



Effect of Drought on Hashtgerd Plain Groundwater Quantity and Quality Considering Irrigation Use

J. Nikbakht^{1*} and O. Moradi²

Abstract

Drought as a natural phenomenon occurs due to shortage of rainfall and increase of temperature over a long-term period. This can affect the quality and quantity of groundwater. In this research, the impact of drought on groundwater quality was investigated in respect to the irrigation usage from Hashtgerd plain aquifer. First, using Thiessen-polygon method and precipitation values of 6 weather stations in Hashtgerd plain, total average monthly rainfall for a period of 30 years (1985-2015) was calculated. Monthly averages of groundwater levels for a period of 23 years (1991-2014) were calculated using data from 8 observation wells and Thiessen-polygon method. The climatological drought and the groundwater drought were evaluated by SPI and GRI, respectively. Based on the results, the longest climatological drought with durability of 2 years, severity of -2.73 (SPI_{sum}), density of -1.365 (SPI_{avg}) and total average monthly rainfall of 157.70 mm was marked in the water years 1998-1999. The most severe groundwater drought was in the water years 2010-2014 (4 years durability) with severity of -6.10 (GRI_{sum}), density of -1.53 (GRI_{avg}) and groundwater average monthly level of 1180.26 m. On 12 months period, correlation between groundwater levels and rainfall amounts were significant with time-lag of 11 months. In June of water year 2013-2014 with extreme drought condition, water quality in 16% of the aquifer area was appropriate for irrigation while in December, the aquifer was totally unsuitable for irrigation in terms of water quality. Based on LSI, in June and December of all studied years, the water quality of 100% of the Hashtgerd plain aquifer area, showed the potential of calcium carbonate sediments formation.

Keywords: Drought, Standard Precipitation Index (SPI), Groundwater Resource Index (GRI), Pearson Correlation, Willcox Diagram, Langelier Saturation Index.

Received: October 5, 2017

Accepted: June 4, 2018

تأثیر خشکسالی بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت هشتگرد از دیدگاه آبیاری

جعفر نیکبخت^{۱*} و امید مرادی^۲

چکیده

خشکسالی به عنوان یک پدیده طبیعی در اثر کمبود بارندگی و افزایش دما در یک دوره زمانی بلندمدت رخ می‌دهد. تحت تأثیر خشکسالی کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر تأثیر خشکسالی بر کیفیت آب زیرزمینی از دیدگاه آبیاری در آبخوان دشت هشتگرد بررسی شد. ابتدا با استفاده از مقادیر بارش ۶ ایستگاه هواشناسی دشت هشتگرد و روش پلی‌گون‌بندی تیسن، متوسط مجموع ماهانه بارندگی دشت برای دوره ۳۰ سال (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴) محاسبه شد. متوسط ماهانه سطح آب زیرزمینی، بر اساس اطلاعات ۸ چاهک مشاهده‌ای و روش پلی‌گون‌بندی تیسن، برای دوره ۲۳ سال (۱۳۷۰ تا ۱۳۹۳) محاسبه شد. سپس خشکسالی آب و هوایی، با شاخص SPI و خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص GRI محاسبه شد. بر اساس نتایج، طولانی‌ترین دوره خشکسالی آب و هوایی با دوام ۲ ساله، قدرت، شدت و متوسط بارش $SPI_{sum} = -2/73$ ، $SPI_{avg} = -1/365$ و $157/70$ میلی‌متر (به ترتیب) در سال‌های آبی ۱۳۷۷ تا ۱۳۷۸ بود. شدیدترین خشکسالی آب زیرزمینی در ۴ سال آبی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳، با قدرت $GRI_{sum} = -6/10$ ، شدت $GRI_{avg} = -1/53$ و متوسط سالانه سطح آب زیرزمینی ۱۱۸۰/۲۶ متر بود. در دوره زمانی ۱۲ ماه، بین سطح آب زیرزمینی و بارش، همبستگی معنی‌دار با ۱۱ ماه تأخیر وجود داشت. در خردادماه سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۳ با شرایط خشکسالی بسیار شدید، کیفیت آب ۱۶ درصد از سطح آبخوان برای آبیاری مناسب و ۸۴ درصد نامناسب بود در حالی که در آذرماه همان سال آبی ۱۰۰ درصد سطح آبخوان دارای کیفیت نامناسب بود. بر اساس شاخص LSI، در کلیه سال‌های مورد بررسی و در هر دو مقطع زمانی خرداد و آذرماه، آب ۱۰۰ درصد سطح آبخوان دشت هشتگرد دارای پتانسیل تشکیل رسوبات کربنات کلسیم بود.

کلمات کلیدی: خشکسالی، شاخص بارش استاندارد SPI، شاخص منبع آب زیرزمینی GRI، همبستگی پیرسون، نمودار ویل کاکس، شاخص اشباع لانزیلر.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۷/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۳/۱۴

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Zanjan, Iran. E-Mail: nikbakht.jaefer@znu.ac.ir

2- Graduate Student of Irrigation and Drainage, University of Zanjan, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان.

۲- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه زنجان.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

رخ داده است. هم چنین نتایج بررسی همبستگی بین سطح آب زیرزمینی و بارش در این دشت نشان داد که این دو پارامتر با تأخیر دو ماهه با یکدیگر ارتباط داشت. بررسی همبستگی بین دو شاخص GRI و SPI در دشت ساوه در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه نشان داد خشکسالی هواشناسی با یک تأخیر ۵ ماهه بر منابع آب زیرزمینی این دشت اثر داشت (Mohammadi Ghalehi et al., 2011). Khajeh et al. (2015) با بررسی وضعیت خشکسالی در دشت پریشان فارس نتیجه گرفتند که طی ۲۳ سال اخیر، تکرار وقوع خشکسالی اقلیمی در دهه اخیر در مقایسه با دو دهه گذشته، ۴ برابر شده است. در این دشت به طور میانگین سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۰ حدود ۶/۲۵ متر افت داشت. هم چنین، با افزایش تکرار خشکسالی و افت زیاد سفره آب زیرزمینی، کیفیت آب زیرزمینی، به ویژه در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ روند نزولی داشت. بررسی Ahmadi Akhoorme et al. (2015) در آبخوان مرودشت خرامه استان فارس با GRI برای دوره‌ی آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ نشان داد در این دشت خشکسالی آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۶ شروع شد و شدیدترین خشکسالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه در مهر ماه ۱۳۹۰ با مقدار ۱/۹۴- رخ داده بود. هم چنین از نظر مکانی نیز شروع تأثیر خشکسالی از بخش‌های شمالی بوده و با گذشت زمان به بخش‌های مرکزی و جنوبی تغییر مکان داده بود. Choubin et al. (2016) طی پژوهشی با محاسبه SPI طی دوره آماری ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۹ و GRI در دوره آماری ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۹ برای دشت اسپاس استان فارس، نتیجه گرفتند بیشترین ارتباط بین GRI و SPI در مقیاس ۲۴ ماهه بود به طوری که تقریباً ۸۰ درصد تغییرات متوسط سطح ایستابی دشت تحت تأثیر تغییرات بارندگی بود و نزدیک به ۲۰ درصد آن تحت تأثیر سایر موارد بود. نتایج بررسی Asadzadeh et al. (2016) نشان داد در دشت قروه و چهاردولی کردستان، شدت خشکسالی‌های اقلیمی در مقیاس ۲۴ ماهه بیش‌تر از مقیاس ۴۸ ماهه بود. در این دشت سطح آب زیرزمینی طی دوره آماری مورد بررسی دارای روند نزولی (۴۹ سانتی‌متر در سال) بود و بیشترین افت در سال ۱۳۹۰ نسبت به سال ۱۳۶۵ در قسمت‌های شرقی و جنوبی دشت به میزان ۲۴ متر رخ داد. از نظر کیفی در دوره خشکسالی ۷۰ درصد منطقه مورد مطالعه در دو کلاس C_2S_1 (کمی شور و برای کشاورزی تقریباً مناسب) و C_3S_1 (شور و برای کشاورزی با تمهیدات مناسب) بود و کیفیت آب در ترسالی به دلیل افزایش برداشت از چاه‌ها بهتر نشد و حتی در برخی از مناطق دشت بدتر نیز شد. Zeinali et al. (2017) با بررسی دوره‌های متوالی خشکسالی هواشناسی (با SPI) و هیدروژئولوژی (با SWI) دشت مرند آذربایجان شرقی نتیجه گرفتند در سال ۱۳۸۶ خشکسالی شدید در منطقه اتفاق افتاده و تا سال‌های پایانی دوره مورد مطالعه (۱۳۹۰)، نیاز آبی منطقه تأمین نشده است. هم چنین بین خشکسالی هواشناسی و آب

