

Monitoring and Assessing the Characteristics of Groundwater Drought in Aquifers with Negative Balance

H. Sanginabadi¹, B. Saghafian^{2*}, and M. Delavar³

Abstract

Although, many studies have been reported on meteorological drought monitoring and analysis, similar studies on groundwater drought in regions with high abstractions are lacking. In this paper, the effects of groundwater extraction from aquifer were investigated and groundwater drought analysis was performed using the naturalized groundwater level time series in Qazvin plain. For this purpose, MODFLOW-ANN coupled model were used to obtain the time series of naturalized groundwater level over a 50- and a 3-year period. Then, the groundwater drought was monitored by means of the SGI and was compared with the SPI and SHDI indices. Also, drought characteristics were calculated during the 50 year period and the regions with higher drought hazard were determined. Results showed that abstraction caused severe negative trend in the groundwater level. Also the aquifer was in long duration dry condition in about 47% of the time. Groundwater level changes have a 9 months delay to changes in precipitation and surface flow rivers. Groundwater drought is more strongly correlated with hydrological drought than with meteorological drought. Also, Boeinzahra county has a higher and Qazvin and Alborz have a lower hazard than other regions.

Keywords: Groundwater Abstraction Effects, Drought Hazard, Naturalized Level, SGI Index.

Received: April 4, 2019

Accepted: June 13, 2019

پایش و ارزیابی ویژگی‌های خشکسالی آب زیرزمینی در آبخوان‌های با بیلان منفی

حمید سنگین‌آبادی^۱، بهرام تقفیان^{۲*} و مجید دلاور^۳

چکیده

اگر چه تحقیقاتی در خصوص پایش و تحلیل خشکسالی هواشناسی صورت گرفته، لیکن پژوهش‌های انجام شده در زمینه خشکسالی آب زیرزمینی در مناطق با برداشت زیاد محدود است. در این تحقیق، ضمن بررسی اثرات برداشت از آبخوان، خشکسالی آب زیرزمینی در دشت قزوین بر مبنای تراز طبیعی آب زیرزمینی تحلیل می‌گردد. تراز آب زیرزمینی با استفاده از مدل ترکیبی MODFLOW-ANN در طول یک دوره ۵۰ ساله و یک دوره سه ساله طبیعی‌سازی شد. خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص خشکسالی آب زیرزمینی SGI پایش شده و با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و هیدرولوژیکی SHDI مقایسه گردید. همچنین، ویژگی خشکسالی‌های به وقوع پیوسته در دوره مذکور محاسبه شده و مناطق با خطر بیشتر مشخص شدند. نتایج حاکی از افت شدید تراز آب ناشی از برداشت از آب زیرزمینی است. همچنین دشت قزوین در ۴۷ درصد مواقع در شرایط خشکسالی آب زیرزمینی با تداوم زیاد قرار دارد. تغییر در تراز آب زیرزمینی دارای تأخیر زمانی ۹ ماهه با تغییرات بارش و جریان آب سطحی است. همچنین، همبستگی خشکسالی آب زیرزمینی با خشکسالی هیدرولوژیکی بیشتر از همبستگی با خشکسالی هواشناسی است. شهرستان بویین‌زهرا دارای خطر خشکسالی بیشتر و قزوین و البرز خطر خشکسالی کمتری نسبت به سایر مناطق دارند.

کلمات کلیدی: اثرات برداشت از آب زیرزمینی، خطر خشکسالی، تراز طبیعی، شاخص SGI.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۳/۲۳

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: B.saghafian@gmail.com

3- Assistant Professor, Water Resources Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران- آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی عمران- آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

است. شاخص SPI برای ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی نیز استفاده شده است، با این تفاوت که بدلیل آنکه خشکسالی هواشناسی با یک تأخیر زمانی روی آب زیرزمینی تأثیرگذار است، لذا از SPI درازمدت (مثلاً SPI ۲۴ ماهه) برای ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی استفاده می‌شود. بعنوان مثال، Younesi et al. (2009) رابطه SPI24 و تراز آب زیرزمینی را در دشت قزوین بررسی نمودند. همچنین، Shakiba et al. (2010) با استفاده از شاخص SPI، خشکسالی و تأثیر آن بر منابع آب زیرزمینی در شرق استان کرمانشاه را و با استفاده از شاخص ذکر شده تأثیر خشکسالی را بر افت آب زیرزمینی ارزیابی نمودند. نتایج کار ایشان نشان داد که خشکسالی‌های بوجود آمده نقش بسزایی در افت سطح آب زیرزمینی داشته و شاخص SPI شاخص مناسبی جهت بررسی اثرات خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی بوده است. در تحقیق دیگری، Leelaruban and Padmanabha (2015) ارتباط بین خشکسالی و آب زیرزمینی را با استفاده از شاخص SPI و پارامترهای هواشناسی بررسی نمودند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که شاخص خشکسالی مذکور دارای ارتباط مناسب‌تری با آب زیرزمینی نسبت به پارامترهای هواشناسی مانند بارش و دما هستند.

یکی دیگر از شاخص‌هایی که برای ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی استفاده می‌شود شاخص‌های متناظر با تغییرات سطح آب زیرزمینی است. بر این اساس، چندین شاخص برای خشکسالی تعریف شده است که از آن جمله می‌توان به شاخص سطح آب استاندارد شده^۲ (SWI) اشاره نمود. در تحقیقی که توسط Mohammadi and Moradi (2010) انجام شد، از شاخص سطح آب استاندارد شده استفاده شده و پهنه‌بندی خشکسالی آب زیرزمینی در حوزه کویر میقان انجام گرفت. شاخص ذکر شده به عنوان مقیاسی جهت تعیین میزان کاهش تغذیه در آب‌های زیرزمینی قابل استفاده است. در این تحقیق، از داده‌های سطح ایستابی ۲۰ چاه پیژومتری در بازه زمانی ۲۰ ساله استفاده شده است. در تحقیق مذکور، نقشه‌های پهنه‌بندی ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه در دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۵۰ ساله ارائه شده و مناطق با خطر مختلف مشخص شده است. از جمله تحقیقات دیگری که برای برآورد خشکسالی آب زیرزمینی استفاده شده می‌توان به تحقیقی که از سوی Li and Rodell (2014) انجام شد اشاره نمود. در این تحقیق، از سه شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI)، شاخص خشکسالی آب زیرزمینی^۳ (GWI) و شاخص خشکسالی رطوبت^۴ (SMI) برای پایش خشکسالی زیرزمینی استفاده شده است. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که در مناطق بررسی شده، ارتباط مناسبی بین شاخص SMI با SPI در دوره زمانی بالا وجود دارد. همچنین، یکی دیگر از شاخص‌هایی که از سطح آب زیرزمینی برای تحلیل خشکسالی استفاده می‌شود شاخص

