

مقاله علمی-پژوهشی

## تعیین خشکسالی طبیعی آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص جدید NGDI

مصطفی گودرزی<sup>۱\*</sup>، غلامرضا گودرزی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷

### چکیده

علاوه بر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، یکی دیگر از مشکلاتی که بهره‌برداری پایدار منابع آب زیرزمینی را بخصوص در مناطق خشک با مشکل مواجه می‌نماید، وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی می‌باشد. لذا یکی از چالش‌های مهم در مدیریت منابع آب زیرزمینی در نظر گرفتن اثرات خشکسالی در سیستم هیدرولوژیکی می‌باشد. در این تحقیق با توجه به لزوم جداسازی فعالیت‌های انسانی از خشکسالی طبیعی ضمن ارائه یک شاخص جدید خشکسالی آب‌های زیرزمینی قابلیت کاربرد این شاخص در دشت نجف‌آباد مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شاخص جدید ارائه شده ابتدا اثرات ناشی از فعالیت‌های انسانی اعم از برداشت از آب‌های زیرزمینی و یا تغییر کاربری از تغییرات سطح ایستابی ناشی از وقوع خشکسالی با استفاده از مدل HARTT تفکیک و جدا شده و سپس با برازش بهترین تابع توزیع احتمالاتی و استانداردسازی آن مقادیر خشکسالی طبیعی تعیین می‌شوند. نتایج ارزیابی شاخص NGDI در دشت نجف‌آباد نشان داد که در سطح دشت در بازه سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰ شرایط خشکسالی طبیعی بر منابع آب‌های زیرزمینی حاکم بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده، شاخص NGDI ارائه شده قابلیت تعیین خشکسالی طبیعی در آب‌های زیرزمینی و تفکیک اثرات انسانی از آن و پیش‌بینی خشکسالی از چندین ماه و یا حتی بیش از یک سال قبل از وقوع آن را دارا می‌باشد. این شاخص می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب برای مدیران به منظور کنترل و مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، استفاده از این شاخص برای پیش‌بینی و سیستم‌های هشدار دهنده خشکسالی در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، خشکسالی، سطح ایستابی، HARTT

### مقدمه

تعاریف متعددی از خشکسالی موجود است اما ارائه یک تعریف واحد از خشکسالی مشکل است و به عنوان یک پدیده طبیعی در مناطق مختلف اقلیمی به وقوع می‌پیوندد (Li et al., 1994). خشکسالی بیش از هر مخاطره دیگر، بر روی زندگی انسان اثر می‌گذارد و در زمینه‌های مختلف به صورت مستقیم و غیرمستقیم اثرات زیان‌باری را ایجاد می‌نماید، اما باین وجود در بین تمام مخاطره‌های طبیعی، کمتر قابل درک است و از آن به عنوان یک بالای خزننده یاد می‌شود (Mishra and Desai, 2005). خشکسالی یک پدیده منطقه‌ای و یک رویداد سه بُعدی با مشخصه‌های سختی، دوام و گستره‌ی فضایی می‌باشد (Rossi et al., 1992). به منظور شناسایی شدت و گسترش این پدیده عموماً شاخص‌هایی توسعه داده شده است که هر کدام ورودی‌ها و شرایط استفاده خاص خود را دارا می‌باشند (Li et al., 1994).

علاوه بر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، یکی دیگر از مشکلاتی که بهره‌برداری پایدار منابع آب زیرزمینی را بخصوص در مناطق خشک با مشکل مواجه می‌نماید، وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی می‌باشد. کارایی یک سیستم پایش خشکسالی کاملاً تحت

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، منابع آب زیرزمینی بیشترین و بعضاً تنها منبع آب مورد استفاده در بخش کشاورزی، صنعت و شرب است. به دلیل کمبود آب و بحران‌های خشکسالی و تغییر اقلیم، در سال‌های اخیر اهمیت آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک جهان رو به افزایش بوده است. لذا بزرگترین تهدید برای منابع آب زیرزمینی در آینده، وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی و انتشار خشکسالی در آب‌های زیرزمینی است که منبع قابل اعتمادی برای اهداف مختلف می‌باشند.