خشکسالی به وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دما در یک دوره زمانی بلندمدت اطلاق می‌شود که در هر منطقه با هر وضعیت اقلیمی ممکن است رخ دهد (Alizadeh, 2011). این پدیده خزنده زمانی به یک فاجعه تبدیل می‌شود که تقاضای آب از سوی جوامع بشری و زیست‌محیطی در امتداد رخداد آن، افزایش پیدا کند (Lloyd-Hughes and Saunders, 2002; Tsakiris et al., 2007). بنابراین با توجه به گستره مکانی رخداد خشکسالی و تبعات کوتاه‌مدت و بلندمدت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پی‌آمد آن، این پدیده یکی از مهم‌ترین بلاهای طبیعی محسوب می‌شود (Mahmoudi et al., 2015). انواع خشکسالی بر اساس توالی رخداد شامل خشکسالی اقلیمی، هیدروژئولوژیکی و کشاورزی می‌باشد. خشکسالی‌های هواشناسی پیش از انواع دیگر خشکسالی‌ها رخ می‌دهد. با تأخیر زمانی، خشکسالی هواشناسی به خشکسالی‌های کشاورزی و سپس به خشکسالی‌های هیدروژئولوژیکی منجر می‌شود (Mahmoudi et al., 2015). تحت تأثیر خشکسالی هیدروژئولوژیکی، ذخایر آبی سطح زمین و زیرزمینی از قبیل جریان‌های رودخانه‌ای، سطح آب دریاچه‌ها، آب‌های زیرزمینی و غیره کاهش می‌یابد (Wilhite and Glantz, 1985). عموماً واکنش آب‌های زیرزمینی به دوره‌های خشک به سرعت آب‌های سطحی نبوده و نسبت به آن روند آرام‌تری دارد ولی با توجه به این‌که تجدید این منابع بسیار طولانی‌تر است، تأثیر خشکسالی‌های طولانی‌مدت بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی بسیار جدی‌تر است (Chitsazan et al., 2009).

نتایج بررسی آمار تراز آب زیرزمینی ۱۰۰۲ چاهک مشاهده‌ای منطقه اریسای هند توسط Panda et al. (2015) برای دوره ۱۰ ساله (۱۹۹۴-۲۰۰۳) نشان داد افت سطح آب زیرزمینی و بیلان منفی آب آبخوان در طول سال‌های خشک (ناشی از کمبود بارش، برداشت بیش از اندازه و درجه حرارت بالا)، در سال‌های مرطوب جبران نشد. Eslamian et al. (2009) با محاسبه ضریب همبستگی بین میزان بارش و تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت بوئین اصفهان با تأخیرهای زمانی ۰، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ ماهه نتیجه گرفتند کاهش یا افزایش بارندگی بر روی آب‌های زیرزمینی این دشت اکثراً با تأخیر ۳ ماهه رخ داده است. در این دشت مقدار افت کلی آب آبخوان طی سال‌های آماری مورد بررسی (۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲) ۴/۰۲ متر بود که در سال‌های مرطوب فقط ۲/۷۱ متر آن جبران شد. Karami (2012) با بررسی داده‌های ماهانه بارش دوره ۱۳۵۱ تا ۱۳۸۳ و سطح آب زیرزمینی دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۳ دشت تبریز نتیجه گرفت کمترین سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۰ (۱۳۱۲/۷۴ متر) که مصادف با وقوع خشکسالی بود

متصور شد (Malekian and Mirdashtvan, 2016). جهت انجام پژوهش حاضر، داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز شامل مقادیر بارندگی از اداره کل هواشناسی استان البرز و شرکت سهامی آب منطقه‌ای البرز، همچنین داده‌های کیفی و کمی آب زیرزمینی، نقشه‌های محدوده دشت و آبخوان دشت هشتگرد، خطوط توپوگرافی و عوارض زمین از شرکت آب منطقه‌ای البرز اخذ شد.

ابتدا متوسط بارندگی دشت هشتگرد محاسبه گردید. به این منظور با توجه به محدوده دشت، خطوط توپوگرافی و نیز موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه، ایستگاه‌های با طول دوره آماری مشترک طولانی که در محدوده دشت قرار داشته و اختلاف ارتفاعی زیادی با هم نداشتند، جهت تعیین مقدار متوسط بارش منطقه انتخاب شدند. به این منظور ۶ ایستگاه با طول دوره آماری مشترک بلندمدت ۳۰ سال (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴) جهت انجام تحقیق انتخاب گردید. سپس در محیط ArcGIS-10.3.1 و با روش پلی‌گون‌بندی تیسن، چند ضلعی تیسن هر ایستگاه تعیین گردیده (شکل ۲) و مساحت آنها استخراج شد (Choubin et al., 2016) و در نهایت با استفاده از رابطه ۱ مقدار متوسط بارش ماهانه دشت برای دوره ۳۰ سال محاسبه گردید.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

در رابطه ۱، \bar{P} : متوسط مقدار بارش، P_i : مجموع بارش ماهانه در هر ایستگاه، A_i : مساحت پلی‌گون مربوط به هر ایستگاه بارندگی، n :

تعداد ایستگاه‌ها و $\sum_{i=1}^n A_i$: کل سطح پلی‌گون‌ها می‌باشد.

زیرزمینی تأخیر پنج ماهه مشاهده شد. ارزیابی کیفیت شیمیایی آب‌های زیرزمینی بر اساس دیاگرام ویل کاکس نشان داد به طرف غرب آبخوان کلاس آب‌های خیلی شور در خرداد ۱۳۸۲ از حدود ۲۷/۱۷ درصد به حدود ۴۴/۰۱ در سال ۱۳۹۰ افزایش یافت که بیانگر کیفیت ضعیف برای آبیاری بود.

با وجودی که آب‌های زیرزمینی فقط حدود ۴ درصد از مجموعه آب‌هایی را که فعالانه در چرخه هیدرولوژی دخالت دارند تشکیل می‌دهد ولی حدود ۵۰ درصد جمعیت دنیا از نظر آب شرب متکی به همین آب‌های زیرزمینی می‌باشند. این رقم در ایران به مراتب بالاتر از ۵۰ درصد بوده و می‌توان گفت اکثر شهرها و روستاهای کشور، آب مورد نیاز شرب و کشاورزی خود را از منابع زیرزمینی تأمین می‌کنند (Alizadeh, 2011). بنابراین با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در مناطق مختلف ایران، هدف از این تحقیق بررسی تأثیر خشکسالی بر کمیت و کیفیت آب آبخوان دشت هشتگرد-البرز بود.

۲- مواد و روش انجام پژوهش

دشت هشتگرد با مساحتی در حدود ۴۱۰ کیلومترمربع در قسمت مرکزی استان البرز واقع شده است (شکل ۱). این دشت بین طول‌های ۵۰ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۶ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۷ دقیقه شمالی قرار دارد. آب و هوای منطقه در بخش‌های شمالی نیمه مرطوب است و به تدریج به سوی جنوب دشت، با کاهش ارتفاع، به نیمه خشک تمایل می‌یابد. بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم دشت هشتگرد نیمه خشک است (Shemshaki et al., 2011). ارتفاع منطقه از سطح آب‌های آزاد در پای ارتفاعات شمال دشت ۱۴۰۰ متر، در قسمت غربی ۱۶۵ و متوسط ارتفاع دشت ۱۲۰۰ متر است. می‌توان آبخوان دشت را از نوع آزاد

