



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه علمی فضای جغرافیایی

سال بیست و دوم، شماره ۷۸
تابستان ۱۴۰۱، صفحات ۵۳-۳۱

DOI:10.52547/GeoSpa.22.2.31

* حمید نوری^۱
علیرضا ایلدرمی^۲
مریم بخشی^۳

بررسی کیفیت آب زیرزمینی در شرایط تغییر اقلیم و خشکسالی های آینده در دشت سیلاخور بروجرد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۰۶

چکیده

شناخت تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی تحت تاثیر تغییر اقلیم گام مهمی در مدیریت حوزه های آبخیز کوهستانی به ویژه در اقلیم مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می شود. پارامترهای اقلیم آینده با استفاده از داده های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و ساعات آفتابی دوره پایه (۱۳۷۱ تا ۱۳۹۵) در دشت کشاورزی سیلاخور بروجرد، با مدل گردش عمومی جو HADCM3 و مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG طبق دو سناریوی B1 و A2 پیش بینی شد. با استفاده از شاخص خشکسالی SPI، سال های تر و خشک در دوره پایه تعیین و وضعیت خشکسالی آینده پیش بینی گردید. با استفاده از داده های کیفی آب ۱۸ چاه حوزه مورد مطالعه، توزیع پارامترهای TDS، EC، PH، SAR با استفاده از چهار روش اصلی پهنه بندی در زمین آمار (Kriging, RBF, IDW) و Cokriging) مورد بررسی قرار گرفت و نقشه های پراکنش آن ها تهیه و با استفاده از شاخص ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)، بهترین مدل انتخاب گردید. در آخر با استفاده از روش تحلیل عاملی و آنالیز واریانس اثر تغییر اقلیم و خشکسالی ها بر پارامترهای ژئوشیمیایی آب بررسی شدند. نتایج نشان داد که برای پارامترهای TDS، PH، SAR و EC به ترتیب روش های کوکریجینگ معمولی، کوکریجینگ ساده، کوکریجینگ ساده و کوکریجینگ ساده مناسب تر بوده اند. در بین پارامترهای مورد بررسی TDS و EC بیشترین همبستگی را با دمای میانگین داشته و

E-mail: hamidwatershed@yahoo.com

*۱- دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر. (نویسنده مسئول).

۲- دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر.

۳- کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر.

SAR همبستگی بالایی با پارامترهای اقلیمی نداشته است. پارامتر PH همبستگی منفی قوی و معنی‌داری با دمای حداقل دارد. نتایج از عدم تاثیر معنی‌دار کلاس‌های خشکسالی و ترسالی بر کیفیت آب به غیر از PH دارد. در حالی‌که خشکسالی‌های شدید بر همه پارامترهای کیفی آب اثر معنی‌دار دارند. بررسی تغییر اقلیم نشان می‌دهد که با افزایش دمای حداقل و حداکثر در سال‌های آینده TDS و EC افزایش و PH کاهش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: زمین‌آمار، LARS-WG، کیفیت آب زیرزمینی، خشکسالی، دشت سیلاخور

مقدمه

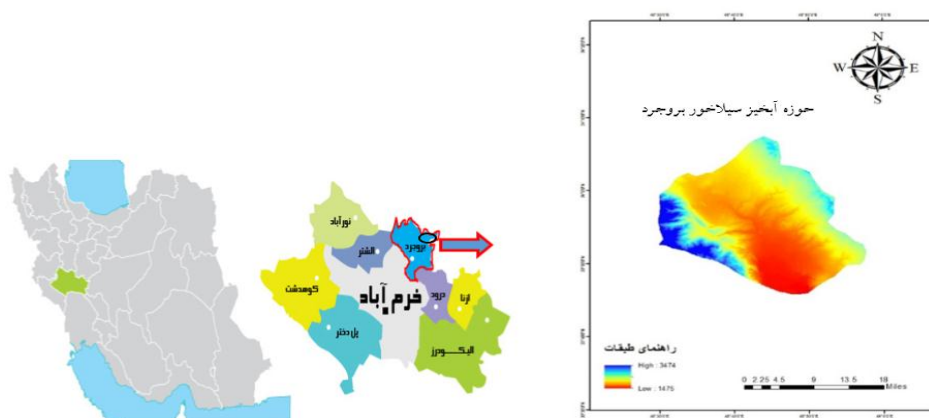
صنعتی شدن جوامع و افزایش گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های گذشته باعث افزایش دمای کره زمین شده به طوری که از سال ۱۹۰۱ تا سال ۲۰۱۲ دمای سطح زمین و اقیانوس‌ها به طور متوسط در حدود ۰/۸۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (Zulkarnain et al., 2013: 257). اقلیم، شرایط متوسط آب‌وهوا برای یک محدوده خاص در یک دوره زمانی خاص می‌باشد. تغییر اقلیم عبارت است از تغییرات رفتار آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلندمدت از اطلاعات ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است. افزایش گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی و در نتیجه تشدید تغییرات پارامترهای اقلیمی، می‌تواند بر سیستم‌های مختلف از جمله منابع آب، محیط‌زیست، صنعت، بهداشت، کشاورزی و کلیه سیستم‌هایی که در کنش با سیستم اقلیم می‌باشند (Habibnejad Roshan et al., 2017: گزارش کرد (IPCC, 2001: 1425) و (Massah Bovani and Golmohammadi, 2010).

نتایج مطالعات محققان در ایران (Bakhtiari et al., 2014: 695, Rezaei et al., 2014: 89, Babaeian and Najafinik, 2007: 14 و (Doosti et al., 2013: 24) و خارج از کشور (Masanganise, Lizumi et al., 2012: 51) et al., 2013: 3011) و (Zulkarnain et al., 2013: 243) نشان‌دهنده توانمندی بسیار خوب مدل LARS-WG برای مدل‌سازی دماهای بیشینه و کمینه و همچنین استفاده از آن برای ارزیابی تغییر اقلیم در دهه‌های آتی می‌باشد. آن‌ها کارایی مدل‌های گردش عمومی جو را برای پیش‌بینی دما و بارش مورد ارزیابی قرار داده و نشان دادند که این مدل‌ها گاهی دما و گاه بارش را بهتر شبیه‌سازی می‌کنند. همچنین نتایج حاکی از آن است که کارایی مدل‌های گردش عمومی از مکانی به مکان دیگر متفاوت بودند. تغییر اقلیم با تاثیر بر فراوانی و شدت بارش، خشکسالی و تبخیر و تعرق بر مقدار و کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی اثر می‌گذارند. امروزه کیفیت آب به‌عنوان یکی از مشکلات مهم زیست‌محیطی در نقاط مختلف جهان به‌ویژه در بخش شرب کشورهای با اقلیم خشک و نیمه خشک است. (Alijani and Ghavidel Rahimi (2005: 21 برداشت‌های بی‌رویه از چاه‌های آب و گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در شرایط تغییر اقلیم و خشکسالی‌ها منجر به تغییر کیفیت آب زیرزمینی شده است. برخی مطالعات به بررسی اثر تغییر اقلیم بر آب‌های سطحی می‌پردازند. این محققان (Massah Bovani and Morid,

Zhang et. Jones et al., 2004: 1419, Ashofteh and Bouvani, 2010: 15, Seyyed ghasemi et al., 2005: 27 Zessner et , Honti et al., 2017: 1593. Mehdi et al., 2015: 47. Wilby and Harris, 2006: 10. al., 2014: 205 317 (Zoboli et al., 2018: 417 al., 2017: 317) نشان دادند که مدل ها حساسیت های متفاوتی به تغییرات بارش، دما و تبخیر و تعرق نشان می دهند و از نتایج این تحقیق می توان در آنالیز حساسیت مدل های فوق در اقلیم های گوناگون بهره برد. مطالعات دیگر با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم و خشکسالی ها بر منابع آب های زیرزمینی انجام شد. با بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر ابعاد کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی و هیدرولوژی زیرسطحی بیان داشتند که شدت و فراوانی دوره های خشک آینده در مقیاس زمان و مکان دارای عدم یقین هستند (Green et al., 2011: 532). تغییرپذیری مکانی پاسخ سیستم های آبخوان به تغییرات اقلیمی یک حوضه آبخیز برای پیشبرد فرآیند هیدرولوژیکی سطحی و مدل های جریان آب زیرزمینی مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که آب زیرزمینی در تعیین پاسخ سیستم های رودخانه به تغییرات اقلیمی یک نقش کلیدی بازی می کند (Waibel et al., 2013: 201). شبیه سازی سناریوهای مدیریت آب را با استفاده از مدل جریان آب زیرزمینی سه بعدی توسعه بخشیده و اقتصادی ترین سناریوی بهره برداری را تا سال ۲۱۰۰ پیشنهاد نمودند (Sefelnasr et al., 2015: 79). در یونان از زمین آمار برای درون یابی سطح آب های زیرزمینی در حوضه آتموننتاس استفاده کرده و براساس نتایج اعتبارسنجی، روش کریجینگ را در تخمین مقادیر پارامترهای کیفی آب زیرزمینی مناسب تشخیص دادند (Theodossiou et al., 2007: 223). در مطالعه ای با بررسی وضعیت کیفی آب های زیرزمینی دشت تبریز دریافتند که در سال ترسالی، میزان آب های زیرزمینی شور و خیلی شور، ۱۸/۱۵ درصد و آب های زیرزمینی با قلیائیت زیاد ۴/۹۲ درصد می باشد در حالی که در سال شاخص خشکسالی این مقادیر به ترتیب ۲۸/۲ و ۲۵/۳ افزایش یافته اند (Karami and Kazemi, 2012: 21). در استان سیستان و بلوچستان دریافتند که در دوره های خشکسالی مقادیر شوری و قلیائیت آب های سطحی به طور معنی داری افزایش می یابد (Mahmudi et al., 2014: 21). در طی دهه های اخیر به نظر می رسد که در دشت کشاورزی سیلاخور-بروجرد لرستان علاوه بر خشکسالی ها، عوامل دیگری مانند افزایش جمعیت، تغییر کاربری اراضی، افزایش استفاده از کودهای شیمیایی و سموم و مصرف بی رویه منابع آب در تغییر کیفیت آب نقش زیادی داشته است. ادامه این روند گرمایش و خشکسالی ها و برداشت بیش از اندازه آب چاه های می تواند وضعیت این دشت مهم و با رونق کشاورزی را به حالت بحرانی برساند. کاهش تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت بی رویه از این منابع موجب فرونشست زمین در اغلب دشت های کشورمان شده است. بررسی و مطالعه این کاهش تراز و روند تغییرات آن برای مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از اثرات سوء برداشت بی رویه لازم و ضروری می باشد (Roshan et al., 2019: 131). در این تحقیق با استفاده از مدل لارس، بارش و دما و خشکسالی های آینده این منطقه مهم کشاورزی از زاگرس محاسبه و بعد از تحلیل زمانی و مکانی وضعیت پارامترهای کیفی آب زیرزمینی، اثر تغییر اقلیم و خشکسالی ها بر این پارامترها به دست آمد.

