ۲۳، ۱۶، ۱۱ و ۸۱ بافق در مقیاس در مقیاس زمانی ماهانه (۳، ۱، ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ماهه) رابطه

جدول (۶): ضرایب همبستگی بین بارش‌های و تغییرات سطح آب زیرزمینی.

Table (6): Correlation coefficient between precipitation and groundwater level changes.

شماره چاه	ماه ۱	ماه ۳	ماه ۶	ماه ۱۲	ماه ۱۸	ماه ۲۴	ماه ۳۶	ماه ۴۸
چاه شماره ۲۳	-۰/۰۲	-۰/۰۳	-۰/۱۴	-۰/۱۳	-۰/۱۱	-۰/۱	۰/۰۵	-۰/۰۷
چاه شماره ۱۶	۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۰۱	-۰/۰۱	-۰/۰۱	-۰/۰۳	۰/۰۴	-۰/۰۲
چاه شماره ۷	۰/۰۶	۰/۱۹*	۰/۲۵**	۰/۵۵**	۰/۵۸**	۰/۷۶**	۰/۸۱**	۰/۸۸**
چاه شماره ۳۹	-۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۳۱**	۰/۳۰**	۰/۳۹**	۰/۴۱**	۰/۵۷**
چاه شماره ۷۴	۰/۱۴	۰/۱۹**	۰/۲۵**	۰/۴۳**	۰/۳۹**	۰/۴۹**	۰/۶۳**	۰/۶۴**
چاه شماره ۱۱	-۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۱	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱
چاه شماره ۸۱	-۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۸

** و * : به ترتیب معنی داری در سطح ۰/۰۱ و ۰/۰۵ درصد

۰/۸ میلی‌متری بارش در هر سال دارد که این افزایش بارندگی مربوط به افزایش بارش در فصل زمستان است. شیب سنس به دلیل ثبت مقادیر دقیق‌تر کاهشی یا افزایشی در پارامترهای مورد بررسی نتایج مؤثرتری داشته است. همچنین مشخص شد در برخی از حوضه‌های مورد مطالعه بین بارش و تغییرات شاخص سطح آب زیر زمینی (GRI) به ویژه در چاه‌های پیژومتر شماره ۷ و شماره ۷۴ در مقیاس زمانی ۳ ماهه میزان همبستگی در سطح ۵ درصد داری همبستگی معنی داری است که با افزایش

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تعیین روند بارش و اثرگذاری بارش بر روی آب‌های زیرزمینی حوضه بافق برای یک دوره چهارده ساله (۱۳۹۵-۱۳۸۲) مورد تحلیل و واکاوی قرار گرفت. نتایج آزمون من-کندال (Z) نشان داد در سری زمانی مورد مطالعه در میانگین بارش بافق روند معنی دار و مشخصی مشاهده نشده است. خروجی آماره آزمون سنس (Q) در سطوح احتمال ۰/۹۹ و ۰/۹۵ نشان از روند افزایشی