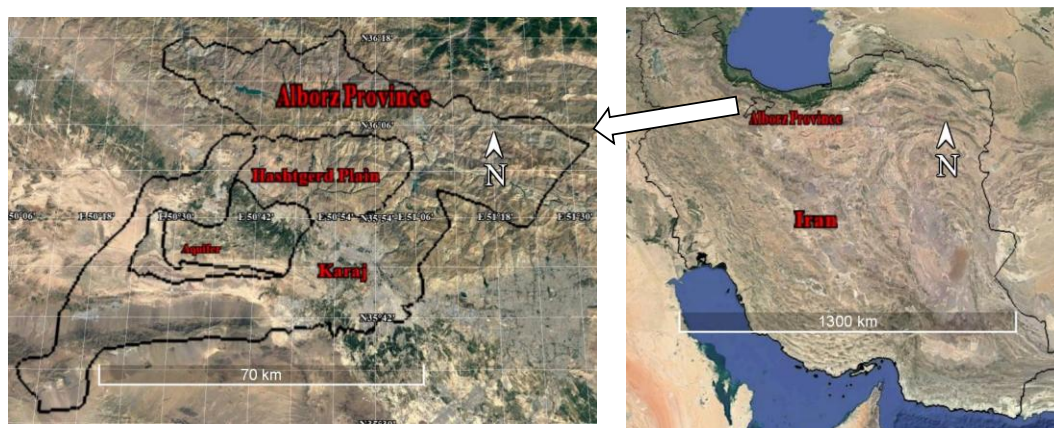


Fig. 1- Geographical location of the Hashtgerd plain and aquifer in Iran and in Alborz province

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت و آبخوان هشتگرد در ایران و استان البرز

در ادامه به منظور محاسبه متوسط سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت، پس از بررسی دوره آماری کلیه چاهک‌های مشاهده‌ای نصب شده در گستره دشت، ابتدا تعداد ۸ چاهک با دوره آماری مشترک ۲۳ سال (۱۳۷۰ تا ۱۳۹۳) انتخاب شد. سپس چند ضلعی تیسن هر چاهک در محیط ArcGIS-10.3.1 با روش پلی‌گون‌بندی تیسن ترسیم شده (شکل ۳) و مساحت آنها استخراج شد (Choubin et al., 2016) و در نهایت با کمک رابطه ۲ مقدار متوسط سطح آب آبخوان محاسبه گردید.

رابطه ۲: $\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i \times A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i}$

در رابطه ۲: \bar{H} : متوسط ماهانه سطح آب زیرزمینی، H_i : سطح آب ماهانه چاهک مشاهده‌ای، A_i : مساحت پلی‌گون مربوط به هر چاهک مشاهده‌ای، n : تعداد چاهک مشاهده‌ای دشت و $\sum_{i=1}^n A_i$: کل سطح پلی‌گون‌ها می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر متوسط بارش و سطح آب زیرزمینی، با استفاده از روابط ۳ و ۴، سری‌های آماری ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماه هر دو پارامتر ایجاد شد.

$$P_k = \sum_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

$$\bar{H}_k = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (4)$$

P_k : مجموع بارش رخ داده در دوره‌های محاسباتی، P_i : مجموع بارش ماهانه، \bar{H}_k : متوسط سطح آب زیرزمینی در دوره‌های محاسباتی، H_i : متوسط سطح آب زیرزمینی ماهانه و n تعداد ماه‌های دوره‌های محاسباتی می‌باشد (Mofidipoor et al., 2012).

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (5)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad (6)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (7)$$

$$A = \text{Ln}(\bar{x}) - \frac{\sum \text{Ln}(x)}{n} \quad (8)$$

α و β به ترتیب مؤلفه‌های شکل و مقیاس، x مقدار بارندگی و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما، \bar{x} میانگین بارش و n تعداد دیده‌بانی است (Zare Abianeh et al., 2009). در مرحله بعد، به منظور تعیین مقادیر SPI، مقادیر احتمال تجمعی به دست آمده از توزیع گاما برای تک‌تک داده‌های بارش هر یک از سری‌های آماری، به توزیع نرمال استاندارد تجمعی (با میانگین صفر و انحراف از معیار یک) انتقال داده شد.

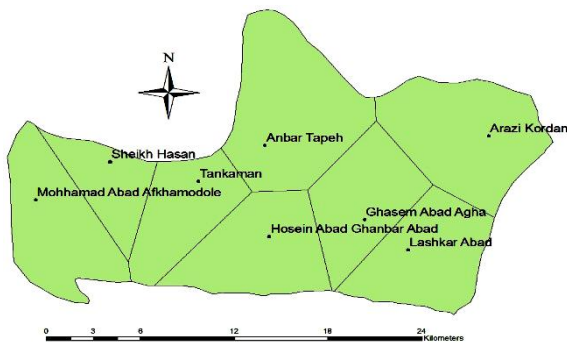


Fig. 3- The location and Thiessen-polygon of absevation wells in Hashtgerd Plain aquifer
شکل ۳- موقعیت و چند ضلعی تیسن چاهک‌های مشاهده‌ای آبخوان هشترگرد

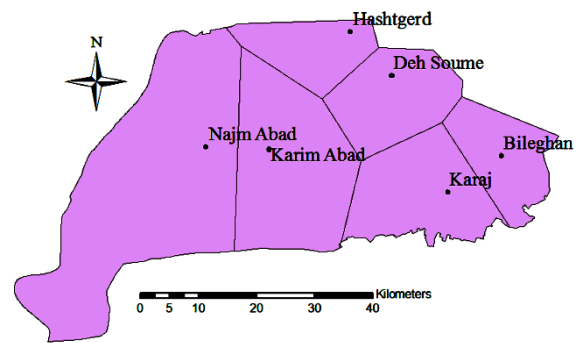


Fig. 2- The location of selected meteorological stations and their Thiessen-polygons in Hashtgerd Plain
شکل ۲- موقعیت و چند ضلعی تیسن ایستگاه‌های هواشناسی انتخاب شده در دشت هشترگرد

بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، کیفیت سطح آب زیرزمینی از دو دیدگاه ۱- پتانسیل رسوب کربنات کلسیم و ۲- کیفیت آب برای آبیاری مورد بررسی قرار گرفت. تشکیل رسوب کربنات کلسیم در ادوات سیستم‌های آبیاری باعث کاهش کارایی آنها می‌شود. همچنین در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای گرفتگی قطره‌چکان‌ها در اثر رسوب کربنات کلسیم، موجب کم‌آبیاری و وارد آمدن تنش آبی بر گیاه تحت آبیاری می‌گردد. به منظور بررسی تمایل آب به رسوب کربنات کلسیم از شاخص اشباع لانتزیلر (LSI) استفاده شد (رابطه ۱۱).

$$LSI = pH - pH_c \quad (11)$$

$$pH_c = p(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+) + p(Ca^{2+} + Mg^{2+}) + p(Co_3^{2-} + HCO_3^-) \quad (12)$$

LSI: شاخص اشباع لانتزیلر؛ pH: اسیدیته واقعی آب زیرزمینی؛ pH_c : اسیدیته محاسبه شده بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی آب؛ $p(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)$: نمایه کاتیون‌های آب زیرزمینی. مقادیر مثبت شاخص اشباع لانتزیلر نشان‌دهنده تمایل آب به رسوب کربنات کلسیم بوده و اعداد منفی بیان‌گر عدم تشکیل رسوب کربنات کلسیم می‌باشد (Alizadeh, 2013).