منطقه مورد مطالعه

شهرستان بروجرد در محدوده‌ی حوزه آبخیز دز قرار دارد و حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد از زیر حوزه‌های دز و در شهرستان بروجرد قرار دارد. این حوزه در شمال حوزه‌ی دز بین ۳۴ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است (شکل ۱). مهم‌ترین رودخانه این حوزه، سیلاخور نام دارد. مساحت حوزه آبخیز آن ۱۰۱۹/۸۱ کیلومتر مربع و حداکثر و حداقل ارتفاع آن به‌ترتیب ۳۴۷۴ و ۱۴۷۵ متر است. متوسط بارندگی سالانه آن ۴۵۳/۸ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴/۸۶ درجه سانتی‌گراد است؛ بنابراین بر اساس روش دومارتن دارای اقلیم نیمه خشک است.



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز سیلاخور -رحیم‌آباد در استان لرستان و در ایران
Figure 1: Location of Silakhor-Rahimabad watershed in Lorestan province and in Iran

مواد و روش‌ها

داده‌های مشاهداتی اقلیم شامل روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و ساعات آفتابی ایستگاه سینوپتیک بروجرد (به دلیل دارا بودن داده‌های طولانی‌تر و ارتفاعی برابر متوسط ارتفاع سایر ایستگاه‌ها به عنوان مبنا) در دوره ۷۱-۷۲ تا ۹۴-۹۵ و داده‌های بخش آب‌های زیرزمینی شامل داده‌های کیفی PH، SAR، TDS و EC در ۱۸ چاه منطقه می‌باشد که به‌ترتیب از اداره کل هواشناسی و اداره کل آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت شدند.

تولید داده‌های اقلیمی آینده

بهترین وسیله برای بررسی و تحقیق تأثیر گازهای گلخانه‌ای بر جو زمین در مقیاس منطقه‌ای، کاربرد مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوسی مدل‌های گردش عمومی (AOGCM) است (Wilby and Harris: 2006: 10). مدل HadCM3 از مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیم Hadley انگلستان دارای هشت متغیر اقلیمی از سطح زمین شامل، میزان بارندگی، میانگین فشار سطح دریاها، تابش خورشیدی، میانگین دمای هوا، دمای نقطه شبنم، حداقل دمای هوا،

حداکثر دمای هوا و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف انتشار شبیه سازی شده اند. مجموعه کامل متغیرهای ماهانه ذکر شده از آرشیو داده های مدل های AOGCM در بخش DDC از سایت IPCC قابل دسترس می باشد (IPCC— DDC, 1998: 223). برای تبدیل داده های بزرگ مقیاس مدل های گردش عمومی به داده های منطقه ای و محلی و یا ایستگاهی دو کلاس متفاوت از دیدگاه کوچک مقیاس کردن به نام روش های دینامیکی^۴ و آماری^۵ در جوامع علمی مطرح می شود (Cherkauer et al., 2003:151). LARS-WG^۶ یکی از مشهورترین مدل های مولد داده های تصادفی وضع هوا است که می تواند برای شبیه سازی داده های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار رود (Racsko et al., 1991: 41). مبنای این مدل برای مدل سازی طول دوره های خشک و تر، بارش روزانه و سری های تابش توزیع نیمه تجربی می باشد (Babeian and Najafinik, 2007: 10) در گزارش هیأت بین الدول تغییر اقلیم ۴۰ سناریو برای آینده جهان ارائه شد که در ۴ شاخه اصلی یا خانواده سناریوها (A1, A2, B1, B2) تشکیل شده اند قرار گرفتند. سناریو A2، فرض می شود یک دنیای جدا از هم وجود داشته باشد. رسومات محلی و افزایش رشد جمعیت مورد تایید می باشد و تاکید کمتری بر روی مسائل اقتصادی وجود دارد. سناریو B1، تاکید بر پایداری محیطی و اجتماعی و کوشش برای گسترش تکنولوژی و فناوری سریع، مادی گیری اقتصادی و بهبود سرمایه می باشد. (IPCC, 2007: 501) در این پژوهش از نمودارهای مقایسه ای و پارامترهای خطاسنجی NSE، MAE و RMSE استفاده شد و میانگین های ماهانه هر کدام از متغیرهای هواشناسی در حالت واقعی و شبیه سازی شده توسط مدل LARS-WG مقایسه شد که روابط مربوط به هر کدام از پارامترهای هواشناسی در زیر نشان داده شده است (Semenov and Stratonovitch, 2010: 14).

رابطه (۱)	$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x-y)^2}{\sum_{i=1}^n (x-xp)^2} \right]$
رابطه (۲)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x-y)^2}{n}}$
رابطه (۳)	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n x-y }{n}$
رابطه (۴)	$BIAS = \frac{1}{n} \sum (y-x)$

در روابط بالا y داده های شبیه سازی شده توسط مدل؛ x داده های مشاهده شده؛ yp میانگین داده های مشاهده شده و n تعداد داده ها می باشد.

محاسبه دوره های خشکسالی حال و آینده و اثرات آنها بر پارامترهای کیفی آب زیرزمینی

4- Proportional Downscaling

5- Statistical Downscaling

6- Long Ashton Research Station Weather Generator

کیفیت هیدروشیمیایی آب زیرزمینی به عنوان تابعی از خصوصیات تغذیه، می‌تواند بازتابی از رژیم بارش در منطقه باشد. در شرایط خشکسالی، با کاهش بارش و کاهش حجم ذخیره مخزن، غلظت عناصر در آب زیرزمینی افزایش می‌یابد (Sefelnasr et al., 2015: 53). برای تحلیل وضعیت خشکسالی شاخص‌های متعددی وجود دارد که در این تحقیق شاخص SPI که برای اولین بار توسط Mackee et al (1993:179) پیشنهاد گردید به دلیل قابلیت خوب در مطالعات منابع آب استفاده شد. این قابلیت امکانی را فراهم می‌نماید تا وضعیت منابع آب برای دوره‌های بلندمدت در مطالعه رودخانه‌ها و مخازن آب زیرزمینی مورد بررسی قرار داد (Jones et al., 2004: 1421). برای محاسبه شاخص استاندارد بارش یا SPI از فرمول (۵) استفاده می‌شود:

$$\text{SPI} = (\text{pi} - \bar{p})/s \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه فوق pi مقدار بارش در دوره مورد نظر، P میانگین درازمدت بارش برای دوره مورد نظر و S انحراف معیار مقادیر بارش است. شاخص سه ماهه بارش استاندارد شرایط رطوبتی کوتاه مدت و فصلی، شاخص شش ماهه، وضعیت رطوبتی میان مدت و شاخص یک و دوساله، شرایط رطوبتی دراز مدت و وضعیت منابع سطحی و زیر زمینی را نشان می‌دهد (Edwards and Mackee, 1997: 30). لذا در این تحقیق خشکسالی‌های سالانه مورد مطالعه قرار گرفت. طبقه‌بندی خشکسالی‌ها به روش شاخص استاندارد بارش در جدول (۱) ارایه شده است.

جدول ۱- طبقات شاخص SPI

Table 1- SPI index classes

طبقات خشکسالی	مقادیر SPI
کاملاً مرطوب	> 2
خیلی مرطوب	$(1/5) \text{ تا } (2)$
نسبتاً مرطوب	$(1) \text{ تا } (1/5)$
مرطوب ملایم	$(1) \text{ تا } 0$
خشکسالی ملایم	$(-1) \text{ تا } 0$
خشکسالی متوسط	$(-1) \text{ تا } (-1/5)$
خشکسالی شدید	$(-1/5) \text{ تا } (-2)$
خشکسالی بسیار شدید	< -2

با استفاده از شاخص SPI سال‌های تر و خشک شناسایی و پارامترهای کیفیت آب با آنالیز واریانس مقایسه گردید. همچنین در این تحقیق، توزیع پارامترهای TDS، EC، PH و SAR در سطح آب‌های زیرزمینی دشت سیلاخور در استان لرستان، با استفاده از چهار روش پهنه‌بندی موجود در زمین آمار از جمله عکس فاصله وزن‌دار، توابع شعاع پایه‌ای، کریجینگ، کوکریجینگ مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس نمونه آب‌های زیرزمینی ۱۸ چاه در دوره پایه بررسی شد. پس از ترسیم واریوگرام و بررسی تغییرات مکانی پارامترهای مورد بررسی، اقدام به میان‌یابی پارامترها به روش‌های مختلف شد و با ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)، بهترین مدل ارزیابی و نقشه‌های پراکنش در سال‌های ۸۷، ۸۹، ۹۱ و ۹۳ تهیه شد. با استفاده از نرم‌افزار SPSS ماتریس همبستگی بین متغیرهای ژئوشیمیایی آب

و ۴ متغیر اقلیمی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و دمای متوسط محاسبه گردید. تحلیل عاملی یکی از روش های آنالیز چند متغیره آماری اعمال شده در این تحقیق، روش تجزیه به مؤلفه های اصلی است. تحلیل عاملی روش آماری چند متغیره ای است که هدف آن ساده کردن مجموعه های پیچیده و مختلفی است که بین متغیرهای مشاهده ای وجود دارد. این روش برای توصیف تغییرپذیری بین متغیرهای مشاهده ای به تعدادی محدود از متغیر مشاهده نشده که عامل نامیده می شوند، استفاده می شود. دخالت متغیرها با اهمیت کم تر را به وسیله چرخش واریمکس به ماتریس بارهای عاملی کاهش می دهد (Tabachnick et al., 2000: 66).