خشکسالی آب زیرزمینی به عنوان یک پدیده طبیعی دارای پیامدهای منفی اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی زیادی است. پایش منظم خشکسالی آب زیرزمینی بدلیل وابستگی انسان به این منبع آبی اهمیت شایانی دارد که در این خصوص، معیارهایی توسط محققان مربوطه ارائه گردیده است. بعنوان نمونه، Bloomfield et al. (2003) خشکسالی آب زیرزمینی را بر مبنای کاهش سطح آب زیرزمینی نسبت به یک تراز معین و با استفاده از مفهوم دوره بازگشت خشکسالی تعریف نمودند. همچنین، Peters et al. (2005) از معیار کمبود جریان و تغذیه آب زیرزمینی از یک آستانه معین به عنوان شاخص‌هایی در پایش خشکسالی آب زیرزمینی استفاده نمودند. Peters et al. (2006) توزیع مکانی و پراکندگی خشکسالی در آب زیرزمینی را با استفاده از شاخص‌های افت سطح آب زیرزمینی، تغذیه آب زیرزمینی و جریان آب زیرزمینی انجام دادند. آنها برای محاسبه تغذیه آب زیرزمینی از مدل SWAT و برای محاسبه تغییرات تراز آب زیرزمینی و جریان آب زیرزمینی از مدل MODFLOW استفاده کردند، همچنین، معیار اصلی تعیین دوره‌های خشکسالی، کمبود هر کدام از شاخص‌های مذکور نسبت به یک آستانه مشخص است، سپس پهنه‌های خشکسالی در دوره‌های خشکسالی گذشته به ازای هر یک از سه شاخص مذکور محاسبه و با هم مقایسه شده است. در تحقیقی که توسط Shahid and Hazarika (2009) انجام شد، کمبود آب زیرزمینی، خشکسالی و ارتباط سطح آب زیرزمینی با شاخص‌های هواشناسی و خشکسالی هواشناسی در سه منطقه شمال غربی بنگلادش بررسی شد. در این تحقیق، از روش کمبود تجمعی از یک تراز مبنای آب زیرزمینی برای تعیین شدت خشکسالی استفاده شده است. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که سالیانه کمبود آب زیرزمینی در ۴۲ درصد منطقه یک امر طبیعی به حساب می‌آید. همچنین این تحقیق نشان داد که برداشت از آب زیرزمینی در فصول خشک و خشکسالی‌های چند سال اخیر از عوامل اصلی افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های اخیر بوده است.

یکی از مهمترین شاخص‌ها در پایش خشکسالی هواشناسی، شاخص بارندگی استاندارد شده^۱ (SPI) است. برای محاسبه این شاخص، در ابتدا توزیع آماری مناسب که معمولاً توزیع گاما است بر داده‌های آماری بلند مدت بارندگی‌ها برآزش شده، سپس تابع توزیع تجمعی با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌گردد. مقادیر مثبت SPI نشان‌دهنده مقادیر بارش بیشتر از متوسط و مقادیر منفی بیان‌کننده شرایط خشکسالی است. پیشنهاد استفاده از شاخص SPI به عنوان شاخص اصلی پایش خشکسالی بدلیل سادگی، تفسیرپذیری در تغییرات مکانی و احتمالاتی بودن را (Guttman 1998) ارائه داده

سطح آب زیرزمینی استاندارد شده^۵ (SGI) است. به عنوان نمونه، Bloomfield et al. (2015) با استفاده از شاخص مذکور آنالیز محلی خشکسالی آب زیرزمینی را در یک منطقه در شرق انگلستان انجام دادند. در این تحقیق، ابتدا شاخص سطح آب زیرزمینی استاندارد شده با استفاده از آمار ۷۴ چاه مشاهده‌ای تعیین شده، سپس با استفاده از روش تحلیل کلاس‌بندی (غیر سلسله مراتبی) و با استفاده از قضاوت کارشناسی منطقه به شش کلاس تقسیم شده و ویژگی‌های خشکسالی در سه کلاس (محدوده) آنها بررسی شده است. همچنین در این تحقیق از شاخص SPI نیز در ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی استفاده و نتایج با فاکتور سطح آب زیرزمینی استاندارد شده مقایسه شده است. نتایج نشان داد که روش کلاس‌بندی با استفاده از فاکتور SGI روش توانمندی در تحلیل خشکسالی آب زیرزمینی است. در مطالعات دیگری نیز شاخص‌های SGI و SPI در پایش خشکسالی آب زیرزمینی استفاده شده است (Kumar et al., 2015). در تحقیق دیگری که توسط Bayat Varkeshi et al. (2018) انجام شد، خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص آب‌های زیرزمینی^۶ (GRI) پایش شده و اثر خشکسالی هواشناسی بر آب زیرزمینی بر مبنای همبستگی بین شاخص ذکر شده با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی استاندارد شده (SPI)، درصد نرمال^۷ (PNI) و دهک‌ها^۸ (DI) بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که وقوع هر سه شاخص خشکسالی هواشناسی با تأخیر ۹ ماهه بیشترین تأثیر را در شاخص آب زیرزمینی منطقه تحقیق داشته است.

جمع‌بندی منابع موجود نشان می‌دهد که در تحلیل‌های صورت گرفته در زمینه خشکسالی آب زیرزمینی، غالباً مناطق بدون برداشت آب یا با برداشت مختصر از منابع آب زیرزمینی تحلیل گردیده است. در این گونه تحقیقات با فرض آنکه برداشت آب زیرزمینی تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی تراز آب زیرزمینی نداشته، از تراز موجود آب زیرزمینی ثبت شده در پیرومترهای مشاهداتی منطقه به منظور تحلیل خشکسالی استفاده شده است (Bloomfield et al., 2015). همچنین در پاره‌ای مواقع از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی مانند SPI با میانگین متحرک ۲۴ ماهه برای پایش خشکسالی آب زیرزمینی استفاده می‌شود و بررسی ارتباط خشکسالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی و تعیین امکان پایش خشکسالی هواشناسی بر اساس خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی نیازمند مطالعات گسترده‌تر است. علاوه بر آن، در اکثر مطالعات صورت گرفته تنها پایش خشکسالی انجام شده و ویژگی‌های خشکسالی آب زیرزمینی و خطر آن به اندازه کافی بررسی نشده است.

به طور خلاصه، کمبود تحقیق‌های صورت گرفته در زمینه پایش خشکسالی آب زیرزمینی در آبخوان‌های با بیلان منفی، نبود اطلاعات کافی از ویژگی‌های خشکسالی آب زیرزمینی در این آبخوان‌ها و تحلیل و پهنه‌بندی خطرات خشکسالی از جمله خلأهای تحقیقاتی موجود است. لذا تحقیق حاضر به منظور رفع خلأهای تحقیقاتی مذکور انجام گردیده و ضمن تحلیل اثرات برداشت آب زیرزمینی، پایش خشکسالی آب زیرزمینی در آبخوان با بیلان منفی با شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی، خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی انجام شده و ارتباط بین آنها بررسی می‌شود. همچنین، ویژگی‌های خشکسالی آب زیرزمینی در این گونه آبخوان‌ها تحلیل شده و خطر خشکسالی در دشت پهنه‌بندی می‌گردد. بدین منظور، تراز طبیعی آب زیرزمینی در دشت قزوین در طول یک دوره آماری ۵۰ ساله (سال ۱۳۴۵ تا سال ۱۳۹۵) و یک دوره سه ساله (سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۳۹۳) با استفاده از مدل آب زیرزمینی MODFLOW و مدل جایگزین شبکه عصبی توصیه شده توسط Sanginabadi et al. (2019) محاسبه شده است. دوره سه ساله به منظور تحلیل اثرات برداشت در شرایط کنونی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، پایش خشکسالی براساس تراز طبیعی آب زیرزمینی در دوره ۵۰ ساله و با استفاده از شاخص خشکسالی آب زیرزمینی انجام و با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی مقایسه شده است. ویژگی‌های خشکسالی آب زیرزمینی در دوره زمانی ۵۰ ساله بررسی و مناطق موجود از لحاظ خطر خشکسالی با هم مقایسه شده‌اند. مطالعه متغیرهای مذکور در طول زمان و مقایسه آنها می‌تواند در ارائه راهکارهای مدیریتی به منظور کنترل و تسکین اثرات خشکسالی نقش قابل توجهی داشته باشد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مورد مطالعاتی