مهم‌ترین معیارهای کیفی در طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی و آبیاری، شوری و مقدار سدیم موجود در آن می‌باشد، زیرا این عامل نه تنها بر رشد گیاه مؤثرند، بلکه درجه تناسب آب را از نظر آبیاری و تأثیر آن بر نفوذپذیری خاک مشخص می‌سازند. شوری با معیار هدایت الکتریکی (EC) و سدیم با معیار نسبت جذب سدیم (SAR) سنجیده می‌شود. بر اساس تجربه ثابت شده است که هر چه شوری آب افزایش یابد، خطرات ناشی از سدیم نیز افزایش می‌یابد. بنابراین جهت بررسی کیفی آب به لحاظ کشاورزی بهتر است که تأثیر دو عامل EC و SAR آب آبیاری با هم در نظر گرفته شود. آزمایشگاه شوری خاک آمریکا در این مورد نمودار طبقه‌بندی ویل کاکس را ارائه نموده است (Alizadeh, 2013). به منظور بررسی تأثیر خشکسالی و افت سطح آب زیرزمینی بر کیفیت آن، ابتدا ۳ سال آبی با شرایط متفاوت خشکسالی، نرمال و ترسالی انتخاب شد. سپس مساحت پارامترهای کیفی تعریف شده در این تحقیق (LSI و ویل کاکس)، در ۳ سال آبی انتخابی تعیین گردید. لازم به توضیح است که پس از اخذ داده‌های آنالیز شیمیایی کیفیت آب زیرزمینی دشت هشتگرد، مشاهده شد در این دشت کیفیت آب زیرزمینی در دو مقطع زمانی متفاوت خرداد ماه و آذرماه اندازه‌گیری شده است. بنابراین کلیه بررسی‌های کیفی برای این مقطع زمانی صورت گرفت. جهت تعیین مساحت پهنه‌های مثبت و منفی شاخص LSI، ابتدا منحنی‌های هم ارزش LSI در گستره آبخوان در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد و در نهایت میزان سطح این شاخص محاسبه شد. هم‌چنین جهت تعیین سطح پهنه‌های

مقادیر حاصل از توزیع نرمال، مقادیر SPI بود (Mosaedi and Ghabaei Sough, 2011). به منظور طبقه‌بندی هر داده SPI سری مورد بررسی، از نظر خشکسالی و ترسالی، از جدول ۱ استفاده شد. برای محاسبه شاخص SPI می‌توان از فرمول ۹ استفاده کرد.

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (9)$$

SPI: شاخص استاندارد بارندگی، P_i : مقدار بارندگی دوره، \bar{P} و SD به ترتیب میانگین و انحراف معیار بارندگی کل دوره آماری مورد نظر می‌باشد (Faryabi and Mozaffarizade, 2017).

Table 1- The SPI values and drought severity classification (McKee et al., 1993)
جدول ۱- مقادیر SPI و طبقه‌های شدت خشکسالی (McKee et al., 1993)

SPI values	Drought severity class
≥ 2	Extremely wet
1.50 ~ 1.99	Severely wet
1.00 ~ 1.49	Moderately wet
0.99 ~ -0.99	Normal
-1.00 ~ -1.49	Moderate drought
-1.50 ~ -1.99	Severe drought
≤ -2	Extreme drought

هم‌چنین به منظور بررسی خشکسالی آب زیرزمینی، از شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) استفاده شد (رابطه ۱۰). شاخص GRI در سال ۲۰۰۸ توسط مهندسین و همکاران به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای مدل‌سازی، پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شد (Faryabi and Mozaffarizade, 2017).

$$GRI_y = \frac{D_y - \mu_D}{\sigma_D} \quad (10)$$

که در آن GRI_y : ارزش شاخص در سال y ، D_y : ارزش سطح ایستابی در سال y ، μ_D : میانگین داده‌های سطح ایستابی برای D سال و σ_D : انحراف معیار داده‌های سطح ایستابی برای D سال می‌باشد. طبقات مختلف خشکسالی در شاخص GRI همانند شاخص SPI می‌باشد که در جدول ۱ ذکر شد (Chezgi et al., 2013). پس از محاسبه مقادیر SPI و GRI، به منظور بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی بر سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت هشتگرد و تعیین وجود یا عدم وجود تأخیر زمانی بین رخداد خشکسالی هواشناسی و خشکسالی ژئوهیدرولوژیکی، از روش همبستگی پیرسون استفاده گردید (Mofidipoor et al., 2012).

پس از بررسی تغییرات کمی سطح آب زیرزمینی، در مرحله نهایی تحقیق، تأثیر خشکسالی و افت سطح آب زیرزمینی بر کیفیت آن مورد

میلی‌متر بود که نسبت به میانگین دوره ۳۰ سال آماری، ۶۱ درصد (۱۵۴/۹ میلی‌متر) بیش‌تر بود. یافته‌های (Khajeh et al. (2015) نشان داد دشت پیریشان طی سال‌های ۸۱-۱۳۸۰ و ۸۳-۱۳۸۴ با ترسالی (به ترتیب با SPI برابر با ۱/۰۳ و ۱/۱۱) و سال ۱۳۸۷-۱۳۸۶ با خشکسالی شدید (۱/۵۹-) و سال ۸۸-۱۳۸۷ با خشکسالی متوسط (۱/۴۳-) و در بقیه سال‌های دوره آماری مورد بررسی (۱۳۸۱-۱۳۹۰) با ترسالی روبرو بوده است. نتایج بررسی (Abasi et al. (2017) در ۷ ایستگاه هواشناسی دشت قروه و دهگلان کردستان نشان داد در کلیه ایستگاه‌های مورد بررسی، بیش‌ترین درصد فراوانی مربوط به وضعیت نرمال بود و ترسالی بسیار شدید و خشکسالی بسیار شدید کم‌ترین درصد فراوانی وقوع را داشت.

تغییرات متوسط سالانه سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت هشتگرد (هیدروگراف واحد آبخوان) و شرایط خشکسالی حاکم بر آن بر اساس GRI در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، سطح آب زیرزمینی دشت هشتگرد در طول ۲۳ سال آبی با شیب ۷۰ درصد به میزان ۱۵/۵ متر افت کرده است. با بررسی شرایط آب و هوایی و میزان بارندگی دشت (شکل ۶) در ۲۳ سال فوق، می‌توان چنین نتیجه گرفت که افت سطح آب زیرزمینی عمدتاً ناشی از بیش‌برداشت از آبخوان بوده و کاهش بارش‌ها در این زمینه نقش اساسی نداشته است. افت سطح آب زیرزمینی در اکثر دشت‌های ایران گزارش شده است. بر اساس یافته‌های (Khorani and Khajeh (2014) میزان افت سطح آب زیرزمینی در دشت داراب در طول سال‌های ۸۹-۱۳۷۲ به طور متوسط ۱/۳۵ متر در سال، در دشت مرند حدود ۳ متر در طول دوره ۹۰-۱۳۸۰ (Zeinali et al., 2017) و در دشت قروه و چهاردولی در طول ۲۵ سال دوره آماری مورد بررسی (۱۳۶۵-۱۳۹۰) حدود ۰/۴۹ متر در سال (Asadzadeh et al., 2016) بود.

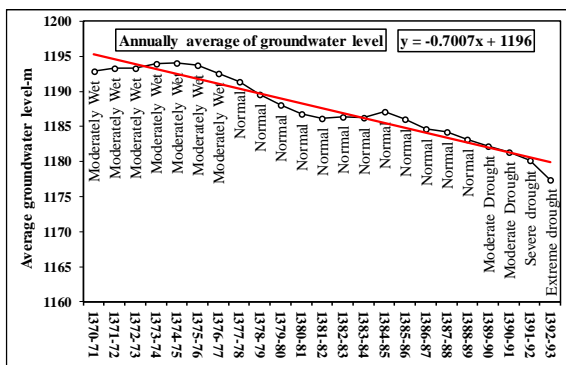


Fig. 7- Average groundwater level changes and hydrological drought in Hashtgerd Plain

شکل ۷- تغییرات متوسط سطح آب زیرزمینی و خشکسالی هیدروولوژیکی آبخوان دشت هشتگرد

مربوط به هر طبقه نمودار ویل کاکس، ابتدا منحنی‌های هم ارزش EC و SAR در گستره آبخوان با کمک نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد. با ترکیب دو منحنی با یکدیگر، طبقه‌های مختلف نمودار ویل کاکس به دست آمد. در نهایت مساحت مربوط به پهنه هر طبقه محاسبه گردید.