۱- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران

۲- استادیار بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: goodarzimustafa@gmail.com)

می‌باشد و یک سامانه پایش خشکسالی مناسب نیازمند شاخص مناسب و دقیق می‌باشد. در مناطق خشک که عمده مصارف شرب، کشاورزی و صنعت از آبهای زیرزمینی تأمین می‌گردد، تشخیص صحیح و به موقع خشکسالی آبهای زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. باوجوداین، شاخص‌های خشکسالی آبهای زیرزمینی که تا کنون ارائه شده است در بسیاری از مناطق قابل کاربرد نبوده به دلیل اینکه اثرات فعالیت‌های انسانی مانند پمپاژ بر خشکسالی طبیعی غلبه بیشتری دارد و این شاخص‌ها بیشتر کاهش منابع آب ناشی از این فعالیت‌ها را نشان می‌دهد. لذا در این تحقیق با توجه به لزوم جدا سازی فعالیت‌های انسانی از خشکسالی طبیعی ضمن ارائه یک شاخص جدید خشکسالی آبهای زیرزمینی قابلیت کاربرد این شاخص در دشت نجف‌آباد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دشت نجف‌آباد است که بخشی از حوضه بزرگ زاینده‌رود بوده و مهم‌ترین دشت از لحاظ کشاورزی در حوضه زاینده‌رود می‌باشد. در واقع عبور رودخانه زاینده‌رود و وجود شبکه آبیاری و زهکشی در بخش جنوب شرقی آبخوان دشت نجف‌آباد موجب شده تا این دشت به بزرگ‌ترین قطب کشاورزی در استان اصفهان تبدیل شود. وسعت کل محدوده مطالعاتی ۱۷۱۲ کیلومترمربع که آبخوان آبرفتی ۹۴۰/۹ کیلومترمربع از دشت را شامل می‌شود. این دشت به لحاظ جغرافیایی بین مدار ۵۷° ۵۰' تا ۴۴' ۲۶" ۵۱° طول شرقی و مدارهای ۱۳' ۲۰' ۳۳" تا ۲۱' ۴۹' ۳۳" عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). حداقل و حداکثر ارتفاع به ترتیب ۱۵۷۹ و ۲۹۴۲ متر و شیب عمومی حوضه از غرب به شرق و شمال شرق می‌باشد. میانگین سالانه بارش در سطح حوضه ۱۵۸ میلی‌متر و تبخیر و تعرق پتانسیل بالغ بر ۱۵۰۰ میلی‌متر محاسبه گردیده است (Goodarzi, 2016). در این تحقیق یک شاخص جدید با عنوان شاخص خشکسالی طبیعی آبهای زیرزمینی (NGDI) به منظور تعیین خشکسالی طبیعی آبهای زیرزمینی و جداسازی آن از اثرات انسانی ناشی از برداشت از آبهای زیرزمینی ارائه شده و سپس کاربرد آن در دشت نجف‌آباد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### شاخص NGDI

شاخص خشکسالی طبیعی آبهای زیرزمینی (Natural Groundwater Drought Index) که به اختصار NGDI خوانده می‌شود، به منظور تعیین خشکسالی طبیعی آبهای زیرزمینی و جداسازی آن از اثرات انسانی ناشی از برداشت از آبهای زیرزمینی ارائه شده است. برای تعیین خشکسالی طبیعی در این روش بایستی ابتدا

تأثیر انتخاب یک شاخص مناسب خشکسالی می‌باشد به گونه‌ای که بتواند توصیف مناسبی از شرایط خشکسالی را فراهم نماید. لذا یکی از چالش‌های مهم در مدیریت منابع آب زیرزمینی در نظر گرفتن اثرات خشکسالی در سیستم هیدرولوژیکی می‌باشد (گودرزی، ۱۳۹۴).