یافته ها و بحث

بررسی شرایط اقلیمی آینده

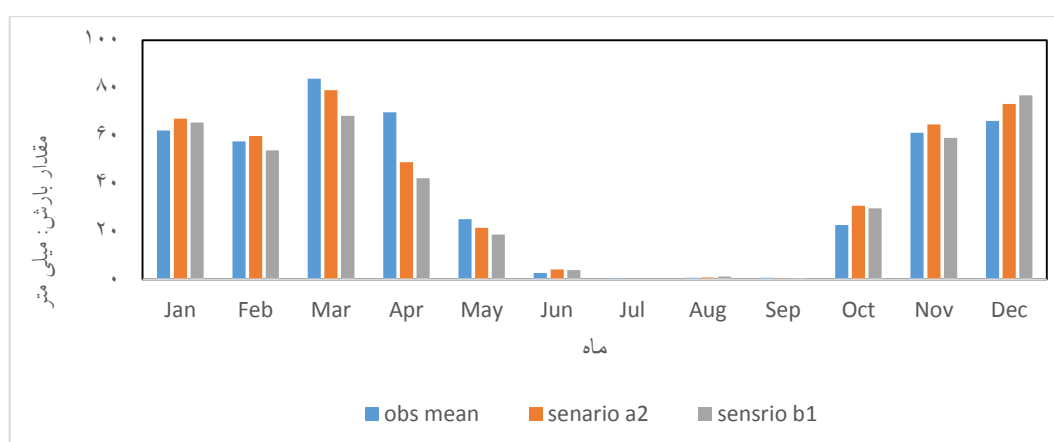
به طور کلی تولید داده توسط مدل LARS-WG در سه مرحله صورت می گیرد که عبارتند از واسنجی کردن مدل، ارزیابی مدل و تولید داده های هواشناسی برای دوره آتی. بر این اساس برای اجرای این مدل داده های اقلیمی روزانه از سال ۷۱-۷۲ تا ۹۴-۹۵ را مرتب نموده و به عنوان فایل ورودی به مدل داده شد و بدین ترتیب مرحله واسنجی کردن به پایان رسید و نتایج حاصل از مدل برای این دوره با داده های مشاهداتی مقایسه گردید تا از کارایی مدل برای ایستگاه مورد نظر اطمینان حاصل شود. نتایج نشان می دهد که مقادیر میانگین بارش شبیه سازی شده تطابق خوبی با مقادیر مشاهداتی دارند و بیشترین اختلاف مربوط به ماه های آوریل و ژانویه است. در خصوص انحراف معیار بارش های ماهانه نیز بیشترین اختلاف به ماه های نوامبر و ژانویه تعلق دارد. همچنین، میانگین دمای حداکثر و دمای حداقل شبیه سازی شده تطابق خیلی خوبی با مقادیر مشاهداتی دارد. مقادیر انحراف معیار مشاهداتی و شبیه سازی شده در ماه های مختلف با یکدیگر اختلاف دارند که بیشترین اختلاف مربوط به ماه های ژانویه و دسامبر می باشد، هرچند این اختلاف با توجه به آزمون t استیودنت در سطح ۵ درصد معنی دار نمی باشد. شاخص های ارزیابی و تشخیص کارایی مدل در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل ریز مقیاس نمایی LARS-WG در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴

Table 2- Evaluation results of LARS-WG exponential micro-scale model in the period 2014-1990

R ²	NSE	RMSE	MAE	شاخص
				پارامتر
۰/۹۴۵۳	۰/۹۷۳۶۱۱	۳/۱۴۴۶۸۷	-۰/۱۳۷۵	بارش
۰/۹۴۵۳	۰/۹۹۸۷۹	۰/۲۳۸۱۱۸	-۰/۰۴	دمای حداقل
۰/۹۴۵۳	۰/۹۹۳۶۱	۰/۲۵۶۰۶	۰/۰۰۱۶۶۷	دمای حداکثر
۰/۹۴۵۳	۰/۹۹۸۵۱۴	۰/۲۵۶۴۱۸	۰/۱۳۶۶۶۷	ساعات آفتابی

همان‌طور که در جدول آمده است، مقدار پارامتر RMSE برای بارش بیش‌تر از حداقل و حداکثر دما می‌باشد. پارامتر NSE در سه پارامتر بالا نزدیک به یک است و نشان دهنده توانایی بالای مدل است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که مدل LARS-WG توانایی مدل‌سازی اقلیم دوره پایه حوزه مطالعه را دارد. پس از اطمینان از توانمندی مدل LARS-WG در تولید داده‌های بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر حوزه سیلاخور-رحیم آباد، خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوهای A2 و B1 کوچک مقیاس شده و پارامترهای مورد نظر پیش‌بینی شده در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ با مقادیر آن‌ها در دوره پایه مقایسه شد. نتایج مربوط به مقایسه میانگین ماهانه بارش در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ نسبت به دوره پایه در شکل (۲) آورده شده است.

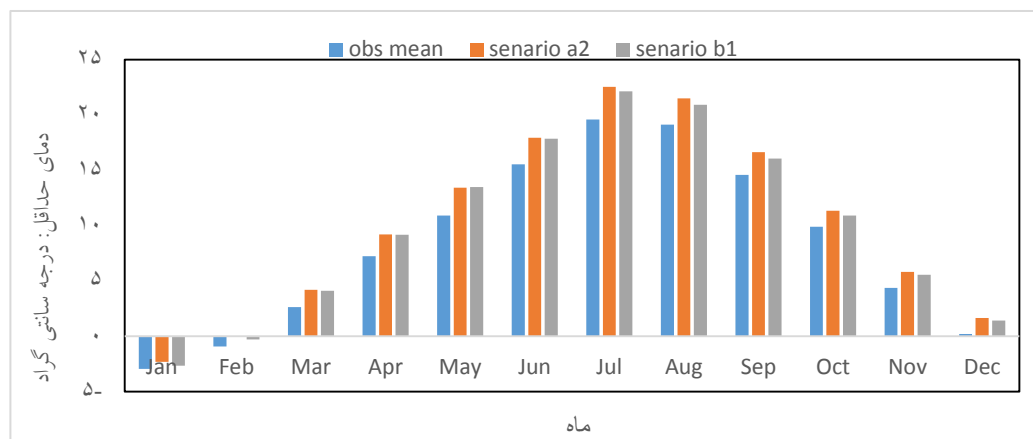


شکل ۲: میانگین بارش ماهانه دوره پایه و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ تحت سناریوهای A2 و B1

Figure 2: Average monthly rainfall of the base period and 2065-2046 under scenarios A2 and B1

مدل HADCM3 در برخی از ماه‌ها، میزان بارش آینده را نسبت به دوره پایه کم‌تر و در برخی ماه‌ها بیش‌تر از دوره پایه نشان می‌دهد. در سناریو A2، میانگین ماهانه بارش در ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن، اوت، اکتبر، نوامبر و دسامبر افزایش و در بقیه ماه‌ها کاهش می‌یابد به‌طوری که بیش‌ترین افزایش در ماه اکتبر به میزان ۸/۰۴ میلی‌متر و بیش‌ترین کاهش در ماه آوریل به میزان ۲۰/۸۱ میلی‌متر می‌باشد. در سناریو B1، میانگین ماهانه بارش در ماه‌های ژانویه، ژوئن، اوت، اکتبر و دسامبر افزایش و در بقیه ماه‌ها کاهش می‌یابد. به‌طوری که بیش‌ترین افزایش در ماه دسامبر به میزان ۱۰/۷۵ میلی‌متر و بیش‌ترین کاهش در ماه آوریل به میزان ۲۷/۴۸ میلی‌متر می‌باشد. با در نظر گرفتن سناریو A2 و B1 میانگین فصلی بارش به‌ترتیب شاهد افزایش ۶/۱۷ و ۵/۱۷ میلی‌متر در فصل پاییز و کاهش ۷/۶۵ و ۱۰/۸۹ میلی‌متر در فصل بهار خواهد بود. به‌طور کلی میانگین بارش در سطح حوزه در آینده در مقایسه با دوره پایه کاهش می‌یابد. نتایج مربوط به مقایسه میانگین ماهانه دمای حداقل در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ نسبت به دوره پایه در شکل (۳) آورده شده است. با توجه به این شکل طی دوره زمانی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و با در نظر گرفتن سناریو A2 و B1 میانگین ماهانه دمای حداقل در همه ماه‌ها افزایش می‌یابد. به‌طوری که در هر دو سناریو A2 و B1 بیش‌ترین مقدار افزایش مربوط به ماه جولای به‌ترتیب برابر با ۲/۹۵ و ۲/۵۶ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین افزایش مربوط به ماه ژانویه به‌ترتیب

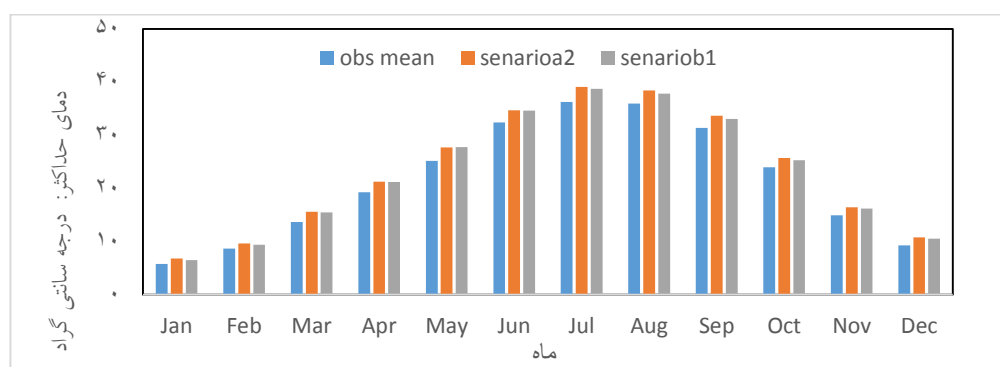
برابر با ۰/۶۴ و ۰/۳۱ درجه سانتی گراد می باشد. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود سناریو A2 افزایش دمای بیش تری را پیش بینی می کند. به طور کلی پیش بینی می شود که در آینده دما به طور متوسط به میزان ۱/۶۶ درجه سانتی گراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد.