دشت قزوین بزرگترین دشت حوضه آبریز دریاچه نمک و یکی از دشت‌های مستعد کشور برای تولید محصولات کشاورزی است (Barikani et al., 2011). آبخوان دشت قزوین از سال ۱۳۴۲ مورد شناسایی و بهره‌برداری قرار گرفته است. با گذشت زمان، حفر چاه‌ها در دشت افزایش یافت بطوری که در سال ۱۳۹۳ حدود ۱۷۰۰ میلیون متر مکعب آب زیرزمینی از بیش از ۵۰۰۰ حلقه چاه محفوره در دشت قزوین استحصال می‌گردد (Maleki, 2014). از این مقدار، حدود ۸۹ درصد در بخش کشاورزی به مصرف می‌رسد. برداشت‌های بیش از حد مجاز از این آبخوان موجب پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در آن گردیده، به گونه‌ای که از سال ۱۳۴۳ تا کنون بطور میانگین ۳۴ متر سطح آب زیر زمینی در آبخوان دشت قزوین افت نموده است. افت سطح آب زیرزمینی در برخی از نقاط دشت مانند اراضی زیر تاکستان،

است که ترازهای طبیعی و موجود آب زیرزمینی محاسبه شوند. پروفیل موجود آب زیرزمینی بر اساس آمار پیژومتریهای موجود تعیین می‌گردد. همچنین برای تعیین تراز طبیعی آب زیرزمینی در شرایط عدم برداشت لازم است که برداشت آب زیرزمینی در طول زمان مساوی صفر فرض شده و تغییرات تراز آب زیرزمینی با وجود شرایط طبیعی بارش و جریان رودخانه و سایر شاخص‌های طبیعی هواشناسی و هیدرولوژیکی محاسبه گردد. برای این منظور لازم است که از مدل‌های آب زیرزمینی به منظور شبیه‌سازی آب زیرزمینی استفاده نمود. در این تحقیق از مدل ترکیبی MODFLOW و شبکه عصبی مصنوعی (MODFLOW- ANN) که توسط Sanginabadi et al. (2019) توسعه و سفارش شده استفاده گردید. مدل MODFLOW با استفاده از روش اجزاء محدود پروفیل سطح آب زیرزمینی و بیلان را محاسبه می‌نماید. مدل شبکه عصبی به عنوان یک مدل جایگزین بوده و به منظور کاهش بار محاسباتی از آن استفاده می‌شود (Heidari et al., 2016). مدل مذکور، بر اساس روابط ذاتی میان داده‌ها نگاشتی غیرخطی بین متغیرهای مستقل و وابسته برقرار می‌نماید.

در این تحقیق، پس از واسنجی مدل آب زیرزمینی MODFLOW و پس از اجرای آن به ازای شرایط مختلف بارش، برداشت از آب زیرزمینی، تبخیر تعرق و دبی رودخانه، از یک مدل شبکه عصبی به منظور محاسبه تراز آب زیرزمینی طبیعی در طول دوره آماری استفاده خواهد شد.

جنوب دشت و غرب آبیگ به بیش از ۱۰۰ متر می‌رسد (Abkhan Consulting Engineering Company, 2013; Maleki, 2014).

دشت قزوین با مساحت حدود ۴۷۳۷ کیلومترمربع در مختصات ۳۴۵۰۰۰ الی ۴۶۰۰۰۰ متر طول شرقی و ۳۹۴۵۰۰۰ الی ۴۰۲۵۰۰۰ متر عرض شمالی (زون ۳۹ در سیستم مختصات جهانی UTM) قرار گرفته است. این دشت در استان قزوین واقع شده و از سمت شمال به ارتفاعات البرز، از سمت غرب به استان البرز، از سمت جنوب به ارتفاعات جنوبی دشت قزوین و از سمت غرب به دشت ابهر محدود می‌گردد (شکل ۱). در این تحقیق، اطلاعات مورد نیاز هواشناسی شامل آمار بارش، دما و رطوبت نسبی و اطلاعات مورد نیاز هیدرولوژی شامل دبی ایستگاه‌های هیدرومتری و آمار مربوط به تراز آب چاه‌های پیژومتری دشت بوده که از سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۵ موجود بوده و از شرکت آب منطقه‌ای قزوین اخذ گردید. همچنین، مشخصات هیدرودینامیکی مورد نیاز خاک شامل ضریب هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال و مشخصات هندسی شامل داده‌های توپوگرافی و نقشه‌های هم عمق بستر نیز از شرکت مذکور تهیه گردید. آمار مربوط به محل‌های برداشت از آبخوان از طریق چاه و قنات و حجم برداشت در حال حاضر نیز از شرکت فوق اخذ گردید.

۲-۲- محاسبه تراز طبیعی آب زیرزمینی

با توجه به تعاریف مربوط به خشکسالی و کمبود آب زیرزمینی لازم

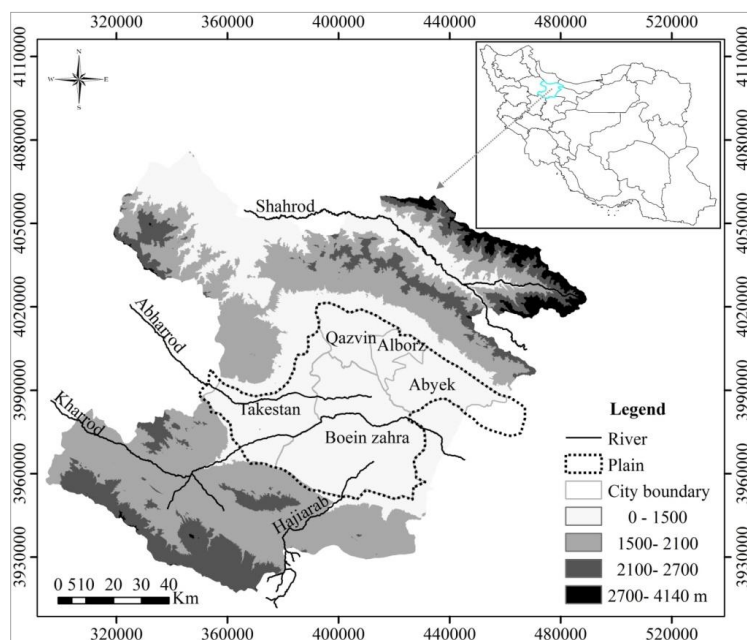


Fig. 1- Location of Qazvin plain overlaid on digital elevation model map

شکل ۱- محدوده دشت قزوین بر روی نقشه مدل رقومی ارتفاع

در این تحقیق از نرم‌افزار Easyfit به منظور برازش توزیع‌های احتمالاتی بر داده‌های تراز آب زیرزمینی و انتخاب توزیع مناسب استفاده گردیده و پس از محاسبه شاخص‌های توزیع تغییر شکل هم احتمال توزیع انتخابی به منظور محاسبه شاخص SGI استفاده خواهد شد. شاخص SHDI نیز مشابه شاخص SPI بوده و در صورتی که سری بارش با سری دبی جایگزین گردد، شاخص SHDI حاصل می‌شود (Dehghani et al., 2014).

۴-۲- ویژگی‌های خشکسالی

خشکسالی یک پدیده هیدرولوژیکی چند متغیره یا چندمشخصه است که غالباً با سه ویژگی تداوم، شدت^{۱۰} و اوج خشکسالی^{۱۱} قابل توصیف است. این متغیرها ذاتاً متغیرهای وابسته هستند (Chen et al., 2011). تداوم خشکسالی مدت زمانی است که شاخص پایش خشکسالی پایین‌تر از آستانه تعریف شده قرار دارد (Shiau, 2006). مقدار تجمعی شاخص خشکسالی در طول دوره خشکسالی شدت خشکسالی، حداقل شاخص خشکسالی در طول دوره خشکسالی به عنوان اوج خشکسالی و فاصله زمانی خشکسالی^{۱۲} به عنوان دوره زمانی بین دو خشکسالی متوالی تعریف می‌شود. تعیین دوره‌های خشکسالی مستلزم تعیین سطحی به منظور تمایز بین خشکسالی و ترسالی است. پیشنهاد (Shiau, 2006) در این زمینه عدد صفر است. به عبارت دیگر، شروع خشکسالی با منفی شدن شاخص‌ها شروع می‌شود و اتمام آن با مثبت شدن شاخص همراه است. شمایی از تعریف ویژگی‌های خشکسالی برای شاخص خشکسالی در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این تحقیق، ویژگی‌های خشکسالی آب زیرزمینی در یک دوره زمانی ۵۰ ساله در کل دشت و همچنین به تفکیک در شهرستان‌های مختلف بررسی شده و بدین وسیله پهنه‌بندی خطر خشکسالی انجام می‌شود.