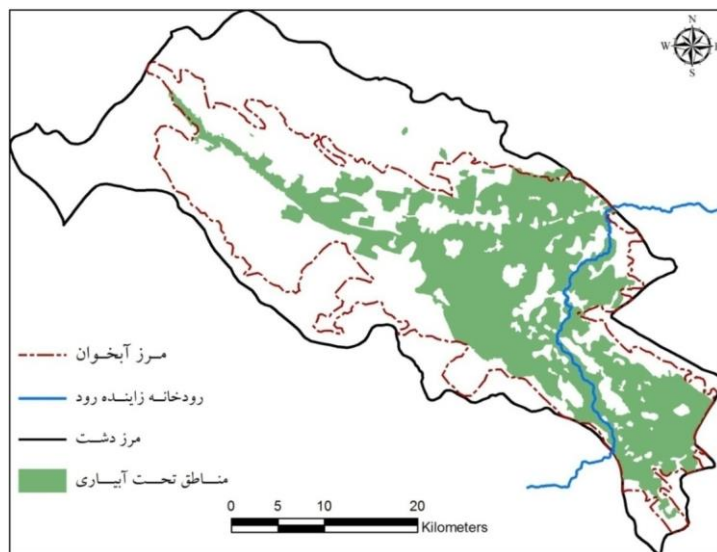
با توجه به نحوه انتشار خشکسالی منابع آب زیرزمینی در درون سیستم هیدرولوژیکی، خشکسالی منابع آب زیرزمینی دارای اهمیت ویژه‌ای است و در چند سال اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (گودرزی، ۱۳۹۴). مهندسین و همکاران یک شاخص جدید به نام GRI ارائه نمودند که این شاخص بر اساس حجم آب محبوس در آبخوان، شرایط خشکسالی را می‌سنجد. شاخص GRI به وسیله‌ی مهندسین به عنوان شاخص مفید و قابل اعتماد برای پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی آب و زمین‌شناسی برای منطقه‌ی مدیترانه به کار برده شده است (Mendocino et al., 2008). ایشان شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI) را در یک دوره‌ی ۴۵ ساله در مناطق کالابریا با اقلیم مدیترانه‌ای بکار بردند و با شاخص بارش استاندارد (SPI) مقایسه کردند و نتایج ایشان نشان داد که این دو شاخص در مقیاس زمانی طولانی‌تر از همبستگی بیشتری برخوردار بودند. همچنین، بلومفیلد و مارچنت، ضمن ارائه شاخص جدید SGI که بر اساس سری زمانی تغییرات سطح ایستابی بدست می‌آید، آن را برای مناطق مختلف انگلستان به کار برده و همبستگی آن را با شاخص SPI تعیین نمودند (Bloomfield and Marchant, 2013). گودرزی و همکاران، در تحقیقی ضمن ارائه یک شاخص جدید برای خشکسالی آبهای زیرزمینی (GRDI) از تغذیه آبهای زیرزمینی برای تعیین خشکسالی استفاده نموده و سپس از این شاخص برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی بهره بردند (Goodarzi et al., 2016).

علاوه بر این، تاکنون تحقیقات متعددی به منظور شناخت بهتر خشکسالی منابع آب زیرزمینی در ارتباط با فاکتورهای اقلیمی و بویژه نحوه انتشار خشکسالی در درون سیستم هیدرولوژیکی انجام شده است، از جمله مهمترین موارد می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط، التهیر و یه (Eltahir and Yeh, 1999)؛ پیترز و همکاران (Peters et al., 2005)؛ پیترز و همکاران (Peters et al., 2006)؛ چنگ و تیه (Chang, T.J. and C.B. Teoh, 1995)؛ بویان و همکاران (Bhuiyan et al., 2006)؛ تالاکسن و همکاران (Tallaksen et al., 2006)؛ فن لنن و همکاران (Van Lanen et al., 2013)؛ فن لون و فن لنن (Van Loon and Van Lanen, 2013)؛ خشوعی (۱۳۹۱)؛ دکتر صفائی (۱۳۹۱) و زارعی و همکاران (Zarei et al., 2021)، اشاره نمود.

امروزه توسعه و ارتقاء سامانه‌های پیش‌بینی کننده و هشدار دهنده خشکسالی بخصوص در مناطق خشک که مستعد خشکسالی هستند، یک چالش اساسی محسوب می‌شود. در این بین شناسایی رویدادهای خشکسالی و ارزیابی سختی آنها با ابزار مناسب، بسیار با اهمیت

اثرات ناشی از فعالیت‌های انسانی اعم از برداشت از آب‌های زیرزمینی و یا تغییر کاربری را از تغییرات طبیعی سطح ایستابی تفکیک و جدا نمود. برای تفکیک اثرات فعالیت‌های انسانی بسته به شرایط منطقه می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود. از جمله روش‌هایی که می‌توان برای جداسازی اثرات فعالیت‌های انسانی بر آب‌های زیرزمینی استفاده نمود، می‌توان به روش استفاده از مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی در یک بازه طولانی و تقسیم آن به دو بخش داده‌های مربوط به زمان قبل از تشدید فعالیت‌های انسانی و زمان بعد از آن ( Cenobio-Cruz

اثرات ناشی از خشکسالی طبیعی آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص جدید ... استفاده از مدل‌های سری زمانی و تجزیه تغییرات سطح ایستابی و جدا کردن روند از تغییرات سطح ایستابی (Lafare et al., 2016)، استفاده از مدل‌های تفکیک کننده اثرات روند از تغییرات سطح ایستابی (Ferdowsian et al., 2001) و استفاده از مقادیر تغذیه واقعی آب‌های زیرزمینی (Goodarzi et al., 2016)، اشاره نمود. در این تحقیق برای تفکیک اثرات فعالیت‌های انسانی بر تغییرات سطح ایستابی از تغییرات ناشی از خشکسالی از مدل HARTT استفاده شده است.