- 3- Ahmadi Akhormeh, M., and Nohegar, A., and Soleimani Motlagh, M., and Taei Samirmi, M. (2015). Investigation of groundwater drought using SWI and GRI indices in the aquifer of Marvdasht Kharameh study area of Fars province. *Irrigation and Water Engineering of Iran*, 6 (21), 105-118.
- 4- Ahmadi Akhormeh, M., Nohegar, A., Soleimani Motlagh, M., Taei Samirmi, M.
- 5- Ali M R., Salehi, Y., (2017). Analysis of Annual Rainfall Trends and Water Level Changes in Shahrekord Aquifer, 2nd Iranian National Hydrology Conference, Shahrekord, Shahrekord University, Iranian Hydrological Association.
- 6- Alizadeh Nabouti, M. (2009). Analysis of climatic drought and its effects on water intake of Amirkabir Dam lake. Master Thesis in Natural Geography (Climatology in Environmental Planning), Yazd University.
- 7- Asadi, N., Kaki, M., Jamoor, R. (2016). Groundwater level decline and compensatory harvesting method in Dasht-e-Aleshtar aquifer in Lorestan province in the statistical period of 1381-88, No. 9, pp. 126-107.
- 8- Bazrafshan, A., Mohseni Saravi, M., Malekian, A., and Moeini, A. (2011). Investigation of drought situation in Golestan province using standard precipitation index (SPI). *Iranian Range and Desert Research*, 18 (3 (44)), 395-407.
- 9- Daneshvar Vosoughi, F., Dinpajoo, Y., Alami, M. (2011). The effect of drought on groundwater level in the last two decades (Case study: Ardabil plain). *Journal of Soil and Water Knowledge*, Volume 21, Number 4, pp. 179-165.
- 10- Geographical culture of the villages of Yazd province (2002). *Geographical Organization of the Armed Forces*, 1st edition.
- 11- Guo, M., Yue, W., Wang, T., Zheng, N., & Wu, L. (2021). Assessing the use of standardised groundwater index for quantifying groundwater drought over the conterminous US. *Journal of Hydrology*, 598, 126227.
- 12- Hisdal, H. and Tallaksen, L., (2000). Drought Event Definition, Technical Report to the ARID Project, No. 6, p. 45.

مقیاس زمانی میزان همبستگی بیشتر شده است و در مقیاس‌های زمانی ۶ تا ۴۸ ماهه میزان همبستگی در سطح ۱ درصد رابطه معنی داری می‌شود. به همین دلیل با توجه به مثبت و معنی دار بودن مقادیر همبستگی عمق آب‌های زیر زمینی با افزایش شاخص SPI صعودی می‌شود. در پی‌زومتر شماره ۳۹ میزان همبستگی در مقیاس ۱۲ ماهه تا ۴۸ ماهه در سطح ۱ درصد معنی دار می‌شود این شرایط نشان از تأثیرگذاری بارش‌ها بر روی تراز آب به صورت تأخیری در این چاه است. همچنین در یک مطالعه مشخص شد خروجی دو شاخص GRI و SWI از نظر زمانی شروع خشکسالی آب زیرزمینی تداوم، شدت و فراوانی نیز افزایش یافت؛ طوری که شدیدترین خشکسالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه رخ داده است (Ahmadi Akhormeh et al., 2015). نتایج آماره Z فصلی نشان داد که به طور میانگین در تمام حوضه مورد مطالعه سطح دسترسی به آب زیرزمینی روند صعودی و معنی دار دارد بنابراین تراز آب به صورت نزولی است. نتایج خروجی شیب روند نشان از کاهش ۷ متری تراز آب برای دوره ۱۴ ساله در چاه شماره ۸۱، کاهش ۵/۶ متری در چاه شماره ۷، کاهش ۴/۲ متری در چاه شماره ۳۹، کاهش ۲/۸ متری در چاه‌های شماره ۱۶ و ۱۱ و کاهش ۱/۴ متری در چاه شماره ۷۴ است. همچنین کمترین میزان ثبت شده برای چاه شماره ۲۳ می‌باشد که هیچ‌گونه روندی در سطح آب‌های زیرزمینی نداشته است. بنابر این می‌توان ادعا کرد در تمام حوضه بافق سالانه بین ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر تراز آب زیر زمینی کاهش می‌یابد.

منابع

- 1- Abbas Nia, A., Morshedi, J., Zohourian, M., Ghorbaniyan, J., (2021). Analysis and comparison of SPI and GRI indices in the assessment of meteorological drought and groundwater, Case study: Mehran plain, Ilam province. *Natural Geography*, 14, 95-114.
- 2- Abhishek, A., P. Channaveerappa and B.M. Dodamani. (2016). Comparison of two hydrological drought indices. *Perspectives in Science*, 8(2016): 626-628.