سپس، برداشت از آب زیرزمینی در طول سال‌های آماری معادل صفر فرض شده و مدل شبکه عصبی با توجه به متغیرهای مذکور و با در نظر گرفتن عمق سطح آب در ابتدای هر بازه به عنوان یک متغیر ورودی اجرا و متوسط سطح آب زیرزمینی برای دشت قزوین در طول سال‌های آماری مذکور محاسبه گردید.

۳-۲- تعیین دوره‌های خشکسالی

در این تحقیق از شاخص SGI جهت ارزیابی خشکسالی استفاده خواهد شد، این شاخص شبیه شاخص SPI است که برای پایش خشکسالی هواشناسی به کار می‌رود. برای محاسبه شاخص SPI در ابتدا توزیع آماری مناسب که غالباً توزیع گاما است بر داده‌های آماری بلندمدت بارندگی‌ها برازش داده می‌شود، سپس تابع توزیع تجمعی با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌گردد، بطوری‌که استاندارد شده و میانگین آن برای هر دوره و منطقه مورد نظر صفر شود. مقادیر مثبت SPI شرایطی را نشان می‌دهد که بارش بیشتر از بارش میانه است و مقادیر منفی نشان دهنده شرایطی است که در آن بارندگی کمتر از بارش میانه است. بر اساس طبقه‌بندی (Mckee et al., 1993)، دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که شاخص SPI به طور مستمر منفی گردد و هنگامی پایان می‌یابد که SPI مثبت گردد. شاخص SGI خشکسالی آب زیرزمینی را براساس تغییرات تراز آب زیرزمینی مشخص می‌نماید. تراز آب زیرزمینی یک متغیر پیوسته بوده و نیازی به تجمیع آن در طول یک دوره زمانی نیست. لذا توزیع سری زمانی ماهانه تراز آب زیرزمینی ممکن است از توزیع گاما پیروی نکند و لازم است که توزیع‌های احتمالاتی بیشتری در مورد آن بررسی گردد. در محاسبه شاخص SGI توابع چگالی احتمال مختلف بر آمار عمق پروفیل سطح آب زیرزمینی طبیعی شده به کار رفته و تابع مناسب مشخص شده و سپس تغییر شکل هم احتمال توزیع تجمعی تابع انتخابی به نرمال جهت محاسبه شاخص مذکور به کار می‌رود (Bloomfield et al., 2013).

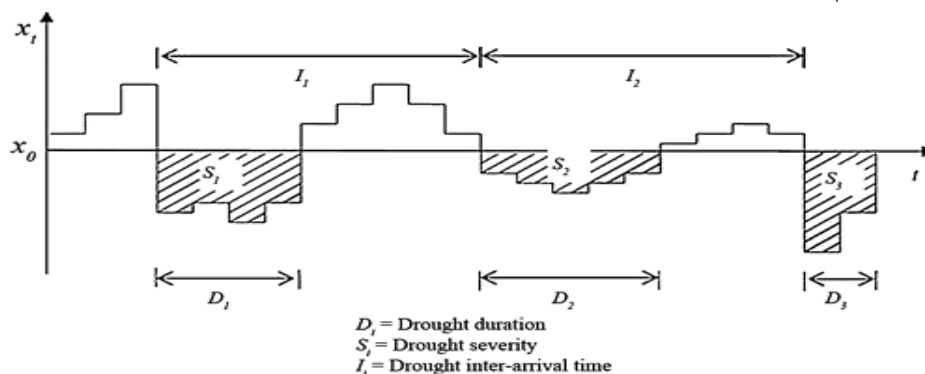


Fig. 2- Drought characteristics (Kwak et al., 2016)

شکل ۲- ویژگی‌های خشکسالی (Kwak et al., 2016)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبه تراز طبیعی آب زیرزمینی و تحلیل اثرات برداشت

با استفاده از مدل ترکیبی MODFLOW- ANN تراز طبیعی آب زیرزمینی در دوره مطالعاتی ۵۰ ساله مطابق شکل ۳ محاسبه شد. شکل ۳ تأثیر برداشت از آب زیرزمینی در طول سال‌های آماری را به وضوح نشان می‌دهد. میزان برداشت‌ها در طول زمان افزایش یافته و تراز آب زیرزمینی کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. متوسط افت آب زیرزمینی ناشی از برداشت آب زیرزمینی معادل ۴۵ متر در طول ۵۰ سال و متوسط افت سالانه ناشی از برداشت از آبخوان ۹۰ سانتی متر است.

همچنین، شکل مذکور نشان می‌دهد که بدلیل تفاوت زیاد بین تراز آب زیرزمینی طبیعی و تراز موجود، استفاده از تراز موجود به منظور تحلیل خشکسالی آب زیرزمینی در مناطق با برداشت زیاد دارای خطا است.

در ادامه، به منظور ارزیابی اثرات برداشت و رفتار آبخوان نسبت به آن در سال‌های اخیر، برداشت آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳ معادل صفر فرض شده و مدل آب زیرزمینی به ازای آن اجرا شده و نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که در طول سه سال متوسط تراز آب زیرزمینی دشت حدود ۳/۸ متر افت نموده است. همچنین، اختلاف تراز طبیعی و موجود در انتهای سال سوم ۵/۳

متر است. این در حالی است که اگر برداشتی از آب زیرزمینی انجام نمی‌شد تراز آب ۱/۴۳ متر صعود می‌نمود. این رقم در مقایسه با متوسط افت سالانه ناشی از برداشت (۰/۹ متر در سال) قابل ملاحظه نیست. موضوع فوق نشان می‌دهد که بدلیل آنکه تراز آب زیرزمینی افت زیادی داشته و فاصله بین تراز زمین و تراز آب زیرزمینی در حال حاضر خیلی زیاد است، نفوذ آب به سفره آب زیرزمینی به کندی انجام شده و جبران برداشت‌های انجام شده مستلزم زمان طولانی است.

۳-۲- تعیین دوره‌های خشکسالی

در این تحقیق به منظور تعیین دوره‌های خشکسالی از شاخص SGI استفاده گردید. در اینجا با استفاده از نرم‌افزار EasyFit توزیع‌های احتمالاتی مختلف بر داده‌های تراز آب زیرزمینی طبیعی متوسط دشت برازش داده شد، سپس بر اساس آزمون‌های kolmogrov-smirnov و Anderson-Darling و Chi-Squared توزیع مناسب انتخاب گردید. نتایج نشان داد که توزیع Burr توزیع مناسب‌تری نسبت به سایر توزیع‌ها است و داده‌ها در سطح معنی داری ۰/۰۵ با توزیع مذکور مطابقت دارند. لذا در ادامه شاخص‌های توزیع مذکور در هر ماه و برای تمامی بازه‌ها استخراج و تابع احتمالات تجمعی آنها محاسبه گردیدند. پس از محاسبه تابع تجمعی کل، تغییر شکل هم احتمالی تابع تجمعی Burr به متغیر تصادفی نرمال استاندارد SGI با میانگین صفر و واریانس واحد صورت گرفت. شکل ۵ تغییرات شاخص SGI در طول زمان نشان داده شده است. همچنین، در مواردی که SGI کمتر از صفر باشد شرایط خشکسالی آبخوان وجود دارد.