شکل ۱- محدوده دشت نجف‌آباد و آبخوان مربوطه

$$F_n(x) = \frac{1}{n} [\text{Number of Observations} \leq x] \quad (1)$$

آماره آزمون KS (D) بر اساس بیشترین اختلاف عمودی بین تابع توزیع تجمعی تئوری و تجربی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D = \max \left( F(x) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x) \right), 1 \leq i \leq n \quad (2)$$

در این آزمون فرض صفر این است که، داده‌ها از توزیع مشخص شده پیروی می‌کنند و فرض جایگزین این است که داده‌ها از توزیع مشخص شده پیروی نمی‌کنند. با انتخاب فرض صفر و یک سطح اعتماد  $(\alpha)$ ، با مقایسه مقدار  $D_{max}$  با مقدار بحرانی  $D$  اگر  $D_{max}$  کوچکتر از  $D$  باشد فرض صفر صحیح بوده و بین داده‌ها و توزیع تئوری تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. پس از تعیین بهترین تابع توزیع و استخراج پارامترهای آن، با استفاده از تابع احتمال انتخاب شده به ازای هر مقدار از متغیر سطح ایستابی، مقدار احتمال آن محاسبه می‌گردد. در مرحله بعد، با استفاده از اصل انتقال هم احتمال، که در آن احتمال‌های کمتر یا مساوی دو متغیر از دو توزیع با هم برابر فرض

در مرحله بعد بر روی داده‌های به دست آمده که در واقع معرف تغییرات سطح ایستابی طبیعی می‌باشند، توابع توزیع‌های مختلف (از جمله لوگ نرمال، ویبول، گاما، لوگ گاما، لوگ پیرسون تیپ ۳، لوگ لوجستیک و...) برازش داده شده و بهترین تابع توزیع احتمال که بهترین تطابق را با داده‌ها داشته باشد انتخاب می‌گردد. در مرحله بعد با استاندارد سازی داده‌ها همانند شاخص SPI میزان شدت خشکسالی مشخص می‌گردد. در این تحقیق، به منظور برازش توزیع‌های مختلف از دو روش حداکثر تابع محتمل و روش L مومنت استفاده گردید. برای تعیین میزان کفایت برای هر تابع توزیع یا کیفیت برازش هر یک از توزیع‌ها از آزمون نکوتی برازش کلوموگراف - اسمیرنوف استفاده می‌گردد. در این آزمون مشخص می‌شود که آیا یک نمونه از یک توزیع پیوسته فرضی برداشت شده است یا نه. این نتیجه‌گیری بر اساس تابع توزیع تجمعی تجربی (ECDF) حاصل می‌شود. فرض کنید که ما یک نمونه  $x_1, \dots, x_n$  از یک توزیع با CDF،  $F(x)$  داریم. در این صورت CDF تجربی از رابطه زیر بدست می‌آید (Corder and Foreman, 2009):

شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ابتدا سری زمانی داده‌های سطح ایستابی منطقه از لحاظ وجود یا عدم وجود اثرات ناشی از فعالیت‌های انسانی بر سطح ایستابی، بررسی می‌گردد. سپس در صورت وجود اثرات ناشی از فعالیت‌های انسانی (برداشت آب، احداث سد و غیره)، این اثرات با روش مناسب و موجود برای منطقه مانند استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، استفاده از داده‌های آماری بلندمدت قبل از وقوع فعالیت‌های انسانی، مدل‌های آماری و غیره، داده‌های سطح ایستابی اصلاح می‌شود. توابع توزیع آماری بر این داده‌ها برآزش داده می‌شود و با استانداردسازی داده‌ها شاخص NGDI محاسبه می‌گردد.