شکل ۳: میانگین دمای حداقل ماهانه ۱۹۹۰-۲۰۱۴ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ تحت سناریوهای A2 و B1

Figure 3: Average monthly minimum temperature of 1990-2014 and 2065-2046 under scenarios A2 and B1

همچنین در هر دو سناریو میانگین فصلی دمای حداقل در همه فصول افزایش خواهد یافت در سناریو A2 بیش ترین میزان افزایش در فصل تابستان با ۲/۴۶ درجه سانتی گراد و کم ترین افزایش در فصل زمستان با ۱/۰۱ درجه سانتی گراد می باشد همچنین در سناریو B1 بیش ترین میزان افزایش دمای حداقل در فصل بهار با ۲/۲۶ درجه سانتی گراد و کم ترین افزایش در فصل زمستان با ۰/۷۹ درجه سانتی گراد می باشد نتایج مربوط به مقایسه میانگین ماهانه دمای حداکثر در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ نسبت به دوره پایه در شکل (۴) آورده شده است.



شکل ۴: میانگین دمای حداکثر ماهانه دوره پایه و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ تحت سناریوهای A2 و B1

Figure 4: The average monthly maximum temperature of the base period and 2065-2046 under scenarios A2 and B1

تغییرات دمای حداکثر برای هر دو سناریو A2 و B1 نشان از افزایش آن در تمامی ماه ها در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ دارد.

در سناریو A2 بیش‌ترین افزایش مربوط به ماه جولای با $2/83$ درجه سانتی‌گراد و بیش‌ترین کاهش مربوط به ماه ژانویه با $1/01$ درجه سانتی‌گراد و در سناریو B1 بیش‌ترین افزایش مربوط به ماه می با $2/56$ درجه سانتی‌گراد و بیش‌ترین کاهش مربوط به ماه‌های ژانویه و فوریه با $0/72$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که سناریو A2 افزایش دمای بیش‌تری را پیش‌بینی می‌کند. همچنین در هر دو سناریو A2 و B1 میانگین فصلی دمای حداکثر نیز همانند دمای حداقل در تمامی فصل‌ها افزایش خواهد یافت. بیش‌ترین میزان افزایش دمای حداکثر تحت سناریو A2 در فصل تابستان با $2/51$ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین آن برای زمستان با $1/3$ درجه سانتی‌گراد است. طبق سناریو B1 نیز بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر در فصل بهار با $2/24$ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین آن برای زمستان با $1/08$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مقادیر تغییرات سالانه پارامترهای اقلیمی در جدول (۳) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین بارش سالانه در دوره $2046-2065$ تحت هر دو سناریو A2 و B1 کاهش می‌یابد.

جدول ۳- تغییرات سالانه پارامترهای اقلیمی حوزه سیلاخور-رحیم آباد

Table 3- Annual changes in climatic parameters of Silakhor - Rahimabad basin

سناریو B1	سناریو A2	دوره پایه	پارامتر
۳۵/۰۷	۳۷/۶۲	۳۷/۸۱	بارش (میلی‌متر)
۹/۸۷	۱۰/۱۴	۸/۳۴	دمای حداقل (سانتی‌گراد)
۲۳/۰۴	۲۳/۳۱	۲۱/۴	دمای حداکثر (سانتی‌گراد)
۱۶/۴۶	۱۶/۷۳	۱۴/۸۷	دمای متوسط (سانتی‌گراد)

همچنین با توجه به شکل (۵)، در سناریوهای A2 و B1، متوسط دمای سالانه دوره $2046-2065$ به‌ترتیب $1/85$ تا $1/59$ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. این نتایج با یافته‌های (Nouri et al و Bashiri et al (2019: 664) (2013: 20) همخوانی دارد.

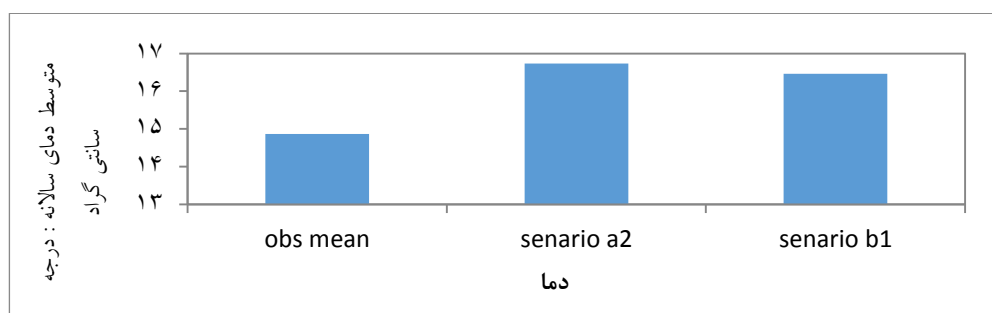
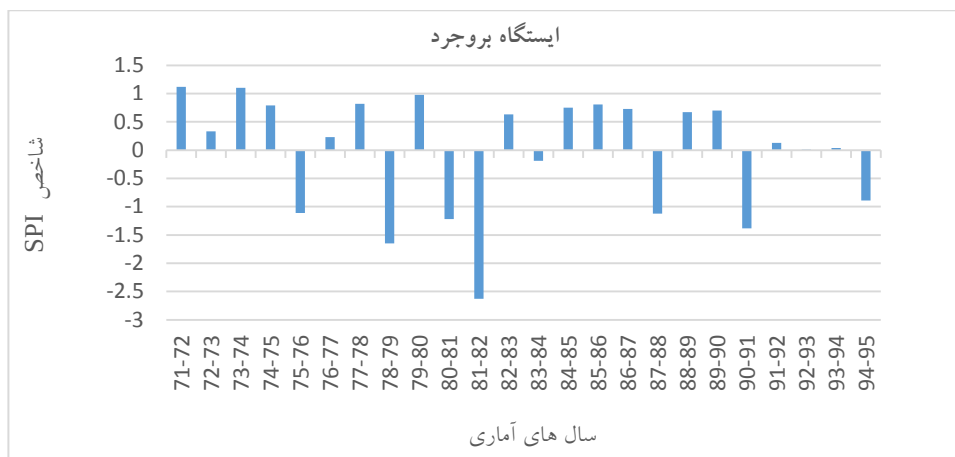
شکل ۵: متوسط دمای سالانه دوره پایه و دوره $2046-2065$ در منطقه مورد مطالعه

Figure 5: Average annual temperature of the base period and the period 2065-2046 in the study area

برای بررسی شرایط خشکسالی در حال و آینده، شاخص بارش استاندارد در دوره پایه و آینده محاسبه و مقایسه شدند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از محاسبات شاخص سالانه SPI در دوره پایه آماری مشخص شد که در سال

۸۱-۸۲ خشکسالی بسیار شدید، در سال ۷۸-۷۹ خشکسالی شدید، در سال های ۷۵-۷۶، ۸۰-۸۱، ۸۷-۸۸ و ۹۰-۹۱ خشکسالی متوسط و در سال های ۸۳-۸۴، ۹۴-۹۵ خشکسالی ملایم رخ داده است. نتایج حاصل از محاسبه SPI در دوره مورد مطالعه در شکل (۶) آمده است.



شکل ۶: دوره تر و خشکسالی محاسبه شده با شاخص استاندارد بارش در منطقه مورد مطالعه در زمان پایه

Figure 6: Wet and drought period calculated with the standard index of precipitation in the study area at the base time

جدول (۴) نشان می دهد که در آینده در هر دو سناریوی A2 و B1 از فراوانی طبقه خشکسالی خیلی خشک و نرمال کاسته شده و بر فراوانی طبقه نسبتا خشک اضافه می شود. همچنین در سناریوی A2 طبقه "به شدت خشک" روی نخواهد داد و این سناریو با توجه به افزایش دمای بیش تر و کاهش بارش کم تر نسبت به سناریوی B1، دارای فراوانی طبقات خشکسالی "نسبتا خشک" و "خیلی خشک" بیش تری نسبت به این سناریو خواهد بود. این یافته قبلا در مطالعه دیگری رد شده بود (Zhanga, 2013: 735).

جدول ۴- درصد فراوانی طبقات مختلف بارش استاندارد در دوره پایه و آینده در منطقه مورد مطالعه

Table 4- Percentage of frequency of different standard rainfall classes in the baseline and future in the study area

دوره آینده (۲۰۶۵-۲۰۴۶) سناریوی A2	دوره آینده (۲۰۶۵-۲۰۴۶) سناریوی B1	دوره پایه (۱۳۹۵-۱۳۷۱)	طبقات اقلیمی SPI
۰	۰	۰	به شدت مرطوب
۴/۲	۴/۲	۴/۲	خیلی مرطوب
۴/۲	۴/۲	۴/۲	نسبتا مرطوب
۳۷/۵	۴۱/۶	۴۵/۷	نرمال
۴۵/۷	۴۱/۶	۲۹/۱	نسبتا خشک
۸/۳	۴/۲	۱۲/۵	خیلی خشک
۰	۴/۲	۴/۲	به شدت خشک

ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی

نتایج حاصل از ارزیابی روش‌های مختلف پهنه‌بندی نشان می‌دهد که کم‌ترین میزان RMSE برای پارامتر PH در سال‌های ۸۷، ۸۹، ۹۱ و ۹۳ به ترتیب برای روش کوکریجینگ معمولی J بسل، کوکریجینگ ساده J بسل، کوکریجینگ ساده J بسل و کوکریجینگ ساده J بسل می‌باشد. برای پارامتر TDS برای سال‌های ۸۷، ۸۹، ۹۱ و ۹۳ به ترتیب کوکریجینگ معمولی پایدار، کوکریجینگ ساده J بسل و کوکریجینگ ساده J بسل می‌باشد. برای پارامتر SAR در سال‌های ۸۷، ۸۹، ۹۱ و ۹۳ کوکریجینگ معمولی چاله‌ای، کوکریجینگ ساده چاله‌ای، کوکریجینگ ساده J بسل و عکس فاصله وزن‌دار بهینه شده با توان دوم می‌باشد و برای پارامتر EC در سال‌های ۸۷، ۸۹، ۹۱ و ۹۳ کوکریجینگ ساده J بسل، کوکریجینگ ساده چاله‌ای، کوکریجینگ ساده J بسل و کوکریجینگ ساده J بسل می‌باشد. لذا نمی‌توان به‌طور قطعی و تنها یک روش زمین آمار را برای تهیه نقشه پارامترهای کیفی آب برگزیده این یافته نتایج برخی محققان را تاکید می‌کند (Sefelnasr et al., 2015: 46 و Waibel et al., 2013: 201) را تایید می‌کند. به دلیل تعداد زیاد جداول تنها به ارایه یکی از آن‌ها (جدول ۵) اکتفا می‌شود.