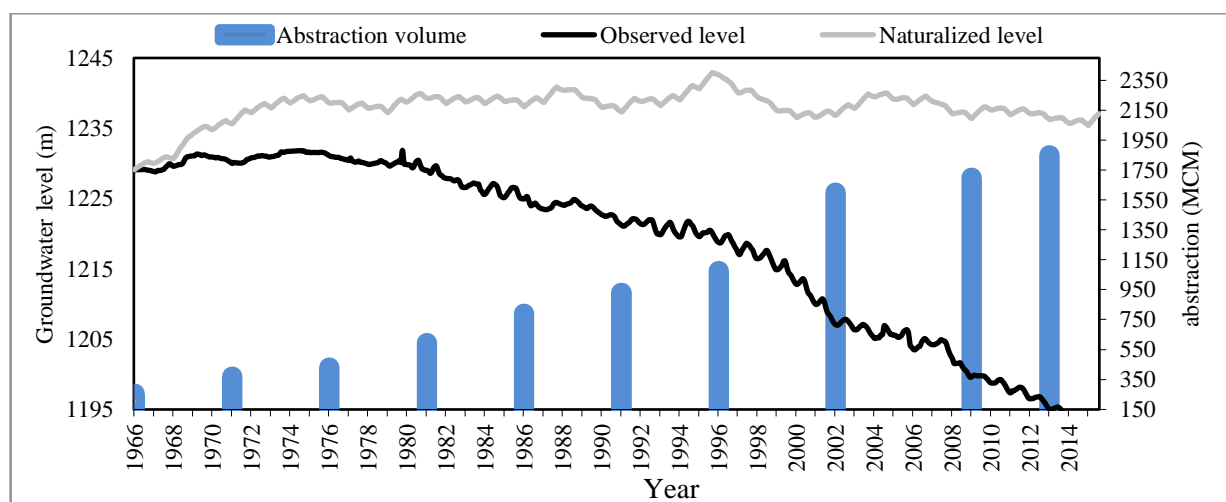


Fig. 3- Observed and naturalized groundwater level and abstraction volume

شکل ۳- تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و طبیعی شده و حجم برداشت

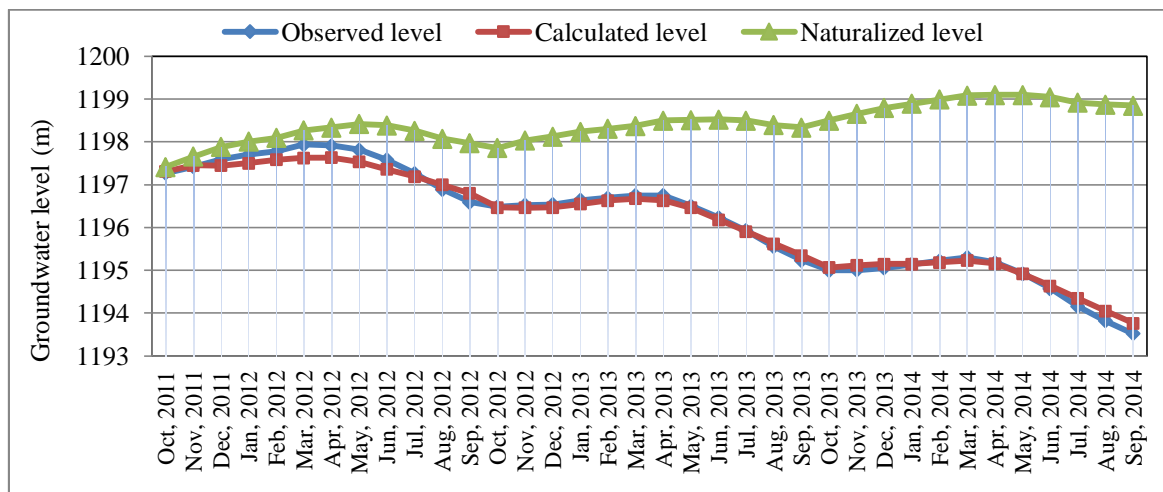


Fig. 4- Observed, calculated and naturalized level from 2011 to 2014

شکل ۴- ترازهای مشاهداتی، محاسباتی و طبیعی در سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۰

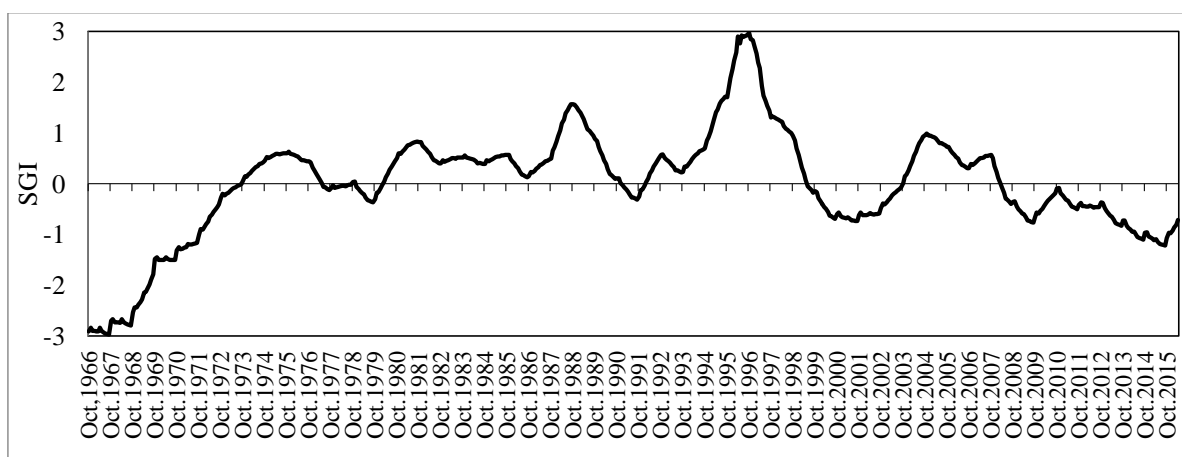


Fig. 5- SGI index time series in Qazvin plain

شکل ۵- سری زمانی شاخص SGI دشت قزوین

۳-۳- ارتباط شاخص خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص‌های

خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

به منظور بررسی امکان پایش خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص پایش خشکسالی هواشناسی SPI و ارتباط بین خشکسالی‌های آب زیرزمینی و هواشناسی، این شاخص به ازای بارش‌های میانگین متحرک مختلف برای متوسط دشت قزوین محاسبه گردیدند. در شکل ۶ و به عنوان نمونه، تغییرات شاخص SGI و شاخص SPI به ازای میانگین‌های متحرک ۳ ماهه، ۶ ماهه، ۱۲ ماهه و ۴۸ ماهه نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که شاخص SPI3 دارای نوسان زیادی بوده و ارتباط معناداری با شاخص SGI ندارد. همچنین اگرچه SPI6 دارای نوسان کمتری نسبت به SPI3 است، با این حال ارتباط قابل ملاحظه‌ای بین آن با شاخص SGI قابل مشاهده نیست. لیکن، شاخص SPI9 دارای ارتباط معنادار با SGI بوده و روند آن از روند

بررسی شاخص SGI مطابق شکل مذکور نشان داد که محدوده دشت قزوین در بازه زمانی سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۵ پنج دوره خشکسالی آب زیرزمینی را تجربه نموده است. شکل مذکور حاکی از دو دوره خشکسالی طولانی مدت در ابتدا و انتهای بازه ۵۰ ساله است. همچنین بر خلاف خشکسالی‌های هواشناسی و به دلیل ماهیت پیوستگی تراز آب زیرزمینی، خشکسالی‌های مربوط به آب زیرزمینی طولانی مدت‌تر بوده و خروج از شرایط خشکسالی مستلزم بارش و ترسالی‌های هواشناسی متوالی است. نتایج نشان می‌دهد که آبخوان دشت قزوین در ۴۷ درصد از بازه مطالعاتی در حالت خشکسالی بوده و اراضی واقع در دشت از خشکسالی‌های درازمدت رنج می‌برند.