۳- نتایج و بحث

شکل ۶، مجموع بارش سالانه و خشکسالی هواشناسی سال‌های آبی متفاوت دوره آبی مورد بررسی در دشت هشتگرد را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شکل ۶، با وجودی که در سال‌های آخر دوره آماری، مقدار بارش کاهش یافته است ولی روند کلی بارندگی در دشت هشتگرد با شیب ۲۹/۵ درصد افزایشی بود. از نظر شاخص SPI، شرایط آب و هوایی ۲۲ سال از ۳۰ سال آبی مورد بررسی (۷۳/۳ درصد) نرمال بود. متوسط بارش و SPI در ۲۲ سال آبی ذکر شده، به ترتیب ۲۶۱/۹۱ میلی‌متر و ۰/۱۹ به دست آمد. شدیدترین خشکسالی به وقوع پیوسته در این منطقه در سال آبی ۱۳۷۵-۱۳۷۶ با $SPI = -2/81$ و میزان بارش ۹۰/۴ میلی‌متر بود. میزان بارش سال آبی اخیر نسبت به میانگین کل دوره ۳۰ ساله (۲۵۲/۹ میلی‌متر) ۱۶۲/۵ میلی‌متر (۱۸۰ درصد) و نسبت به متوسط بارش سال‌های نرمال (۲۶۱/۹۱ میلی‌متر) ۶۵ درصد کم‌تر بود. طولانی‌ترین دوره خشکسالی رخ داده در دشت هشتگرد با دوام ۲ ساله، در سال‌های آبی ۱۳۷۷-۱۳۷۸ (خشکسالی شدید) تا ۱۳۷۸-۱۳۷۹ (خشکسالی متوسط) بود که قدرت و شدت خشکسالی در این دو سال به ترتیب $SPI_{sum} = -2/73$ و $SPI_{avg} = -1/365$ و متوسط بارش ۱۵۷/۷۰ میلی‌متر بود (۳۸ درصد کم‌تر از بارش متوسط دوره ۳۰ ساله). در دشت مورد مطالعه ترسالی با دوام بیش‌تر از یک سال مشاهده نشد. شدیدترین دوره ترسالی در این دشت با $SPI = 1/82$ (ترسالی شدید)، در سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ بود. میزان بارندگی این سال ۴۰۷/۸

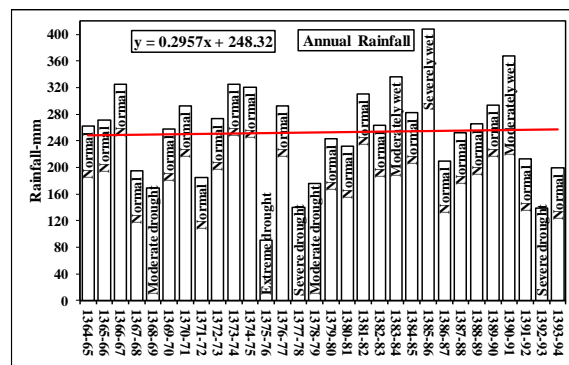


Fig. 6- Total rainfall and climatological drought in different water years in Hashtgerd Plain

شکل ۶- مجموع بارش و خشکسالی هواشناسی سال‌های آبی متفاوت در دشت هشتگرد

۴/۸) متر در کل دوره) بنابراین نتیجه می‌شود ۳۱ درصد افت سطح آب زیرزمینی در ۲۳ سال دوره آماری در ۴ سال آخر بوده است.

شکل ۸، تأثیر شرایط بارندگی بر تغییرات تراز آب زیرزمینی در گستره دشت هشتگرد در سال‌های آبی ۱۳۷۴-۱۳۷۵ (ترسالی متوسط)، ۱۳۸۴-۱۳۸۵ (شرایط نرمال) و ۱۳۹۲-۱۳۹۳ (خشکسالی بسیار شدید) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در سال آبی ۱۳۷۴-۱۳۷۵ با شرایط ترسالی، بیش‌ترین تراز آب آبخوان (ورودی دشت) ۱۲۹۵ متر بود که نسبت به شرایط نرمال (سال آبی ۱۳۸۴-۱۳۸۵) ۵ متر و نسبت به شرایط خشکسالی بسیار شدید (سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۳) ۲۰ متر بالاتر بود. تحت تأثیر کاهش بارش ناشی از حاکم شدن شرایط خشکسالی، علاوه بر کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی، برداشت‌ها از آن نیز افزایش می‌یابد در نتیجه، تراز آب زیرزمینی در کل سطح دشت دچار افت می‌شود اما وقوع این حالت در شرایط ترسالی برعکس می‌باشد (شکل ۸).

جهت بررسی ارتباط بین متوسط سطح آب زیرزمینی و میزان بارش، همبستگی بین مقادیر آنها با روش پیرسون محاسبه و سطح معنی‌داری همبستگی تعیین شد (جدول ۲). همان‌طور که از نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود در منطقه هشتگرد، بارش با تأخیر ۱۰ ماهه برای دوره زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۱ ماه برای دوره زمانی ۱۲ ماه باعث تأثیر بر سطح آب زیرزمینی و تغییر آن می‌شود.

در دشت هشتگرد بر خلاف بارندگی که وقوع دوره‌های خشکسالی، نرمال و ترسالی به صورت متناوب در سال‌های مختلف بوده (شکل ۶)، در آبخوان این دشت دوره‌های ترسالی، نرمال و خشکسالی در سال‌های متوالی رخ داده است (شکل ۷). در آبخوان این دشت، شرایط نرمال در ۱۲ سال آبی متوالی (۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹) با متوسط $GRI_{avg} = -0.19$ حاکم بود. متوسط سطح آب زیرزمینی در این دوره (۱۱۸۶/۶۶ متر) $1/37$ متر کم‌تر از متوسط کل دوره (۱۱۸۷/۶ متر) بود. میزان کل افت سطح آب از ابتدا تا انتهای دوره فوق، $8/25$ متر بود (به طور متوسط ۶۹ سانتی‌متر در سال) که ۵۳ درصد افت کل دوره ۲۳ بود. قدرت و شدت GRI در ۶ سال دوره ترسالی (۱۳۷۰ تا ۱۳۷۶) به ترتیب $GRI_{sum} = 8/43$ و $GRI_{avg} = 1/20$ و متوسط سطح آب $6/73$ متر بیش‌تر از متوسط سطح آب کل دوره بود. بارش‌های مناسب در سال‌های فوق و عدم توسعه برداشت از آبخوان جهت مصارف مختلف می‌تواند از دلایل رخداد شرایط فوق باشد. با تشدید توسعه بهره‌برداری از آبخوان دشت، شدت افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های اخیر افزایش یافته است به طوری که حتی وقوع بارش‌های خوب سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ نیز نتوانسته از افت سطح جلوگیری نموده و جبران افت‌های صورت گرفته در آبخوان گردد. بر این اساس نیز شدیدترین خشکسالی آب زیرزمینی در سال‌های آخر دوره مورد بررسی (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲) مشاهده شد. قدرت و شدت خشکسالی ۴ سال آخر (۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳) به ترتیب $GRI_{sum} = -6/10$ و $GRI_{avg} = -1/53$ به دست آمد. سطح آب زیرزمینی در ۴ سال اخیر به طور متوسط $1/2$ متر افت داشت

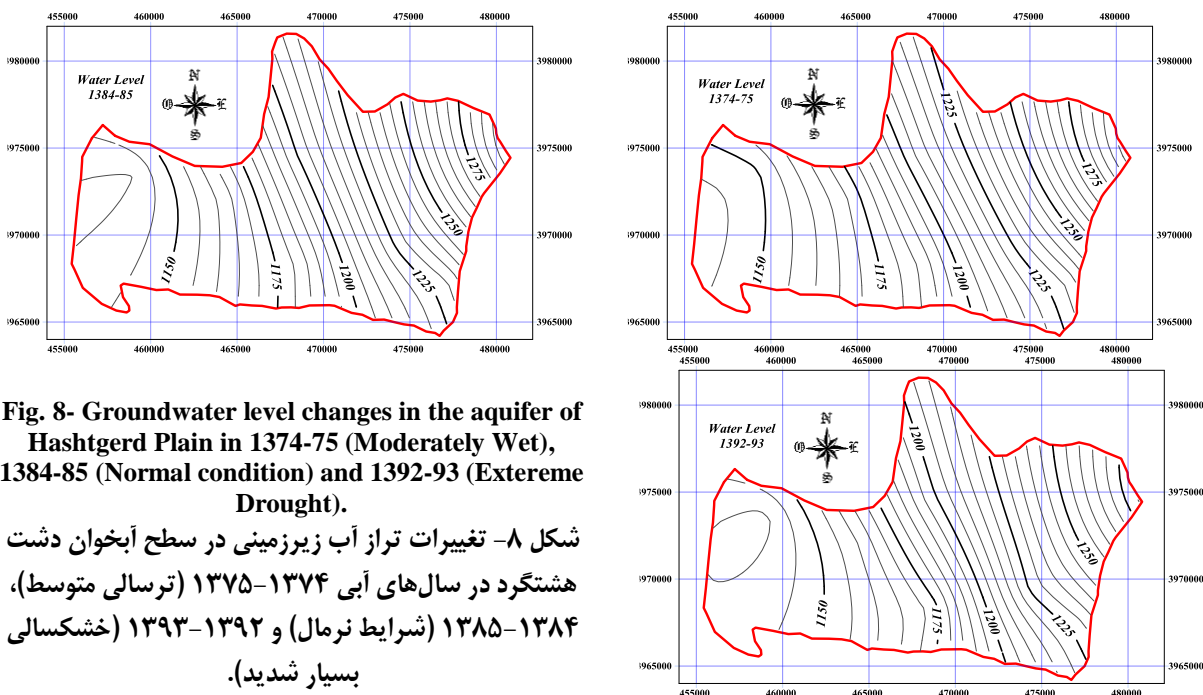


Fig. 8- Groundwater level changes in the aquifer of Hashtgerd Plain in 1374-75 (Moderately Wet), 1384-85 (Normal condition) and 1392-93 (Extreme Drought).