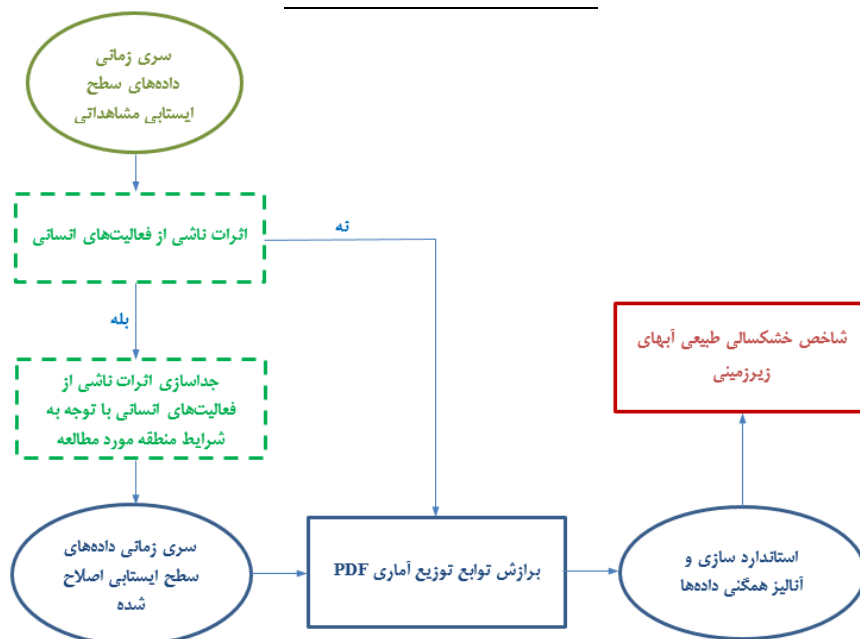
می‌شوند، توابع به صورت استاندارد تبدیل می‌شوند که این عدد استاندارد شده معرف شاخص NGDI است. بر این اساس مقادیر منفی معرف خشکسالی و مقادیر مثبت نشان دهنده ترسالی می‌باشد و برای شاخص NGDI شدت خشکسالی را می‌توان به صورت قراردادی با استفاده از جدول ۱ تعیین نمود.

$$NGDI = \frac{W_m - \mu_{W,m}}{\delta_{W,m}} \quad (3)$$

که در این رابطه  $W_m$  مقدار سطح ایستابی اصلاح شده در ماه  $m$ ،  $\mu_{W,m}$  متوسط مقدار سطح ایستابی اصلاح شده در ماه  $m$ ،  $\delta_{W,m}$  مقدار انحراف از معیار مقدار سطح ایستابی اصلاح شده در ماه  $m$  و شاخص خشکسالی طبیعی آبهای زیرزمینی می‌باشد. در شکل ۲ مراحل و چارچوب کلی محاسبه NGDI به طور شماتیک نشان داده

جدول ۱- طبقات شدت خشکسالی برای شاخص NGDI

شدت خشکسالی	NGDI
ترسالی شدید	$1/5 \geq$
ترسالی متوسط	$1/5$ تا $0/5$
نرمال	$0/5$ تا $-0/5$
خشکسالی متوسط	$-0/5$ تا $-1/5$
خشکسالی شدید	$-1/5 \leq$



شکل ۲- چارچوب کلی محاسبه شاخص NGDI

تأخیر زمانی آن در هر چاه مشاهده‌ای مشخص گردید. سپس توابع توزیع‌های مختلف به این داده‌ها برآزش داده شده و بهترین مدل انتخاب و بر اساس آن شاخص خشکسالی آبهای زیرزمینی استاندارد شده برای هر چاه تعیین و شدت خشکسالی تعیین گردید. مدل

## مدل HARTT

در این تحقیق به منظور تعیین خشکسالی طبیعی در آبهای زیرزمینی ابتدا از مدل HARTT استفاده شده و با جداسازی اثرات بارش بر سطح ایستابی مقادیر بارش مؤثر بر تغییرات سطح ایستابی و

برحسب ماه از شروع داده‌ها،  $L$  طول تأخیر زمانی برحسب ماه بین بارش و اثرات آن بر سطح ایستابی،  $k_0$ ،  $k_1$  و  $k_2$  پارامترهایی هستند که توسط مدل بایستی تخمین زده شوند (Ferdowsian et al., 2001). تاکنون از این روش برای ارزیابی تغییرات سطح ایستابی در تحقیقات مختلف از جمله فردوسیان و همکاران (Ferdowsian et al., 2002)، شاپوری و همکاران (Shapoori et al., 2011)، سیسرو (CSIRO, 2009)، یدجو و وب (Yihdego and Webb, 2011)، پیترسون و وسترن (Peterson and Western, 2011) و گودرزی (Goodarzi 2020)، استفاده شده است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار HARTT هر دو روش ذکر شده برای چاه‌های مشاهداتی دشت نجف‌آباد مورد ارزیابی قرار گرفت و بهترین روش برای پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی استفاده گردید.