۳-۴- مشخصات خشکسالی‌های به وقوع پیوسته در شهرستان‌های مختلف

بررسی پارامتر SGI نشان داد که تمامی شهرستان‌های واقع در محدوده دشت قزوین در بازه زمانی سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۵ پنج دوره خشکسالی آب زیرزمینی را تجربه نموده است. مشخصات خشکسالی‌های به وقوع پیوسته در شهرستان‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که ویژگی خشکسالی‌های به وقوع پیوسته در شهرستان‌های موجود تفاوت زیادی با هم ندارند. لیکن غالباً شدت خشکسالی در شهرستان بوئین‌زهرا بیشتر از سایر مناطق بوده، لذا شهرستان مذکور دارای خطر خشکسالی آب زیرزمینی بیشتری است. همچنین، شهرستان‌های قزوین و البرز خطر خشکسالی کمتری دارند.

۴- جمع‌بندی

در این مقاله، تراز آب زیرزمینی در دشت قزوین که در آن برداشت‌های بی‌رویه آب زیرزمینی منجر به افت شدید آب زیرزمینی گشته در طول یک دوره آماری ۵۰ ساله و یک دوره آماری سه ساله با استفاده از مدل MODFLOW و مدل جایگزین شبکه عصبی مصنوعی طبیعی‌سازی شده و ضمن بررسی اثرات برداشت، پایش خشکسالی آب زیرزمینی، تعیین ویژگی‌های خشکسالی آب زیرزمینی و خطر خشکسالی انجام گردیده است. در مجموع نتایج زیر بدست آمد:

۱- متوسط افت سالانه ناشی از برداشت آب زیرزمینی در دشت قزوین ۹۰ سانتی‌متر است. بدلیل افت زیاد تراز آب ناشی از برداشت و تفاوت زیاد بین تراز آب زیرزمینی طبیعی و تراز موجود، استفاده از تراز موجود به منظور تحلیل خشکسالی آب زیرزمینی در مناطق با بیلان منفی دارای خطای بسیار زیاد است.

۲- آبخوان قزوین در ۴۷ درصد از بازه مطالعاتی (دوره ۵۰ ساله) در حالت خشکسالی بوده و اراضی واقع در دشت از خشکسالی‌های درازمدت رنج می‌برند.

۳- بدلیل برداشت زیاد آب زیرزمینی و افت قابل توجه تراز آب، نفوذ بارش و جریان‌های سطحی به آبخوان به کندی انجام شده و جبران بیلان منفی ایجاد شده نیازمند مدیریت برداشت در زمان طولانی است.

۴- بررسی شاخص SGI نشان داد که بر خلاف خشکسالی‌های هواشناسی، خشکسالی‌های مربوط به آب زیرزمینی طولانی‌مدت‌تر بوده و خروج از شرایط خشکسالی مستلزم بارش و ترسالی‌های هواشناسی متوالی است.

۵- تراز آب زیرزمینی در هر زمان به بارش‌های مربوط به ۹ ماه قبل وابستگی زیادی دارد و یک تأخیر زمانی ۹ ماهه بین بارش و تراز آب زیرزمینی قابل تصور است.

شاخص SGI تبعیت می‌نماید. بدین معنا که در مواقعی که افزایش/کاهش شاخص SPI9 وجود دارد، به طور مشابه شاخص SGI افزایش/کاهش می‌یابد. لذا تراز آب زیرزمینی در هر زمان به بارش‌های مربوط به ۹ ماه قبل وابستگی زیادی دارد و یک تأخیر زمانی ۹ ماهه بین بارش و تراز آب زیرزمینی قابل تصور است. تأخیر زمانی مذکور می‌تواند دارای ارتباط مستقیم با عمق سطح ایستابی آب زیرزمینی باشد. به عبارت دیگر، افزایش/کاهش عمق سطح ایستابی ممکن است تأخیر زمانی بین بارش را افزایش/کاهش دهد. همچنین با افزایش میانگین متحرک بارش، شکل نمودار مربوط به SPI به SGI منطبق‌تر شده و در SPI48 بیشترین انطباق ایجاد می‌شود.

همچنین، به منظور بررسی امکان پایش خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص پایش خشکسالی هیدرولوژیکی SHDI و ارتباط بین خشکسالی‌های آب زیرزمینی و هیدرولوژیکی، این شاخص به ازای بارش‌های با میانگین متحرک مختلف برای متوسط دشت قزوین محاسبه گردیدند. در شکل ۷ تغییرات شاخص SGI و شاخص SPI به ازای میانگین‌های متحرک ۳ ماهه، ۶ ماهه، ۱۲ ماهه و ۴۸ ماهه به عنوان نمونه نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مشابه شاخص SPI، شاخص‌های SHDI3 و SHDI6 دارای نوسان زیادی بوده و ارتباط معناداری بین آنها و شاخص SGI قابل تصور نیست. لیکن، شاخص SHDI9 ارتباط معنادار با SGI داشته و روند آن از روند شاخص SGI تبعیت می‌نماید. در مواقعی که افزایش/کاهش شاخص SHDI9 وجود دارد، شاخص SGI افزایش/کاهش می‌یابد. این بدان معناست که تراز آب زیرزمینی در هر زمان به جریان‌های آب سطحی مربوط به ۹ ماه قبل وابستگی زیادی دارد و یک تأخیر زمانی ۹ ماهه بین آنها قابل تصور است. همچنین با افزایش میانگین متحرک بارش، شکل نمودار مربوط به SHDI به SGI منطبق‌تر شده و در SHDI48 بیشترین همبستگی ایجاد می‌شود.

جدول ۱ نشان می‌دهد که به ازای تمامی میانگین‌های متحرک، همبستگی بیشتر شاخص خشکسالی آب زیرزمینی با شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به شاخص خشکسالی هواشناسی است. لذا شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی شاخص مناسب‌تری نسبت به شاخص خشکسالی هواشناسی در پایش خشکسالی آب زیرزمینی است. همچنین، حداکثر همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی و هواشناسی به ازای شاخص SPI با میانگین متحرک ۴۸ ماهه اتفاق می‌افتد، این در حالی است که حداکثر همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی و هیدرولوژیکی به ازای شاخص SHDI با میانگین متحرک ۴۸ ماهه رخ می‌دهد.