شکل ۸- تغییرات تراز آب زیرزمینی در سطح آبخوان دشت هشتگرد در سال‌های آبی ۱۳۷۴-۱۳۷۵ (ترسالی متوسط)، ۱۳۸۴-۱۳۸۵ (شرایط نرمال) و ۱۳۹۲-۱۳۹۳ (خشکسالی بسیار شدید).

بر اساس نتایج جدول ۳، در سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۳ که به دلیل وقوع شرایط شرایط خشکسالی بسیار شدید، آبخوان کمترین تراز سطح آب را در دوره مورد بررسی داشت، با افزایش برداشت آب از آبخوان در طول مدت خرداد تا آذر، کاهش کیفیت آب آبخوان در گستره آن تشدید یافت به طوری که در آذر ماه بر اساس طبقه‌بندی ویل کاکس در ۱۰۰ درصد مناطق آبخوان، کیفیت آب زیرزمینی برای آبیاری نامناسب بود. استفاده از آب در این شرایط برای آبیاری علاوه بر کاهش عملکرد محصول کشت شده، می‌تواند باعث پراکندگی خاکدانه‌ها و در نتیجه وارد آوردن خسارت به خاک مزارع گردد که این مسأله موجب از بین رفتن پایداری کشاورزی در دشت هشتگرد در طولانی مدت گردد. یافته‌های (Asadzadeh et al. (2016 نشان داد در دوره خشک حدود ۷۰ درصد دشت قروه و چهاردولی در طبقه C_2S_1 (دارای کیفیت خوب برای کشاورزی) قرار داشت و بقیه مناطق دشت در دو طبقه C_3S_1 و C_4S_1 (به ترتیب دارای کیفیت متوسط و نامناسب) بود. در دوره ترسالی به دلیل افزایش کیفیت آب زیرزمینی دشت، هیچ منطقه‌ای از دشت در کلاس C_4S_1 نبود و کیفیت آب کل آبخوان در دو طبقه C_2S_1 و C_3S_1 قرار گرفت. (Jahanshahi et al. (2016 جهت پهنه‌بندی کیفیت آب آبخوان دشت بابک-کرمان با کمک نمودار ویل کاکس از آمار سال ۹۱-۱۳۹۰ که میزان بارندگی ۲۳/۳ درصد کم‌تر از میانگین بلندمدت سالانه دشت بود استفاده کردند.

به عنوان نمونه وجود تأخیر زمانی بین مقادیر بارش و سطح آب زیرزمینی به وضوح در شکل ۹ قابل مشاهده است. میزان تأخیر زمانی بین خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی در دشت داراب فارس، ۵ ماه (Khorani and Khajeh, 2014)، در دشت شده و قره‌بلاغ، ۲۴ تا ۴۸ ماه (Shekari et al., 2017) و در دشت تبریز با ضریب همبستگی ۰/۲۵۸ و سطح معنی‌داری ۹۹ درصد، ۲ ماه (Karami, 2012) حاصل گشت.

مقادیر پهنه‌های محاسبه شده برای هر طبقه دیاگرام ویل کاکس در ۳ سال آبی انتخاب شده برای بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت هشتگرد در دو مقطع زمانی خرداد و آذرماه در جدول ۳ نشان داده شده است. هم چنین به عنوان نمونه، پهنه‌های کیفیت آب آبخوان دشت هشتگرد بر اساس نمودار ویل کاکس در سال آبی ۱۳۸۴-۱۳۸۵ با شرایط نرمال در شکل ۱۰ نشان داده است. بر اساس نتایج، در هیچ کدام از سال‌های آبی مورد بررسی، کیفیت آب از نظر کشاورزی در هر دو ماه خرداد و آذر در طبقه خیلی خوب (C_1S_1) قرار نگرفت. در طول هر سال بدون در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی سال، به دلیل افزایش برداشت آب از آبخوان جهت مصرف در کشاورزی از خرداد تا آذر، کیفیت آب زیرزمینی نیز کاهش یافت. رخداد خشکسالی و در نتیجه کاهش تغذیه آبخوان از طریق بارش، کاهش کیفیت آب را تشدید داد (جدول ۳).

Table 2- Correlation coefficient and significant level between rainfall amounts and groundwater levels in Hashtgerd Plain

جدول ۲- ضریب همبستگی و سطح معنی‌داری بین مقادیر بارش و سطح آب زیرزمینی در دشت هشتگرد

Time series	Lag-Time (Month)											
	No lag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1-Month	-0.086	-0.039	0.015	0.048	0.078	0.081	0.076	0.036	0.027	0.086	0.126*	0.137*
3-Month	-0.086	-0.040	0.010	0.046	0.073	0.076	0.060	0.007	0.040	0.089	0.127*	0.140*
6-Month	-0.032	0.002	0.040	0.071	0.085	0.081	0.065	0.035	-0.021	0.034	0.157*	0.165*
12-Month	0.027	0.033	0.038	0.029	0.030	0.039	0.024	-0.008	-0.045	0.071	0.095	0.123*

*Significant correlation at 95% level.

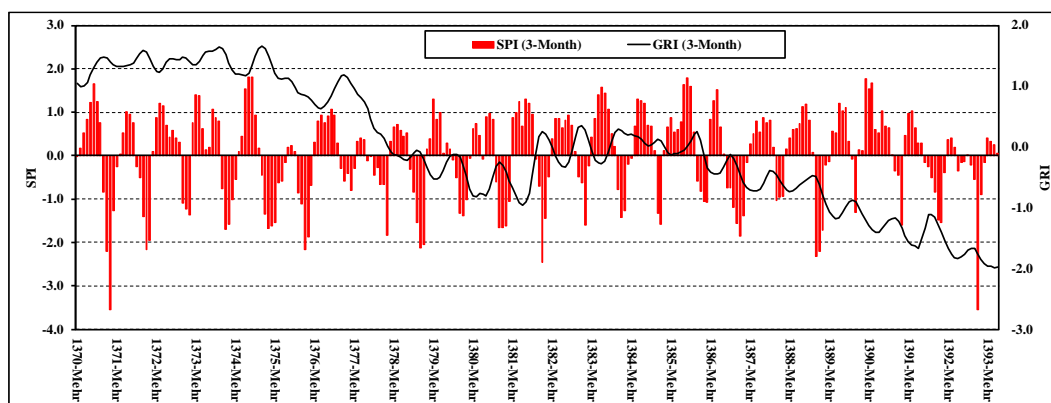


Fig. 9- Changes of SPI and GRI values for 3-month time series in Hashtgerd Plain

شکل ۹- تغییرات مقادیر SPI و GRI سری زمانی ۳ ماهه در دشت هشتگرد

Table 3- Area percentage of groundwater quality categories on the Wilcox digram in June and December of water years with different conditions in Hashtgerd Plain

جدول ۳- درصد مساحت طبقه‌های کیفی آب زیرزمینی بر اساس نمودار ویل کاکس در خرداد و آذرماه در سال‌های آبی با شرایط متفاوت در دشت هشتگرد