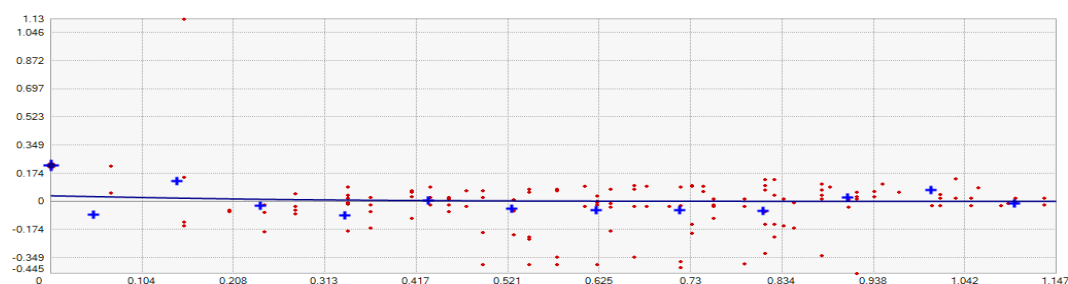
جدول ۵- مقادیر RMSE شاخص (PH) به روش کوکریجینگ سال ۹۱

Table 5- RMSE values of index (PH) by cokriging method of 91

روش درونیابی	معمولی	ساده	فراگیر
دایره‌ای	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
کروی	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
چهار کره‌ای	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
پنج کره‌ای	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
نمائی	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
گوسی	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
منطقی	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
چاله‌ای	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
K بسل	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
J بسل	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶
پایدار	۰/۷۶	۰/۵۲	۰/۷۶

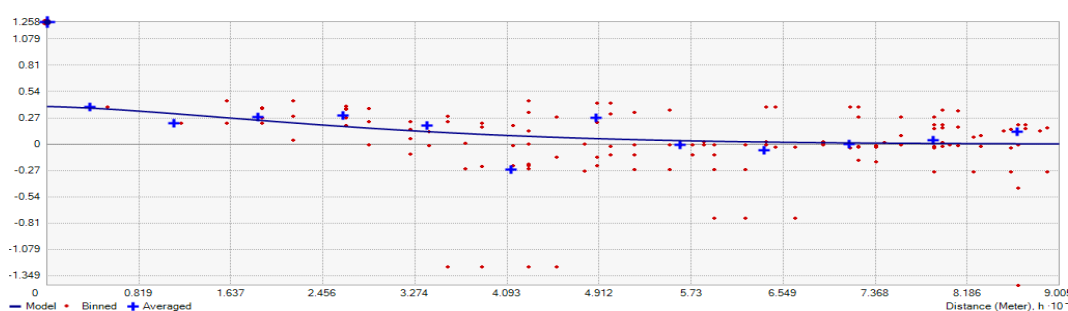
با توجه به این‌که میزان RMSE مربوط به پارامتر PH مربوط به ۱۱ تابع در روش کوکریجینگ ساده و پارامتر TDS مربوط به ۱۱ تابع در کوکریجینگ ساده و پارامتر EC مربوط به ۱۱ تابع کوکریجینگ ساده و پارامتر SAR مربوط به ۱۱ تابع کوکریجینگ ساده در برخی سال‌های مورد بررسی، مقادیر عددی یکسانی را نشان می‌دهند، بنابراین برای انتخاب مناسب‌ترین روش زمین آمار، باید میزان پارامترهای نیم تغییرنا را نسبت به میزان اثر قطعه‌ای به سقف را مورد بررسی قرار داد. چنانچه نسبت میزان اثر قطعه‌ای به سقف در هر یک از توابع کم‌تر باشد، ساختار فضایی قوی‌تری برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی حکم فرما می‌باشد. نتایج بهترین ساختار فضایی برای پهنه‌بندی پارامترهای مذکور را به صورت اشکال (۷ تا ۱۰) نشان می‌دهد. اشکال (۱۱ تا ۱۴) نقشه پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب را در

خشکسالی بسیار شدید (سال ۱۳۹۱) نشان می‌دهد.



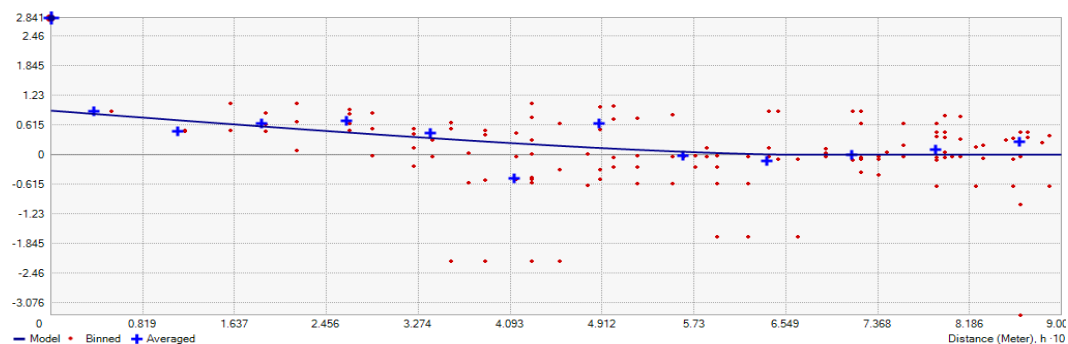
شکل ۷: نیم تغییر نما پارامتر (PH) سال به روش کوکریجینگ ساده J بسل در سال ۹۱

Figure 7: Half change of parameter view (PH) of the year by simple cokriging method J Bessel in 91



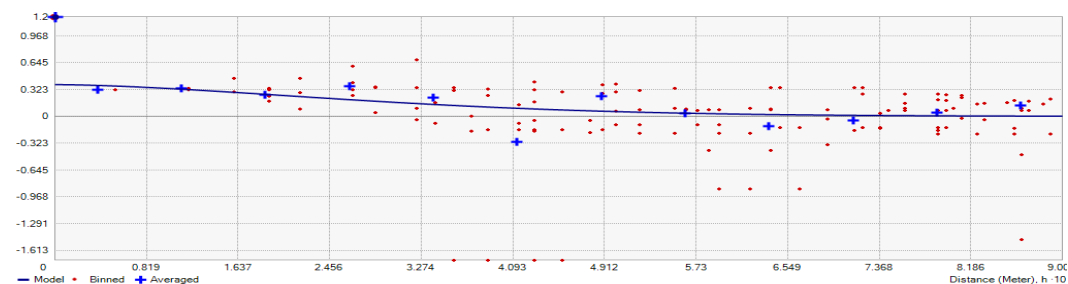
شکل ۸: نیم تغییر نما پارامتر (TDS) به روش کوکریجینگ ساده پایدار در سال ۹۱

Figure 8: Half change parameter view (TDS) by simple stable cokriging method in 1991



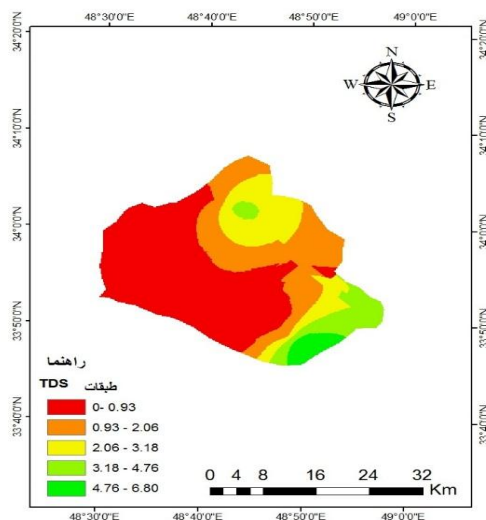
شکل ۹: نیم تغییر نما پارامتر (EC) به روش کوکریجینگ ساده چاله‌ای در سال ۹۱

Figure 9: Half change of parameter view (EC) by simple hole coking method in 1991



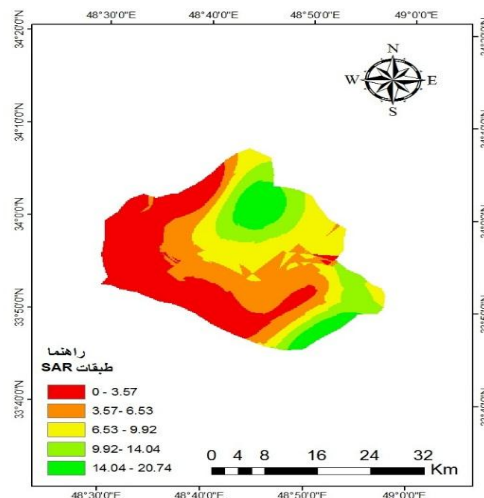
شکل ۱۰: نیم تغییر نما پارامتر (SAR) به روش کوکریجینگ ساده J بسل در سال ۹۱

Figure 10: Half change of Parameter (SAR) by simple J-Bessel coking method in 1991



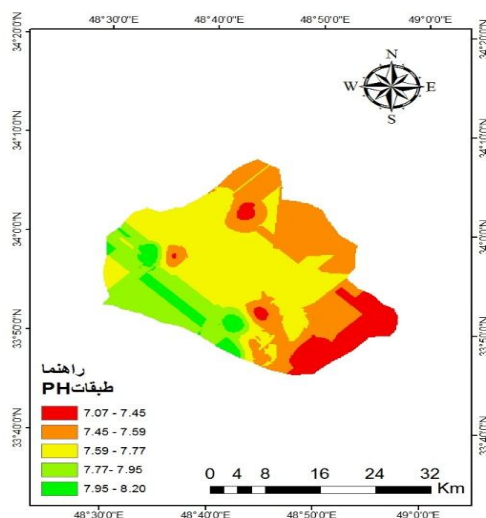
شکل ۱۲: پهنه‌بندی TDS در منطقه مورد مطالعه