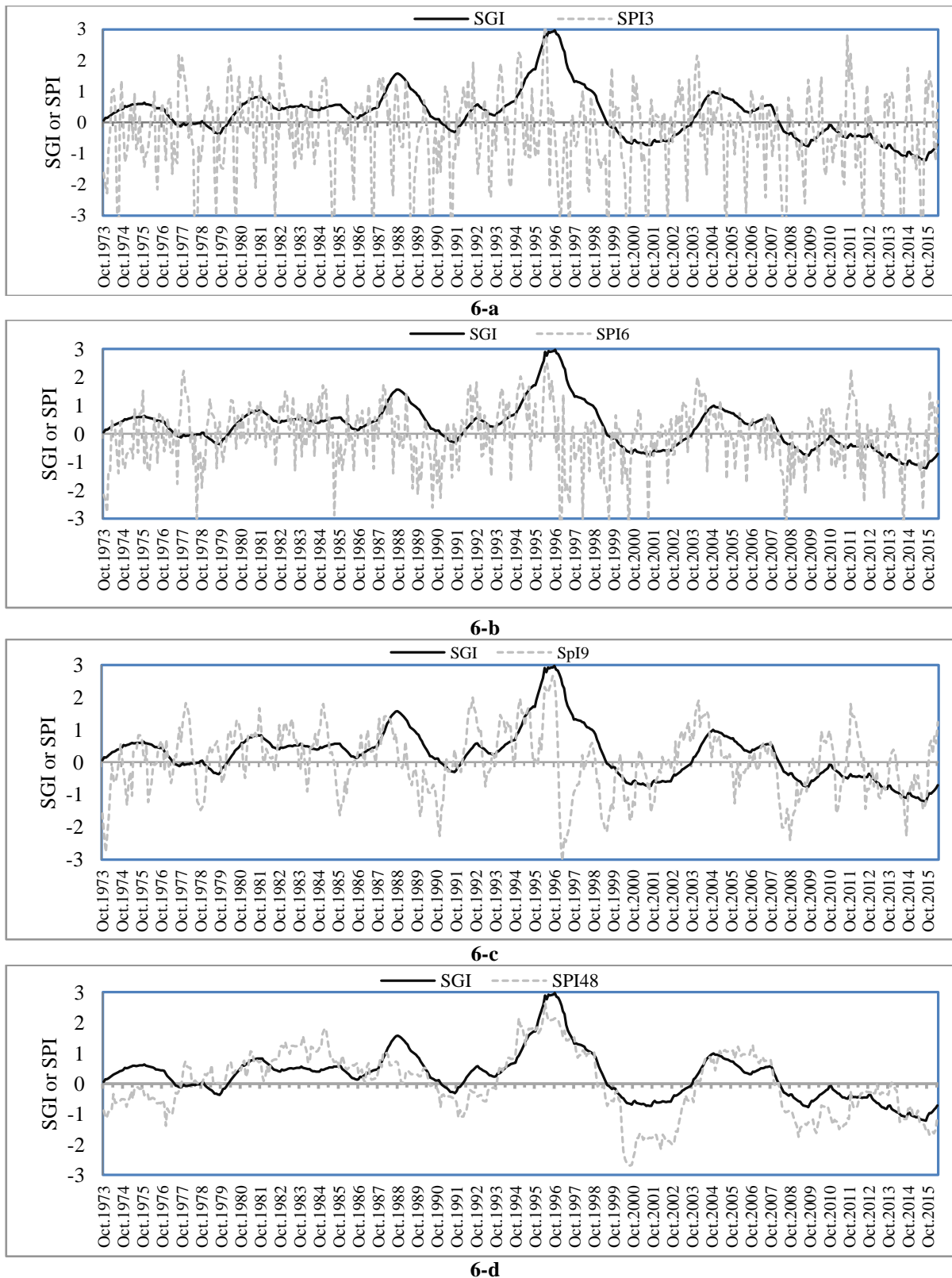
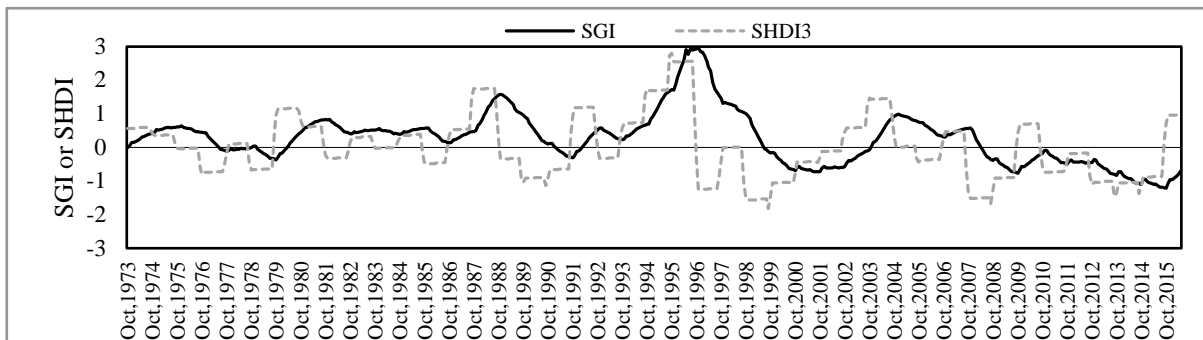
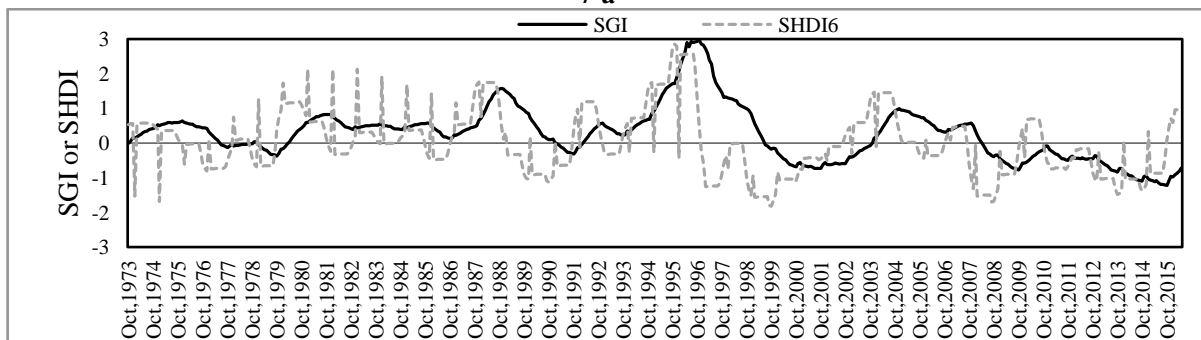


Fig. 6- The correlation between SGI and SPI index with different moving averages

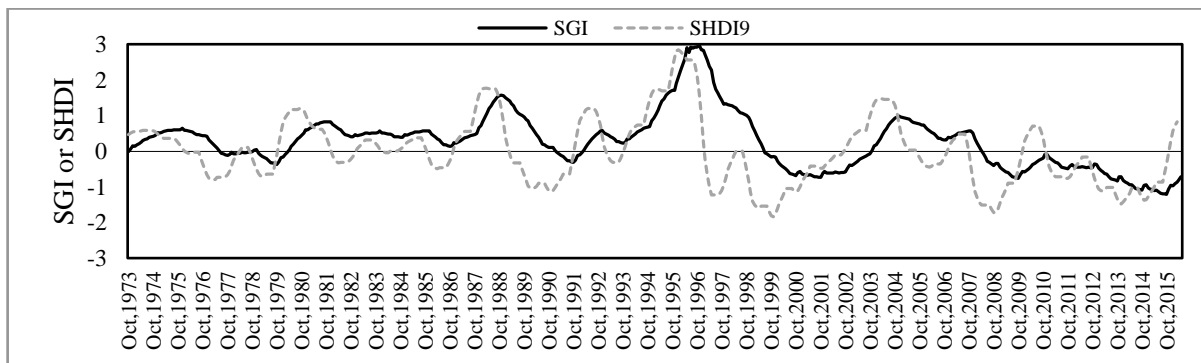
شکل ۶- ارتباط بین شاخص SGI و SPI با میانگین متحرک‌های مختلف



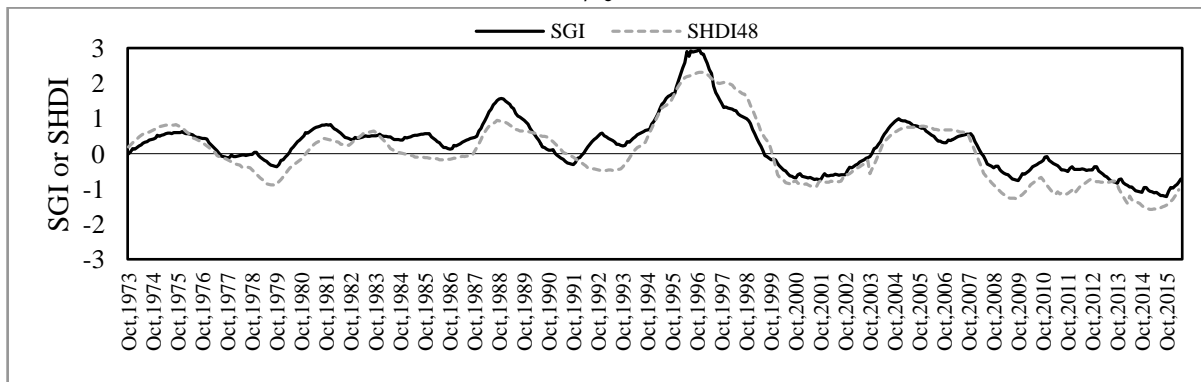
7-a



7-b



7-c



7-d

Fig. 7- Relationship between SGI and SHDI index with different moving averages

شکل ۷- ارتباط بین شاخص SGI و SHDI با میانگین متحرک‌های مختلف

Table 1- Cross correlation of SGI index with SPI and SHDI indices

جدول ۱- همبستگی ضربی شاخص SGI با شاخص های SPI و SHDI

Moving average (month)	SHDI and SGI	SPI and SGI
1	0.32	0.06
3	0.34	0.11
6	0.40	0.18
9	0.45	0.26
12	0.50	0.35
24	0.61	0.52
36	0.72	0.66
48	0.78	0.75
60	0.77	0.73