### نتایج و بحث

در این تحقیق به منظور تعیین خشکسالی طبیعی در منابع آب زیرزمینی یک شاخص جدید ارائه گردید که اثرات فعالیت‌های انسانی را از خشکسالی طبیعی جدا می‌نماید. سپس از این شاخص برای تعیین خشکسالی منابع آب زیرزمینی در دشت نجف‌آباد اصفهان استفاده شد. خلاصه نتایج به دست آمده از مدل سازی سطح ایستابی بوسیله مدل HARTT در جدول ۲ برای سه چاه پیژومتری انتخابی ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ نتایج پارامترهای نکوئی برازش شامل ضرب تعیین (R)، RMSE و MAE برای مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی برای سه چاه پیژومتری منتخب ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل HARTT با دقت نسبتاً خوبی سطح ایستابی را برآورد نموده است.

HARTT یک روش آنالیز رگرسیون خطی می‌باشد که اثرات روند برداشت از آبخوان و بارش را بر تغییرات سطح ایستابی در نظر می‌گیرد. در واقع، برآیند تغییرات سطح ایستابی به دو بخش اثرات اقلیمی و برداشت از آبخوان تفکیک می‌شود و بخشی که به صورت روند متمایز می‌شود نشان دهنده پمپاژ و برداشت از آبخوان در نظر گرفته می‌شود (Ferdowsian et al., 2001; Shapoori et al., 2011; Goodarzi, 2020). در مدل HARTT دو حالت مختلف از باقیمانده بارش تجمعی استفاده شده و مقایسه می‌گردند. حالت اول بارش باقیمانده تجمعی ماهانه (AMRR) می‌باشد:

$$AMRR_t = \sum_{j=1}^t (M_{i,j} - \bar{M}_j) \quad (4)$$

که در این رابطه  $M_{i,j}$  بارش در ماه  $i$ ام که از ابتدای سری زمانی که مربوط به ماه  $i$ ام سال (mm)،  $\bar{M}_j$  متوسط بارش ماهانه برای ماه  $i$ ام سال (mm) و  $t$  زمان از ابتدای سری زمانی داده‌ها می‌باشد. حالت دوم بارش باقیمانده سالانه تجمعی (AARR) می‌باشد:

$$AARR_t = \sum_{i=1}^t \left( M_i - \frac{\bar{A}}{12} \right) \quad (5)$$

که در این رابطه  $\bar{A}$  متوسط بارش سالانه (mm) می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار  $\bar{A}$  ثابت می‌باشد تغییرات  $M_i$  همانند حالت قبل (AMRR) تعدیل نمی‌شود در نتیجه AARR دارای تغییرات درون سالی بیشتری می‌باشد. برای هر دو حالت ذکر شده به منظور تعیین پارامترها از داده‌های سطح ایستابی ثبت شده در گذشته استفاده می‌گردد. بدین منظور برای پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی از رابطه زیر در مدل HARTT استفاده می‌شود.