Water Year	Excellent				Good				Doubtful				Unsiutable				Sum
	C ₁ S ₁	C ₂ S ₁	C ₃ S ₁	C ₄ S ₁	C ₁ S ₂	C ₂ S ₂	C ₃ S ₂	C ₄ S ₂	C ₁ S ₃	C ₂ S ₃	C ₃ S ₃	C ₄ S ₃	C ₁ S ₄	C ₂ S ₄	C ₃ S ₄	C ₄ S ₄	
June																	
1374-75	0	0	0	25	0	0	46	26	3	0	0	0	0	0	0	0	100
1384-85	0	0	0	21	0	0	29	0	0	33	16	0	0	0	0	0	100
1392-93	0	0	0	0	0	0	16	0	0	39	45	0	0	0	0	0	100
December																	
1374-75	0	0	0	12	0	0	36	0	0	44	8	0	0	0	0	0	100
1384-85	0	0	0	9	0	0	38	0	0	36	17	0	0	0	0	0	100
1392-93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96	4	0	0	0	0	0	100

1374-75: Moderately Wet

1384-85: Normal

1392-93: Extereme Drought

بررسی، در هر دو ماه خرداد و آبان، آب زیرزمینی دشت هشتگرد در تمام مناطق آن، پتانسیل تشکیل رسوبات کربنات کلسیم را داشت. به منظور بررسی دقیق‌تر مسئله اخیر و نیز تأثیر تغییر کمیت آب زیرزمینی بر مقدار شاخص LSI، محدوده مقادیر مثبت شاخص LSI به بازه‌های ۰/۵ به ۰/۵ تفکیک شد (جدول ۴). مشاهده می‌گردد در خردادماه نسبت به ماه آذر، سطح منطقه آبخوان با پتانسیل اندک تشکیل رسوبات کربنات کلسیم بیشتر است. هم چنین با کاهش حجم آب آبخوان به دلیل شرایط خشکسالی در سال‌های متفاوت، پتانسیل تشکیل رسوبات کربنات کلسیم تشدید شده است. استفاده از آب آبخوان در این شرایط موجب گرفتگی قطره‌چکان‌های آبیاری، تشکیل رسوب در ادوات آبیاری و کاهش راندمان سیستم آبیاری می‌گردد.

پس از میان‌یابی با مناسب‌ترین روش، کیفیت آب ۳۰ حلقه چاه دشت دارای وضعیت نامناسب برای کشاورزی (C₄S₃, C₄S₄, C₂S₂ و C₄S₂)، ۵ حلقه دارای وضعیت خوب (C₂S₁) و ۷ حلقه چاه دارای وضعیت مناسب (C₃S₂ و C₃S₁) بود.

نتایج پهنه‌بندی سطح آبخوان دشت هشتگرد بر اساس شاخص LSI در ماه‌های خرداد و آذر در سال‌های آبی مختلف در جدول ۴ و پهنه‌های کیفیت آب آبخوان دشت هشتگرد بر اساس شاخص اشباع لانژیلر در سال آبی ۱۳۷۴-۱۳۷۵ با شرایط ترسالی متوسط در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۴، در سال‌های آبی مورد

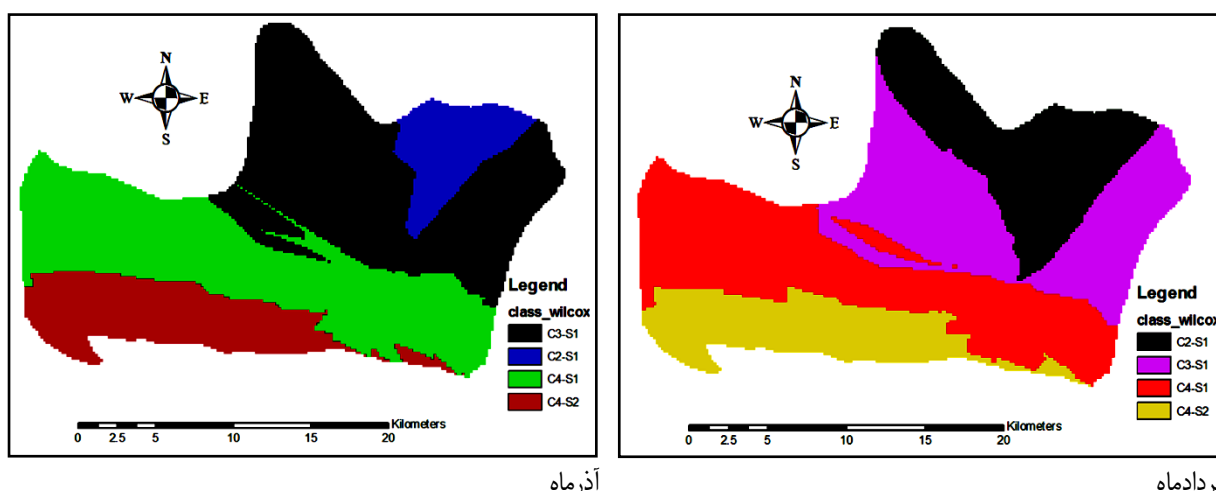


Fig. 10- Water quality zoning in Hashtgerd Plain Aquifer on Wilcox Diagram in 1384-1385 with normal conditions

شکل ۱۰- پهنه‌بندی کیفی آب آبخوان دشت هشتگرد بر اساس نمودار ویل کاکس در سال آبی ۱۳۸۴-۱۳۸۵ با شرایط نرمال

Table 4- Area percentage of LSI amounts in June and December of water years with different conditions in Hashtgerd Plain

جدول ۴- درصد مساحت مقادیر LSI در خرداد و آذرماه سال‌های آبی با شرایط متفاوت در دشت هشتگرد

Water Year	-1.0 ~ 0	0 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	Sum
June						
1374-75	0	1	99	0	0	100
1384-85	0	0	84	16	0	100
1392-93	0	0	23	77	0	100
December						
1374-75	0	0	67	33	0	100
1384-85	0	0	52	48	0	100
1392-93	0	0	10	73	17	100
1374-75: Moderately Wet		1384-85: Normal		1392-93: Extereme Drought		

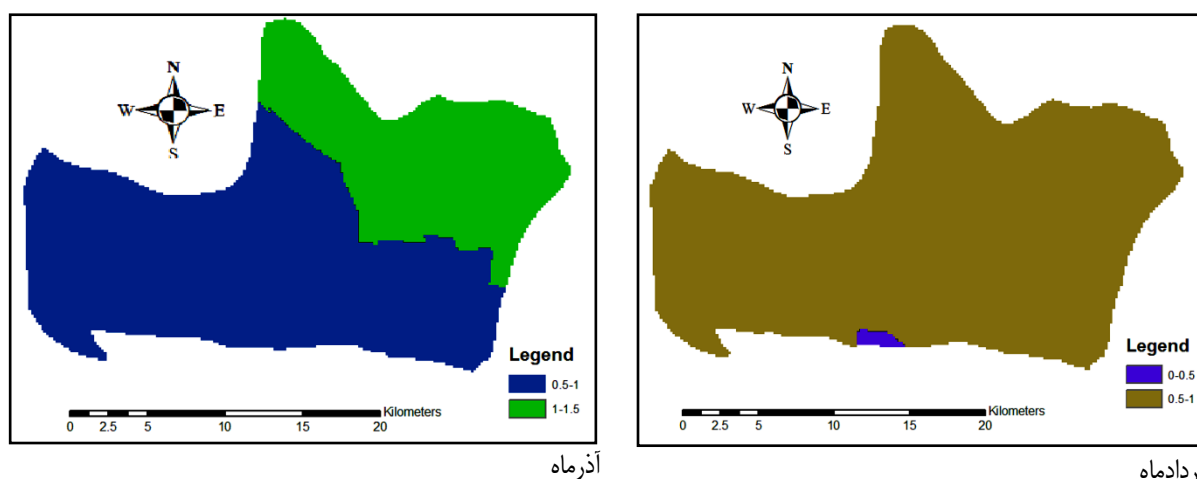


Fig. 11- Water quality zoning in Hashtgerd Plain Aquifer on Largelier Saturation Index (LSI) in 1384-1385 with normal conditions.

شکل ۱۱- پهنه‌بندی کیفی آب آبخوان دشت هشتگرد بر اساس شاخص اشباع لانژلیئر در سال آبی ۱۳۷۴-۱۳۷۵ با شرایط ترسالی متوسط.