Table 2- Groundwater drought characteristics from 1966 to 2016

جدول ۲- مشخصات دوره های خشکسالی آب زیرزمینی در سال های ۱۳۹۵-۱۳۴۵

Drought date	Duration (month)	Drought peak						Drought severity					
		Abyek	Alborz	Takestan	Qazvin	Boein Zahra	Average of plain	Abyek	Alborz	Takestan	Qazvin	Boein Zahra	Average of plain
1966, Sep-1973, Aug	84	2.96	2.97	2.95	2.96	2.98	2.97	136.82	136.39	137.03	136.20	137.54	136.4
1977, May-1980, Jan	33	0.36	0.36	0.37	0.372	0.37	0.370	4.13	4.168	4.290	4.13	4.32	3.97
1990, Nov-1991, Dec	14	0.30	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	2.285	2.29	2.346	2.32	2.36	2.23
1999, May-2003, Aug	52	0.72	0.73	0.73	0.73	0.74	0.73	24.44	24.55	24.81	24.39	24.44	24.30
March, 2008-March, 2016	97	1.20	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	61.15	61.45	61.95	61.72	61.24	60.85

پی نوشت ها

- 1- Standardized Precipitation Index
- 2- Standardized Water Level Index
- 3- Groundwater Drought Index
- 4- Moisture Drought Index
- 5- Standardized Groundwater Index
- 6- Groundwater Resource Index
- 7- Percent of Normal Index
- 8- Deciles Index
- 9- Drought Duration
- 10- Drought Severity
- 11- Drought Peak
- 12- Drought Inter-Arrival Time

۵- مراجع

- Abkhan Consulting Engineering Company (2013) Studies on budget update of water resources in the Namak lake basins. Technical Report (In Persian)
- Barikani A, Ahmadian M, and Khalilian S (2011) Optimal sustainable use of groundwater resources in agriculture: Case study subsector in Qazvin plain.

بیشترین همبستگی بین شاخص خشکسالی آب زیرزمینی SGI و شاخص خشکسالی هواشناسی SPI، به ازای شاخص خشکسالی هواشناسی با میانگین متحرک ۴۸ ماهه (SPI48) اتفاق می افتد.

۶- تراز آب زیرزمینی در هر زمان به جریان های آب سطحی مربوط به ۹ قبل وابستگی زیادی دارد و تأخیر زمانی ۹ ماهه بین آب سطحی و تراز آب زیرزمینی قابل تصور است. بیشترین همبستگی بین شاخص خشکسالی آب زیرزمینی SGI و شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SHDI، به ازای شاخص خشکسالی هواشناسی با میانگین متحرک ۴۸ ماهه (SHDI48) اتفاق می افتد.

۷- همبستگی ضربی بین شاخص های خشکسالی آب زیرزمینی، هواشناسی و هیدرولوژیکی نشان داد که شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به شاخص خشکسالی هواشناسی دارای همخوانی بیشتری با شاخص خشکسالی آب زیرزمینی است.

۸- ویژگی خشکسالی های به وقوع پیوسته در شهرستان های موجود تفاوت زیادی با هم ندارند. لیکن شهرستان بوین زهرا دارای خطر خشکسالی آب زیرزمینی بیشتری است. همچنین، شهرستان های قزوین و البرز خطر خشکسالی کمتری دارند.

- forecasting qualitative and quantitative status in future years using the existing mathematical model. M.Sc. Thesis, School of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran (In Persian)
- McKee TB, Doesken NJ, and Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proc. of 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California, 179-184
- Mohammadi M, Moradi M (2010) Groundwater drought zoning in the Mighan desert basin in GIS in order to manage the groundwater resources. In: Proc. of 1th National Conference on Combating Desertification and Sustainable Development of Iran Desert Wetlands, 16 and 17 January, Arak, Iran (In Persian)
- Peters E, Bier G, Van Lanen HAJ, and Torfs PJF (2006) Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. *Journal of Hydrology* 321(1-4):257-275
- Peters E, Van Lanen HAJ, Torfs PJF, and Bier G (2005) Drought in groundwater- drought distribution and performance indicators. *Journal of Hydrology* 306 (1-4):302-317
- Sanginabadi H, Saghafian B, and Delavar M (2019) Coupled groundwater drought and water scarcity index for intensively over-drafted aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering* 24(4):1-15
- Shahid S and Hazarika MK (2009) Groundwater drought in the northwestern districts of Bangladesh. *Water Resources Management* 24(10):1989-2006
- Shakiba A, Mirbagheri B, Kheyri A (2010) Drought and its impact on groundwater resources in the East of Kermanshah province using the index SPI. *Journal of Geography* 8 (25):20-31(In Persian)
- Younesi M, Behbahani SM, Mohammadi K, Younesi H (2009) Drought evaluation and its effect on groundwater: Case study of Qazvin plain. In: Proc. of 1th National Conference on Water Resources Management, 16-18 August, Shahrood, Iran (In Persian)
- Yuan XC, ZhouYL, Jin JL, and Wei YM (2013) Risk analysis for drought hazard in China: a case study in Huaibei Plain. *Natural Hazards* 67(2):879-900
- Yue S and Wang CY (2004) The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management* 18(3):201-218
- Journal of Agricultural Economics and Development* 25(2):253-262 (In Persian)
- Bayat Varkeshi M, Farahani Dastjani M, and Ghabaei Sough M (2018) Effect of meteorological drought on groundwater resources (Case study: Komijan aquifer in Markazi province). *Iran-Water Resource Research* 14(1):114-124 (In Persian)
- Bloomfield J P and Marchant BP (2013) Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 17:4769-4787
- Bloomfield JP, Marchant BP, Bricker SH, and Morgan RB (2015) Regional analysis of groundwater droughts using hydrograph classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(10):4327-4344
- Bloomfield JP, Gaus I, and Wade SD (2003) A method for investigating the climate-change scenarios on annual minimum groundwater levels. *Water and Environment Journal* 17(2):86-91
- Dehghani M, Saghafian B, Farokhnia A, and Noori R (2014) Uncertainty analysis of streamflow drought forecast using artificial neural networks and Monte-Carlo simulation. *International Journal of Climatology* 34(4):1169-1180
- Guttman NB (1998) Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. *American Water Resources Association* 34(1):113-121
- Kumar R, Musuza JL, Van Loon AF, Teuling AJ, Barthel R, Ten Broek J, Mai J, Samaniego L, and Attinger S (2015) Multiscale evaluation of the standardized precipitation index as a groundwater drought indicator. *Hydrology and Earth System Sciences* 12:7405-7436
- Kwak J, Kim S, Kim G, Singh VP, Park J, and Kim HS (2016) Bivariate drought analysis using streamflow reconstruction with tree ring indices in the Sacramento basin, California, USA. *Water* 8(4):122
- Leelaruban N and Padmanabhan G (2015) Droughts-groundwater relationship in northern great plains shallow aquifers. In: Proc. of World Environmental and Water Resources Congress 2015, 17-21 May, Austin, Texas, 510-519
- Li B and Rodell M (2014) Evaluation of a model-based groundwater drought indicator in the conterminous U . S . *Journal of Hydrology* 526:78-88
- Maleki Y (2014) Investigate the utilization trend of Qazvin aquifer in the last half century and