Figure 12: TDS zoning in the study area



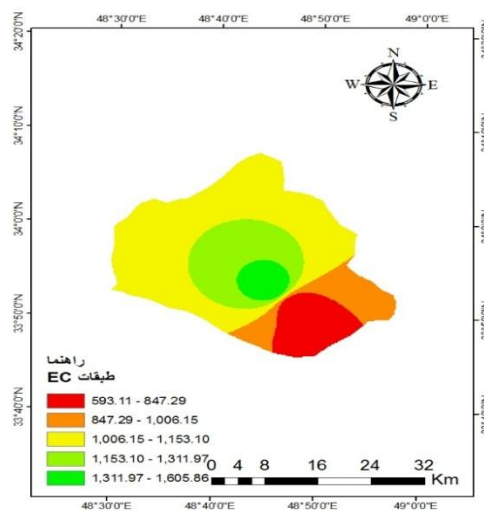
شکل ۱۱: پهنه‌بندی SAR در منطقه مورد مطالعه

Figure 11: SAR zoning in the study area



شکل ۱۴: پهنه‌بندی PH در منطقه مورد مطالعه

Figure 14: PH zoning in the study area



شکل ۱۳: پهنه‌بندی EC در منطقه مورد مطالعه

Figure 13: EC zoning in the study area

بررسی پارامترهای کیفی آب تحت تاثیر خشکسالی و تغییر اقلیم

تحلیل عاملی از روش‌های تحلیل آماری چندمتغیره است که برای پارامترهایی که همبستگی مناسبی دارد به‌کار می‌رود. پارامترهای ژئوشیمیایی برای نرمال و استاندارد بودن داده‌ها از روش کلو موگراف-اسمیرینوف و برای کفایت داده‌ها از روش کایسر میر اولکین (KMO) استفاده شد. پس از استاندارد کردن داده‌ها و آزمون‌های لازم، کفایت داده‌ها تایید گردید (۰/۷۷ تا ۰/۸۶). سپس همبستگی پیرسون برای پارامترهای مورد نظر محاسبه شد (جدول ۶).

نتایج نشان می دهد که pH همبستگی منفی بسیار قوی $-0/857$ با دمای حداقل دارد و کم ترین میزان همبستگی آن با بارش بوده است. در بین پارامترهای مورد بررسی TDS بیشترین همبستگی را به میزان $0/676$ با SAR و $0/565$ با دمای میانگین داشته است. همچنین مشاهده گردید که SAR بیشترین همبستگی را با EC و TDS داشته و همبستگی بالایی با پارامترهای اقلیمی نداشته است. در بررسی EC نیز مشخص گردید که همانند SAR بیشترین همبستگی را با دمای میانگین به میزان $0/564$ داشته است.

جدول ۶- ماتریس همبستگی بین پارامترهای کیفی آب و پارامترهای جوی

Table 6- Correlation matrix between water quality parameters and atmospheric parameters

	PH	TDS	SAR	EC	دمای حداقل	دمای حداکثر	دمای میانگین	بارش
PH	۱	$-0/286$	$0/129$	$-0/281$	$-0/857$	$0/489$	$-0/295$	$-0/155$
TDS	$-0/286$	۱	$-0/676$	۱	$0/024$	$0/330$	$0/565$	$-0/178$
SAR	$0/129$	$0/676$	۱	$0/677$	$-0/216$	$0/181$	$0/020$	$-0/121$
EC	$-0/281$	۰	$0/677$	۰	$0/017$	$0/355$	$0/564$	$-0/181$
دمای حداقل	$-0/857$	$0/024$	$-0/216$	$0/017$	۱	$-0/787$	$-0/007$	$0/142$
دمای حداکثر	$0/489$	$0/330$	$0/181$	$0/335$	$-0/787$	۱	$0/622$	$-0/200$
دمای میانگین	$-0/295$	$0/565$	$0/020$	$0/546$	$-0/007$	$0/622$	۱	$-0/144$
بارش	$-0/155$	$-0/178$	$-0/121$	$-0/181$	$0/142$	$-0/200$	$-0/144$	۱

نتایج جدول (۷) میزان اشتراک متغیرها را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود دمای حداکثر با بیشترین درصد واریانس امتیازات، واریانس عامل مشترک است. همچنین مشاهده می شود که اکثر اشتراکها بالاتر از ۹۰ درصد هستند و بیانگر توانایی عامل های تعیین شده در تبیین واریانس متغیرهای مورد مطالعه است. با این حال متغیر بارش اختلاف بسیار زیادی با سایر متغیرها داشته و ملاحظه می شود که تنها $12/8$ درصد واریانس امتیازات متغیر بارش عامل مشترک می باشد.

جدول ۷- اشتراکات به دست آمده در منطقه مورد مطالعه

Table 7- Subscriptions obtained in the study area

	Initial	Extraction
PH	۱	$0/947$
TDS	۱	$0/975$
SAR	۱	$0/93$
EC	۱	$0/974$
دمای حداقل	۱	$0/956$
دمای حداکثر	۱	$0/977$
دمای میانگین	۱	$0/965$
بارش	۱	$0/128$

Extraction Method: Principal Component Analysis

جدول (۸) مقادیر ویژه و واریانس متناظر با عامل‌ها را در شرایط خشکسالی بسیار شدید نشان می‌دهد. این مقادیر در سایر کلاس‌های خشکسالی و ترسالی نیز به‌دست آمده است که به دلیل حجم زیاد جداول از ارایه آن‌ها خودداری شده است. با توجه به این‌که عامل‌های به‌دست آمده با روش واریماکس (Varimax) چرخش داده شده‌اند لذا عامل‌های اول (گرمایی)، دوم (ژئوشیمیایی) و سوم (ترکیبی) به‌ترتیب ۳۱/۴۱، ۳۱/۰۴ و ۲۳/۱۷ درصد و در مجموع ۸۵/۶۳ درصد از واریانس را به‌خود اختصاص می‌دهند. به‌طور کلی در شرایط خشکسالی سهم متغیر حداکثر دما و در ترسالی سهم متغیر حداقل دما در عامل اول مهم‌تر است. متغیر TDS هم در خشکسالی و در ترسالی به‌عنوان متغیر اصلی در عامل دوم است.

جدول ۸- تحلیل مجموع واریانس تبیین شده عوامل مؤثر در شرایط خشکسالی

Table 8- Analysis of the total variance explained the effective factors in drought conditions

مؤلفه	مقادیر ویژه اولیه			استخراج مجموع بارهای مجذور شده			چرخش مجموع بارهای مجذور شده		
	مجموع	واریانس %	تجمعی %	مجموع	واریانس %	تجمعی %	مجموع	واریانس %	تجمعی %
۱	۳/۲۰۷	۴۰/۰۹۲	۴۰/۰۹۲	۳/۲۰۷	۴۰/۰۹۲	۴۰/۰۹۲	۲/۵۱۳	۳۱/۴۱۵	۳۱/۴۱۵
۲	۲/۴۴۳	۳۰/۵۳۳	۷۰/۶۲۵	۲/۴۴۳	۳۰/۵۳۳	۷۰/۶۲۵	۲/۴۸۳	۳۱/۰۴۳	۶۲/۴۵۸
۳	۱/۲۰۱	۱۵/۰۱۳	۸۵/۶۳۷	۱/۲۰۱	۱۵/۰۱۳	۸۵/۶۳۷	۱/۸۵۴	۲۳/۱۷۹	۸۵/۶۳۷
۴	۰/۹۱۸	۱۱/۴۷۲	۹۷/۱۰۹						
۵	۰/۱۴۳	۱/۷۸۳	۹۸/۸۹۲						
۶	۰/۰۸۹	۱/۱۰۷	۹۹/۹۹۹						
۷	۹/۳۹E-5	۰/۰۰۱	۱۰۰						
۸	E- -۱/۱۵۶16	-۱/۴۴۵E-15	۱۰۰						

با هدف بررسی اثر بارش بر پارامترهای کیفیت آب شامل PH، TDS، SAR و EC و نقش خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها بر تغییرات این پارامترها، آنالیز واریانس در دوره‌های مختلف خشکسالی و ترسالی انجام ارایه شد. نتایج همسانی واریانس نمونه‌ها با آزمون Leven مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به این‌که تمام متغیرهای دارای sig بیش از ۰/۰۵ بودند نتایج نشان دادند که واریانس نمونه‌ها همگن هستند (جدول ۹).

جدول ۹- آزمون همسانی واریانس‌های کیفیت آب در دوره‌های تر و خشک در منطقه مورد مطالعه

Table 9-Test of homogeneity of variances of water quality in wet and dry periods in the study area

Sig	Df2	Df1	آزمون لوین	
۰/۸۴۵	۱۵	۱	۰/۰۳۹	pH
۰/۷۰۵	۱۵	۱	۰/۱۴۹	TDS
۰/۵۳۱	۱۵	۱	۰/۴۱۲	SAR
۰/۶۶۸	۱۵	۱	۰/۱۹۱	EC
۰/۹۸۴	۱۵	۱	۰	دمای میانگین
۰/۰۷۵	۱۵	۱	۳/۶۶	بارش

نتایج جدول آنالیز واریانس نشان دادند که با توجه به آماره F و مقادیر sig که برای پارامترهای pH، دمای میانگین و بارش کم تر از ۰/۰۵ شده است، این پارامترها در سال های خشک و تر تفاوت معنی داری دارند یعنی خشکسالی و میزان بارش بر آن ها اثر می گذارد، اما در مورد TDS، SAR و EC تفاوت معنی داری در سال های خشک و تر مورد بررسی مشاهده نگردیده است و با توجه به مقادیر موجود فرض صفر در مورد این سه متغیر رد نشده است. نتایج نشان می دهد که مقادیر متوسط pH با تغییر از شرایط خشکسالی شدید به شرایط خشکسالی متوسط و ملایم افزایش بیش از یک واحدی داشته است. در مقابل با بررسی مقادیر متوسط TDS مشخص گردید که با تغییر شرایط از خشکسالی شدید به شرایط خشکسالی متوسط و ملایم میزان آن کاهش داشته است. مقادیر متوسط SAR در شرایط خشکسالی مختلف نتایج متغیر داشته است به گونه ای با تغییر از شرایط خشکسالی شدید به خشکسالی متوسط افزایش داشته اما با تغییر به شرایط خشکسالی ملایم مجددا کاهش یافته است. روند تغییرات EC نیز همانند TDS بوده و با تغییر شرایط از خشکسالی شدید به شرایط خشکسالی متوسط و ملایم میزان آن کاهش داشته است. روند تغییرات دمای میانگین نیز همانند EC و TDS بوده اما با این تفاوت که با تغییر شرایط از خشکسالی شدید به خشکسالی متوسط افت شدیدی داشته است. روند تغییر میانگین بارش در سه دوره مختلف بیانگر آن بوده است که با تغییر شرایط از خشکسالی شدید به خشکسالی متوسط میزان متوسط بارش کاهش داشته اما با تغییر به خشکسالی ملایم رشد چشمگیری در میانگین بارش مشاهده شده است (جدول ۱۰).