خشکسالی بر سطح آب زیرزمینی و تغییر حجم آب زیرزمینی، کیفیت آب آبخوان نیز تغییر یافت. هم چنین به دلیل برداشت آب در طول دوره کشت و کار، کیفیت آب در آذرماه پائین تر از خرداد ماه بود. بر اساس نمودار ویل کاکس، در خرداد ماه ۱۳۷۴-۱۳۷۵ با شرایط ترسالی متوسط، در هیچ سطحی از آبخوان کیفیت آب از نظر استفاده در کشاورزی نامناسب نبود در حالی که در آذرماه همان سال، ۵۲ درصد دارای کیفیت نامناسب بود. در سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۳ (شرایط خشکسالی بسیار شدید)، کیفیت آب ۱۶ درصد از سطح آبخوان مناسب بود در حالی که در آذرماه ۱۰۰ درصد سطح آبخوان دارای کیفیت نامناسب بود. بر اساس شاخص LSI، در کلیه سال‌های مورد بررسی و در هر دو مقطع زمانی خرداد و آذرماه، آب ۱۰۰ درصد سطح آبخوان دشت هشتگرد دارای پتانسیل تشکیل رسوبات کربنات کلسیم بود.

۴- نتیجه‌گیری کلی

نتایج بررسی شرایط آب و هوایی دشت هشتگرد با شاخص SPI در طول دوره ۳۰ سال آبی (۱۳۹۳-۱۳۶۴) نشان داد در ۲۲ سال آبی، شرایط آب و هوایی منطقه نرمال، در ۵ سال آبی خشکسالی با شدت متفاوت و در ۳ سال آبی ترسالی با شدت متفاوت بود. شدیدترین خشکسالی به وقوع پیوسته در منطقه در سال آبی ۱۳۷۵-۱۳۷۶ با $SPI = -2/81$ (خشکسالی بسیار شدید) و میزان بارش ۹۰/۴ میلی‌متر بود. بر اساس شاخص GRI، در ۱۳ سال از ۲۳ سال آبی (۱۳۹۲-۱۳۷۰) آبخوان دارای شرایط نرمال، ۴ سال خشکسالی (متوسط و شدید) و ۶ سال ترسالی (متوسط و شدید) بود. در دشت هشتگرد بین سطح آب زیرزمینی و بارش، همبستگی معنی‌دار با ۱۰ ماه تأخیر برای دوره زمانی ۱، ۳ و ۶ ماه و ۱۱ ماه تأخیر برای دوره زمانی ۱۲ ماه وجود داشت. در دشت هشتگرد، با حاکم شدن شرایط متفاوت از نظر

- Plain Aquife). *Water and Soil Science*, 24(2):183-197 (In Persian)
- Karami F (2012) Evaluation of meteorological drought effects in the reduction of groundwater table (Case study: Tabriz Plain). *Journal of Geography and Planning* 16(37):111-131 (In Persian)
- Khajeh M, Bazrafshan O, Vagharfard H, Esmaeelpoor Y (2015) An investigation on the quantity and quality of groundwater in the Parishan Plain. *The Journal of Spatial Planning* 18(4):71-96 (In Persian)
- Khorani A, Khajeh M (2014) An investigation on the coincidence between trend of drought and groundwater levels decline (A Case Study: Plain of Darab). *The Journal of Spatial Planning* 18(2):57-79 (In Persian)
- Lloyd-Hughes B, Saunders MA (2002) A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22:1571-1592
- Mahmoudi P, Tavousi T, Shahozaei AR (2015) Drought and its effects on groundwater resources quality in Sistan and Baluchestan Province. *Journal of Water Research in Agriculture* 29(1):21-35
- Malekian A, Mirdashtvan M (2016) Groundwater quality study for agricultural purposes by geostatistical analysis (Case study: Hashtgerd Plain, Alborz Province). *Journal of Range and Watershed Management* 68(4):809-820 (In Persian)
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceeding 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Massachusetts, USA, 179-184
- Mofidipoor N, Sheikh V, Ownegh M, Sadodi V (2012) The analysis of relationship between meteorological and hydrological droughts in Atrak. *Watershed Journal of Watershed Management Research* 3(5):16-25 (In Persian)
- Mohammadi Ghalehi M, Ebrahimi K, Araghinejad Sh (2011) Groundwater quantity and quality evaluation: a case study for Saveh and Arak aquifers. *Water and Soil Science* 21(2):93-108 (In Persian)
- Mosaedi A, Ghabaei Sough M (2011) Modification of standardized precipitation index (SPI) based on relevant probability distribution function. *Journal of Water and Soil* 25(5): 1206-1216 (In Persian)
- Panda DK, Mishra A, Jena SK, James BK, Kumar A (2007) The influence of drought and anthropogenic effects on groundwater levels in Orissa, India. *Journal of Hydrology* 343:140-153
- Shekari MR, Sadatinejad SJ, Vali AA (2017) Relationship between meteorological and
- Abasi F, Farzadmehr J, Chapi K, Bashiri M, Azarakhshi M (2017) Spatial and temporal variations of groundwater quality parameters in Qorveh-Dehgolan Plain and its relationship with drought. *Hydrogeology* 1(2):11-23 (In Persian)
- Ahmadi Akhoorme M, Nohegar A, Soleimani Motlagh M, Taie Semirom M (2015) Groundwater drought investigating using SWI and GRI indices (Case Study: Marvdasht Kharameh Aquifer). *Irrigation and Water Engineering* 6(21):105-118 (In Persian)
- Alizadeh A (2011) *Principales of applied hydrology*. Emam Reza University Press, 33th Reprint, Mash'had, 940 p (In Persian)
- Alizadeh A (2013) *Soil, water, plant relationship*. Emam Reza University Press, 14th Reprint, Mash'had, 360 p (In Persian)
- Asadzadeh F, Kaki M, Shakiba S, Raei B (2016) Impact of drought on groundwater quality and groundwater level in Qorveh-Chardoli Plain. *Iran-Water Resources Research* 12(3):153-165 (In Persian)
- Chezgi J, Soheili A, Haiatzadeh M (2013) Investigating the effect of drought on groundwater using SPI and GRI indices in Torq region. *Ninth National Seminar on Watershed Management*, 30 Oct, Yazd University, 1-6 (In Persian)
- Chitsazan M, Mirzaii SY, Mohammadi Behzad HR, Shaban M, Ghaffari HR, Mousavi SF (2009) The effect of drought on the quantity and quality of groundwater resources, case study: Khouiss Plain in the North of Khuzestan. *The Second National Seminar on Drought Effects/Management*, 15-16 May, Isfahan, 1-7 (In Persian)
- Choubin B, Malekian A, Sajedi Hosseini F (2016) Lag-time and effect of meteorological drought on the groundwater level. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 10(43):35-43 (In Persian)
- Eslamian SS, Nasri M, Rahimi N (2009) Wet and dry periods and its effects on water resources changes in Buin Plain watershed. *Geography and Environmental Planning* 20(33):75-90 (In Persian)
- Faryabi M, Mozaffarizade J (2017) Hydrogeological drought management index (HDMI) as a tool for groundwater resource management under drought conditions, Case study: Dayyer-Abdan district, Boushehr province. *Iranian Journal of Ecohydrology* 4(3):737-747 (In Persian)
- Jahanshahi A, Rouhi Moghaddam E, Dehviri A (2014) Investigating groundwater quality parameters using GIS and Geostatistics (Case Study: Shahr-Babak

- Wilhite DA, Glantz MH (1985) Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International* 10(3):111-120
- Zare Abianeh H, Yazdany V, Azhdary Kh (2009) Comparative study of four meteorological drought index based on relative yield of rain fed wheat in Hamedan Provinc. *Physical Geography Research Quarterly* 69:35-49 (In Persian)
- Zeinali B, Faridpour M, Asghari Saraskanroud A (2017) Investigate the effect meteorological and hydrological drought on groundwater quantity and quality (Case study: Marand Plain). *Journal of Watershed Management Research* 4(14):177-187 (In Persian)
- hydrogeological drought in an arid area: (a case study of Sheshdeh and Gharebolagh plains). *Desert Ecosystem Engineering Journal* 6(14):79-90 (In Persian)
- Shemshaki A, Mohammadi Y, Bolourchi MJ (2011) Investigation on confined aquifer and its role on subsidence occurrence in Hashtgerd Plain. *Geosciences Scientific Quarterly Journal* 20(79):137-142 (In Persian)
- Tsakiris G, Pangalou D, Vangelis H (2007) Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resource Management* 21(5):821-833