- in a Mediterranean climate. *Hydrology Journal*, 357:282-302.
- 22- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- 23- Mohammadi, S., Selajgeh, A., Mahdavi, M., Bagheri, R. (2012). Investigation of spatial and temporal changes of groundwater level in Kerman plain using appropriate geostatistical method (during a 10-year statistical period, 1375-1385). *Iranian Rangeland and Desert Research Quarterly*, V, 91, Number 1, pp. 71-60.
- 24- Pirmoradian, N., Shamsnia, S., Bustani, F., Shahrokhnia, M. (2008). Evaluation of drought return period using standardised precipitation index (SPI) in Fars province. *Crop Ecology (Modern Agricultural Knowledge)*, 4 (13), 7-21
- 25- Vivekanandan, N. (2007). Analysis of Trend in Rainfall Using Non-Parametric Statistical Methods, international symposium on rainfall rate and radio wave propagation", American Institute of physics. P101-113.
- 26- Yves, T., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S. M., Volaire, F., Boone, A., & Polcher, J. (2020). Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews*, 103348.
- 27- Zhang, W., Yan, Y., Zeng, J., Li, L., Dong, X., and Cai, H. (2009). Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. *J. Global Planetary Change*. 69: 35-47.
- 13- Kamali, Sh., Asghari, K., (2009). Investigation of the effect of meteorological and hydrological parameters on groundwater drought prediction, 11th National Congress of Civil Engineering, Shiraz, Shiraz University.
- 14- Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London.
- 15- Lettenmaier, D.P., Wood, E.F. and Wallis, J.R. (1994). Hydro-climatological trends in the Continental United States, 1948-88. *Journal of Climate*, 7: 586-607.
- 16- Lezzaik, K., Milewski, A., & Mullen, J. (2018). The groundwater risk index: Development and application in the Middle East and North Africa region. *Science of the Total Environment*, 628, 1149,1164.
- 17- Lorenzo-Lacruz, J., Garcia, C., & Morán-Tejeda, E. (2017). Groundwater level responses to precipitation variability in Mediterranean insular aquifers. *Journal of Hydrology*, 552, 516-531.
- 18- Mahdavi, M. 2005. *Applied Hydrology*, Volume 2. Third Edition. President of the University of Tehran 437 p.
- 19- Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against the trend, *Econometrica* 13:163-171.
- 20- Mckee, B, T. Nolan, J. Doesken, And Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to timescales. 8th.Conference on Applied Climatology.17-22January, Anaheim, CA, pp.179-184.
- 21- Mendicino, G., A. Senatore and P. Versace, (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting



Investigating the trend of changes in groundwater resources and its relationship with meteorological drought (SPI) (Case study: in Bafgh)

1- Kamal Omidvar^{1,*}

2- Nezam Tani

3- Raziye Azizi

*Corresponding author: komidvar@yazd.ac.ir

Received: 2021/12/31; Accepted: 2022/02/14

Abstract

Droughts, which affect the economy, the environment, migration, groundwater depletion, and many other problems, have posed serious challenges to humans. This study aimed to investigate the trend of groundwater changes in piezometric wells and the effect of precipitation on groundwater fluctuations in the Bafgh Basin during 14 years (2003-2016). The data were then adjusted and analysed on a quarterly and annual average. Therefore, using the non-parametric Mann-Kendall statistical method, the significance of precipitation trend and groundwater level was investigated. Also, using Sen's line slope estimator method, the slope of the trend line was tested. The results showed that there is no significant trend in rainfall at Bafgh station. However, the output of Sen's test statistics at 99% and 95% probability levels confirms an increase of 0.8 mm of precipitation per year. It was also found that the water level is declining in most of the wells. This amount of reduction varies in the basin of each well and each year in well number 81, a 50 cm decrease, wells number 7 and 39, a 40 cm decrease, wells 16 and 11, respectively, have recorded a decrease of 20 cm in the groundwater level trend. It was also found that there was a significant correlation between precipitation fluctuations and groundwater changes (GRI) in piezometric wells No. 7 and 74 on a 3-month scale at a confidence level of 0.05, which increased with a time scale of 6 to 48 months. A confidence level of 0/01 becomes significant.

Keywords: Drought, trend, Bafgh, GRI index, precipitation.

¹ Department of Water Structures Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.