تحلیل واریانس در طبقات خشکسالی شدید و نرمال و ترسالی نشانی دهد که بین تمام متغیرهای مورد بررسی اختلاف معنی داری وجود دارد؛ یعنی خشکسالی ها بر میزان پارامترهای ژئوشیمیایی آب تاثیر معنی داری دارد. این نتایج با یافته های (Karami and Kazemi, 2012: 24)، (Mahmudi et al., 2014: 35)، (Mohammad Rostami et al., 2014: 49)، (Harasi et al., 2011: 6) و (Chen et al., 2012: 36) مطابقت دارد.

جدول ۱۰- آنالیز واریانس کیفیت آب در سال های خشک و تر در منطقه مورد مطالعه

Table 10- Analysis of variance of water quality in dry and wet years in the study area

		میانگین مربعات	df	میانگین مربعات	F	sig
pH	بین گروه ها	۱/۱۰۴	۲	۰/۵۵۲	۴/۳۹۶	۰/۰۳۱
	داخل گروه ها	۱/۸۸۴	۱۵	۰/۱۲۶		
	مجموع	۲/۹۸۹	۱۷			
TDS	بین گروه ها	۵۱۶۲۶/۴۰	۲	۲۵۸۱۳/۲۰۰	۱/۹۲۱	۰/۱۸۱
	داخل گروه ها	۲۰۱۵۸۴/۱۰	۱۵	۱۳۴۳۸/۹۴۰		
	مجموع	۲۵۳۲۱۰/۵۰	۱۷			

ادامه جدول ۱۰- آنالیز واریانس کیفیت آب در سال‌های خشک و تر در منطقه مورد مطالعه

Continue of Table 10- Analysis of variance of water quality in dry and wet years in the study area

		میانگین مربعات	df	میانگین مربعات	F	sig
SAR	بین گروه‌ها	۰/۳۳۵	۲	۰/۱۶۸	۱/۳۱۱	۰/۲۹۹
	داخل گروه‌ها	۱/۹۱۷	۱۵	۰/۱۲۸		
	مجموع	۲/۲۵۳	۱۷			
EC	بین گروه‌ها	۱۱۸۵۱۸/۵۶۷	۲	۵۹۲۵۹/۲۸۳	۱/۸۸۹	۰/۱۸۶
	داخل گروه‌ها	۴۷۰۵۹۳/۴۳۳	۱۵	۳۱۳۷۲/۸۹۶		
	مجموع	۵۸۹۱۱۲/۰۰	۱۷			
دمای میانگین	بین گروه‌ها	۹/۰۲۰	۲	۴/۵۱۰	۷/۸۱۲	۰/۰۰۵
	داخل گروه‌ها	۸/۶۵۹	۱۵	۰/۵۷۷		
	مجموع	۱۷/۶۷۹	۱۷			
بارش	بین گروه‌ها	۰/۵۱۸	۲	۰/۲۵۹	۶/۴۱۷	۰/۰۱۰
	داخل گروه‌ها	۰/۶۰۵	۱۵	۰/۰۴۰		
	مجموع	۱/۱۲۲	۱۷			

نتیجه‌گیری

با توجه به رابطه نزدیک بین چرخه هیدرولوژی و سیستم اقلیمی هر گونه تغییر در اجزاء و عناصر اقلیمی مانند دما، تبخیر و تعرق و بارش، می‌تواند تاثیر مهمی بر مقدار و کیفیت آب زیرزمینی داشته باشد. کاهش بارش و رواناب سطحی از یک سو و افزایش گرما و خشکسالی‌ها از سوی دیگر در کنار افزایش جمعیت و مصرف بی‌رویه و بهره‌برداری روزافزون آب در ارتفاعات نیمه‌خشک زاگرس در غرب ایران شرایط زمانی و مکانی ویژه‌ای برای آب‌های زیرزمینی منطقه ایجاد می‌کند که به‌نوبه خود این تغییرات به کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی در استان‌های شرب و کشاورزی می‌انجامد.

هدف این پژوهش، بررسی اثر تغییر اقلیم بر خصوصیات آب زیرزمینی یک حوزه کوهستانی، با استفاده از نتایج خروجی مدل HADCM3 می‌باشد. در این مقاله اثرات تغییر اقلیم و خشکسالی‌های آینده را بر کیفیت آب‌های زیرزمینی حوزه سیلاخور-رحیم‌آباد با استفاده از مدل LARS-WG، شاخص خشکسالی بارش استاندارد، روش‌های زمین آمار، تحلیل عاملی و آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌طور کلی بیانگر این است که مدل LARS-WG توانمندی خوبی در شبیه‌سازی پارامترهای بارش، دمای حداقل و حداکثر ایستگاه مورد مطالعه دارد. بر اساس معیارهای ارزیابی بیش‌ترین خطای مدل لارس مربوط به شبیه‌سازی بارش به ویژه در ماه‌های ژانویه و آوریل می‌باشد. اما پارامترهای دمای حداقل و حداکثر با دقت بالایی شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج LARS-WG حاکی از روند

کاهش بارش (۰/۵۱ تا ۷/۲۰ درصد) و افزایش دما (۱/۸۵ تا ۱/۵۹ درجه سانتی گراد) تحت هر دو سناریو A2 و B1 برای دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ است. نتایج نشان می دهد که در آینده (۲۰۴۶-۲۰۶۵) در سناریوی A2 طبقه "به شدت خشک" روی نخواهد داد و این سناریو با توجه به افزایش دمای بیش تر و کاهش بارش کم تر نسبت به سناریوی B1، دارای فراوانی طبقات خشکسالی "نسبتا خشک" و "خیلی خشک" بیش تری نسبت به این سناریو خواهد بود. پس از انتخاب یک روش زمین آمار مناسب برای تحلیل مکانی، تحلیل زمانی در ماه ها و فصول انجام شد. نتایج نشان داد که پارامترهای PH، TDS، SAR، EC به ترتیب با استفاده از روش کوکریجینگ معمولی، کوکریجینگ ساده، کوکریجینگ ساده و کوکریجینگ ساده کم ترین مقدار RMSE را داشته اند. لذا نمی توان به طور قطعی و با تاکید برای همه پارامترهای کیفی مورد بررسی در آبخوان مورد مطالعه تنها یک روش زمین آمار را برگزید. همچنین تحلیل عاملی و ماتریس همبستگی نشان داد که بین pH و دمای حداقل بیش ترین همبستگی اما با بارش کم ترین همبستگی وجود دارد. همچنین TDS بیش ترین همبستگی را به میزان ۰/۶۷۶ با SAR و به میزان ۰/۵۶۵ با دمای میانگین داشته است؛ اما در مقابل مشخص شد که SAR همبستگی پائینی با پارامترهای اقلیمی داشته است. EC نیز بیش ترین همبستگی را با دمای میانگین به میزان ۰/۵۶۴ داشته است. با توجه به تغییرات بارش و دما در سال های آینده و نقش این پارامترها در تغییرات کیفی آب می توان به طور کلی فرض اثر تغییر اقلیم بر این پارامترها را تایید کرد. همان گونه که مشاهده می شود دمای حداکثر با بیش ترین درصد واریانس امتیازات، واریانس عامل مشترک است. همچنین مشاهده می شود که اکثر اشتراک ها بالاتر از ۹۰ درصد هستند و بیانگر توانایی عامل های تعیین شده در تبیین واریانس متغیرهای مورد مطالعه است. با این حال متغیر بارش اختلاف بسیار زیادی با سایر متغیرها داشته و ملاحظه می شود که تنها ۱۲/۸ درصد واریانس امتیازات متغیر بارش عامل مشترک می باشد. به طور کلی در شرایط خشکسالی سهم متغیر حداکثر دما و در ترسالی سهم متغیر حداقل دما در عامل اول مهم تر است. متغیر TDS هم در خشکسالی و در ترسالی به عنوان متغیر اصلی در عامل دوم است. بنابر این می توان این گونه نتیجه گرفت که عامل بارش به تنهایی در خشکسالی موثر نیست بلکه خشکسالی پدیده بسیار پیچیده ای است که عوامل مختلفی مانند تبخیر و تعرق در ایجاد آن دخالت دارند. نتایج آنالیز واریانس بین سال های تر و خشک نشان دادند که دمای میانگین و بارش اختلاف معنی داری در این دوره ها دارند. همچنین از بین پارامترهای کیفی آب تنها pH معنادار شده است. اما در مورد TDS، SAR و EC تفاوت معنی داری در سال های خشک و تر مورد بررسی مشاهده نگردیده است؛ یعنی با توجه به اهمیت بارش در انتخاب سال های خشک و تر، در مجموع دما نقش مهم تری نسبت به بارش در کیفیت آب چاه ها دارد. از سوی دیگر بررسی دوره خشکسالی شدید، دوره نرمال و ترسالی حاکی از اختلاف معنی دار همه پارامترهای کیفیت آب مورد بررسی در سطح ۵ درصد دارد. نتایج نشان داد با توجه به کاهش بارندگی، میانگین کل عناصر و مواد در آب های زیرزمینی طی دوره مورد مطالعه ۲۰ تا ۲۵ درصد در آب افزایش یافته است. نتایج کلی نشان داد که خشکسالی تغییرات قابل ملاحظه ای بر پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی داشته اند چرا که خشکسالی ها بدان دلیل

که در مقدار آب ورودی دخالت دارند، مقادیر یون‌های مختلف موجود در آب زیرزمینی را تغییر می‌دهند و در سال‌های خشک مقدار املاح موجود در آب بیش‌تر از مقدار املاح موجود در سال‌های مرطوب است. پژوهش‌های بعدی می‌تواند با بررسی تاثیر توامان ویژگی‌های زمین‌شناسی و رسوبات و پارامترهای اقلیمی و نیز تغییرات نیتروژن، فسفر، اکسیژن و تراکم و نوع پلانکتون‌ها و جلبک‌ها تحلیل دقیق‌تری از وضعیت زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی در منطقه نشان دهد.

References

- Alijani, B., Ghavidel Rahimi, Y., (2005), "Comparison and prediction of annual temperature variations in Tabriz with temperature abnormalities of the planet using linear regression and artificial neural networks", *Geography and Development*, 6 (3): 21-38. [In Persian].
- Ashofteh, P., Mashban Bouvani, A., (2010), "The effect of climate change on maximum volumes, East Azarbaijan province", *Journal of Agricultural Science and Technology, Water and Soil Science*, 53 (14): 28-38. [In Persian].
- Babeiian, A., Najafinik, Z., (2007), "Modeling of Iran's climate in the period from 2010 to 2039", The Closed Terminal Project, *Technical workshop on the effects of climate change in water resources management*, pp. 5-13. [In Persian].
- Bakhtiari, B., Pourmousavi, S., Sari, N., (2014), "Study of the effect of climate change on intensity-duration-frequency curves of Babolsar station during the period of 2030-2011", *Irrigation and Drainage Journal in Iran*, 8 (4): 694-704. [In Persian].
- Bashiri, E., Bashiri, J., Karimi, F., (2013), "Investigating the recent drought effects on underground water resources in the province of Kurdistan from a quantitative and qualitative point of view (Case study: Dehgolan and Ghorveh plains)", *Int. Lett. Nat. Sci.*, 3: 7-20. [In Persian].
- Chen, H., Xu C.Y., Guo, S., (2012), "Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff", *Journal of Hydrology*, 434: 36-45.
- Cherkauer, K. A., Bowling, L. C., Lettenmaier, D. P., (2003), "Variable infiltration capacity cold land process model updates", *Global and Planetary Change*, 38 (1-2): 151-159.
- Doosti, M., Habibnezhad Roshan, M., Shahidi, K., Mir Yaghobzadeh, M., (2013), "Investigation of climatic indices of Temer basin, Golestan province in climatic conditions using LARS-WG model", *Journal of Earth and Space Physics*, 39 (4): 177-189. [In Persian].
- Edwards, D. C., McKee, T. B., (1997), "Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Times Scales", *Atmospheric Science Paper*, 634: 1-30.
- Habibnejad Roshan, M., Shahedi, K., Razzaghian, H., Habibi, M., (2017), "Assessment of climate change in the two periods 2046-2046 and 2080-2099 Babolrood watershed using an atmospheric general circulation model data HadCM3", *Journal of Geographical Space*, 58- (17): 227-242. [In Persian].
- Harasi, S., Asgharo Moghadam, A., Sedigh, H., (2011), "Investigation of groundwater quality changes due to the fall of the surface of the Azarshahr plain", The 30th Earth sciences conference, 1st to 3rd of March 2011, Geological Survey & Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran. [In Persian].
- Honti, M., Schuwirth, N., Rieckermann, J., Stamm, C., (2017), "Can integrative catchment management mitigate future water quality issues caused by climate change and socio-economic development", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21: 1593-1609.
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Treidel, H., Aureli, A., (2011), "Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater", *Journal of Hydrology*, 405 (3-4): 532-560.
- IPCC-DDC., (1998), "The regional impacts of climate change", *An Assessment of Vulnerability. A Special Report of IPCC Working Group II. In: Watson, R.T., Zinyowera, M. C., Moss, R. H., (eds.)*, Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and

New York, NY, USA.

- IPCC., (2007), "Climate change 2007: *The physical science basis. contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. In: Solomon", S. D., Qin, M., Manning, Z., Chen, M., Marquis, K. B., Averyt, M., (eds.), Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC., (2001), "*Third assessment report, work group 2: Methods and tools*", In: James J. M., Osvaldo, F. C., Neil, A. L., Kasey, S. W., (eds), International Panel on Climate Change: Cambridge University Press.

- Jones, N., Francis, R., Walter, H., Zhang, B., (2004), "Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models", *Advances in Water Resources*, 29: 1419-1429.

- Karami, F., Kazemi, H., (2012), "Spatial monitoring of groundwater salinity in drought and wet periods case study: Tabriz Plain", *Geogr. Dev.*, 10: 21-34.

- Lizumi, T., Takayabu, I., Dairaku, K., Kusaka, H., Nishimori, M., Sakurai, G., Ishizaki, N., Adachi, N., Sachiho, A., Semenov Mikhail, A., (2012), "Future change of daily precipitation indices in Japan: A stochastic weather generator-based bootstrap approach to provide probabilistic climate information", *Journal of Geophysical Research*, 117: 1-19.

-Mahmudi, P., Tavusi, A., Shahvazei, R., (2014), "Drought and its effects on groundwater resources quality in sisthan and Baluchestan Province", *Iranian Journal of Water Research in Agriculture*, 29 (1): 21-35. [In Persian].

- Masanganise, J., Chipindu, B., Mhizha, T., Mashonjowa, E., Basira, K., (2013), "An evaluation of the performances of global climate models for predicting temperature and rainfall in Zimbabwe", *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3: 2250-3153.

- Massah Bovani, A., Golmohammadi, M., (2010), "Investigating the changes in the intensity and duration of the drought flood in the Qar-e-Sho area in the coming periods under the influence of climate change", *Water and Soil Journal (Agriculture Sciences and Technology)*, 25 (2): 315-326. [In Persian].

- Massah Bovani, A., Morid, S., (2005), "The effects of climate change on the flow of Zayandehrud River in Isfahan", *Journal of Agricultural Science and Technology*, 9 (4): 17-27. [In Persian].

- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., (1993), "The relationship of drought frequency and duration to time scales", *8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, 17-22 January 1993*.

- Mehdi, B., Lehner, B., Gombault, C., Michaud, A., Beaudin, I., Sottile, M., Blondlot, A., (2015), Simulated impacts of climate change and agricultural land use change on surface water quality with and without adaptation management strategies, *Agric. Ecosyst. Environ*, 213: 47-60. [In Persian].

- Mohammad Rostami, Kh., Mohseni Saravi, M., Hesami, D., Rashidpour, M., Salmani, H., Farokzadeh, B., (2014), "Evaluation of groundwater quality in Mashhad city, using geostatistical methods in drought and wet periods", *Journal of Applied Hydrology*, 38: 49-57.

- Nouri, H., Faramarzi, M., Sadeghi, SH., (2019), "Effects of regional vegetation cover degradation and climate change on dusty weather types", *Environmental Earth Sciences*, 78 (24): 664-724.

- Racsco, P., Szeidl, L., Semenov, M. A., (1991), "A serial approach to local stochastic weather models", *Ecological Modelling*, 57: 27-41.

- Rezaei, M., Nectani, M., Moghaddamnia, A., Abkar, A., Rezaei, M., (2014), "Evaluation of

the efficiency of exponential momentum model in precipitation estimation in two dry and quaternary climates", *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Technology)*, 28 (4): 836-845. [In Persian].

- Roshan, H., Habibnejad Roshan, M., Shahedi, K., (2019), "Investigation of the trend of groundwater level changes and drought indicators GRI and SWI in Sari-Neka plain", *Journal of Geographical Space*, 67 (19): 131-146.

- Seyyed Ghasemi, S., Silk Chi, A., Tajrishi, M., (2006), "Effects of changes in Zayandehrand river flow due to climate change", Second Conference on Water Resources Management, Isfahan University of Technology, Isfahan, 10-12 May 2017. [In Persian].

- Sefelnasr, A., Gossel, W., Wycisk, P., (2015), "Groundwater management options in an arid environment: the Nubian Sandstone Aquifer System, Eastern Sahara", *Journal of Arid Environments*, 122: 46-58.

- Semenov, M. A., Stratonovitch, P., (2010), "The use of multi-model ensembles from global climate models for impact assessments of climate change", *Climate Research*, 41 (1): 1-14.

- Tabachnick, B. G., Fidell, L. S., (2000), *"Analysis of incomplete multivariate data"*, Chapman & Hall/CRC: Boca Raton.

- Theodossiou, N., Latinopoulos, P., Karatzas, G., Maria, E., (2007), "Application of the principle "the polluter- pays" in groundwater resources under conditions of uncertainty", 6th Greek National Conference E.E.D.Y.P. Overall Water Resources Management based on Watershed, Pecan. 16-17 Janury 2007.

- Waibel, M. S., Gannett, M. W., Chang, H., Hulbe, C. L., (2013), "Spatial variability of the response to climate change in regional groundwater systems—examples from simulations in the Deschutes basin", Oregon, *Journal of Hydrology*, 486: 187-201.

- Wilby, R. L., Harris, I., (2006), "A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK", *Water Resources Research*, 42: 1-10

- Zessner, M., Schönhart, M., Parajka, J., Trautvetter, H., Mitter, H., Kirchner, M., Hepp, G., Blaschke, A., Strenn, B., Schmid, E., (2017), "A novel integrated modelling framework to assess the impacts of climate and socio-economic drivers on land use and water quality", *Water Resources Research*, 88 (2): 317-415.

- Zhang, X., Xu, Y.P., Fu, G., (2014), "Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change", *Journal of Hydrology*, 515: 205-222.

- Zhanga, X., Watersb, D., Ellisa, R., (2013), "Evaluation of simhyd, sacramento and GR4J rainfall runoff models in two contrasting great barrier reef catchments", 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1-6 December 2013.

- Zoboli, O., Schilling, K., Ludwig, A., Kreuzinger, N., Zessner, M., (2018), "Primary productivity and climate change in Austrian lowland rivers water sci", *Technol*, 77 (2): 417-425.

- Zulkarnain, H., Supiah, S., Sobri, H., (2013), "Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature", *Theor Appl Climatol, Theor Appl Climatol*, 116 (1-2): 243-257.