$$h_t = k_0 + k_1 \cdot AMRR_{t-L} + k_2 t \quad (6)$$

$$h_t = k_0 + k_1 \cdot AARR_{t-L} + k_2 t \quad (7)$$

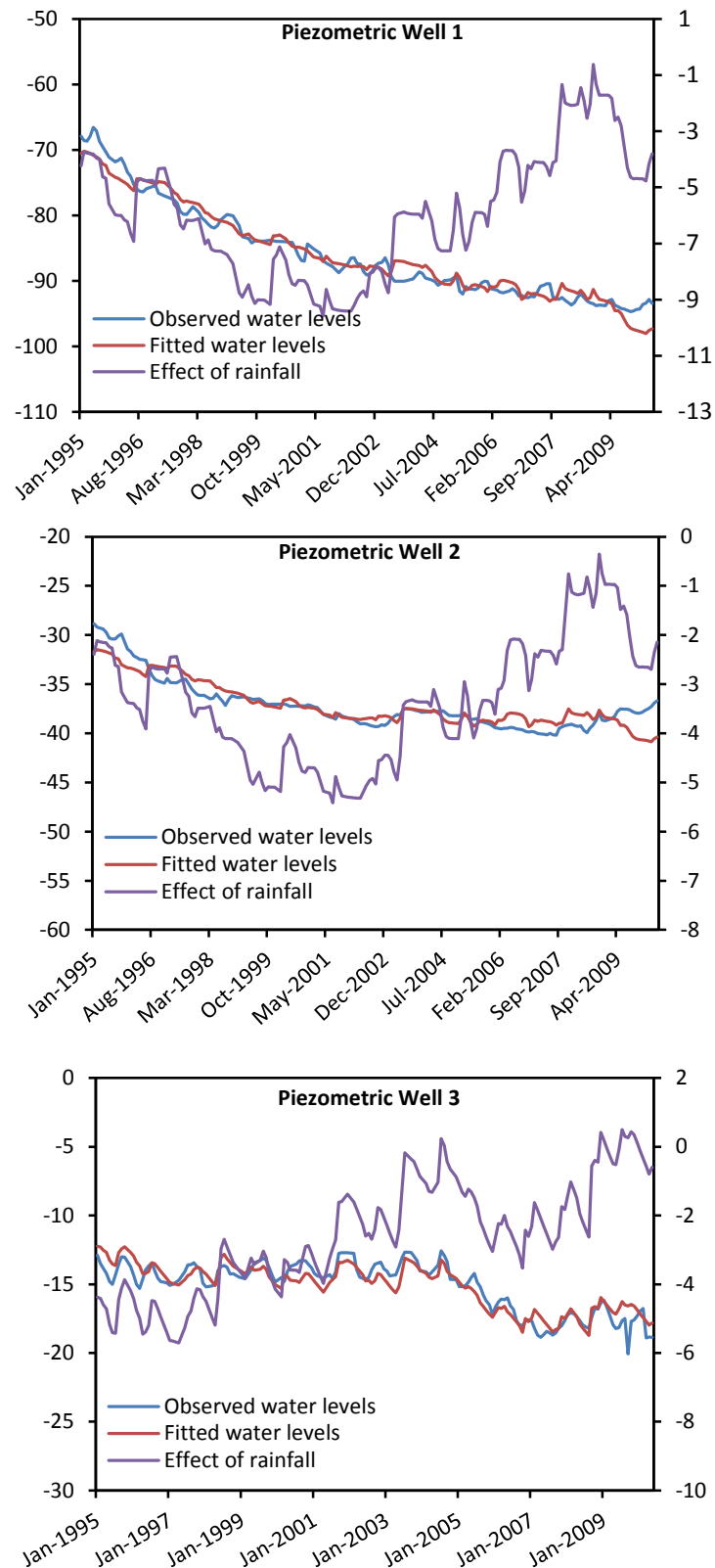
که در این رابطه  $h_t$  عمق سطح ایستابی در زمان  $t$ ،  $t$  زمان

جدول ۲- نتایج مدل HARTT برای چاه‌های پیژومتری انتخابی

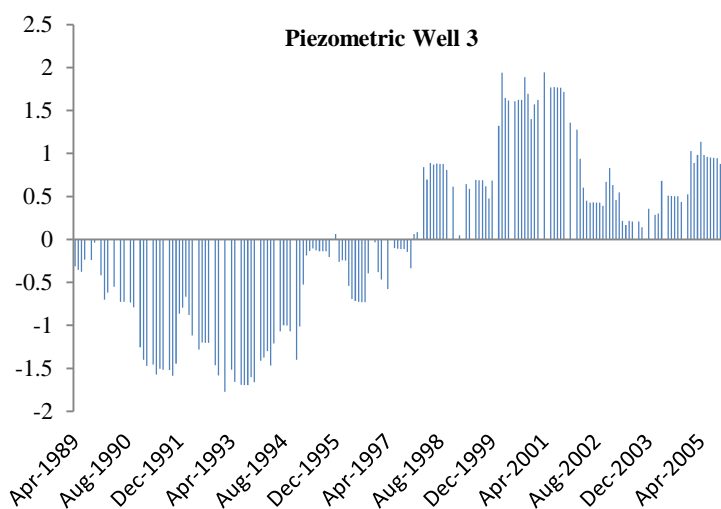
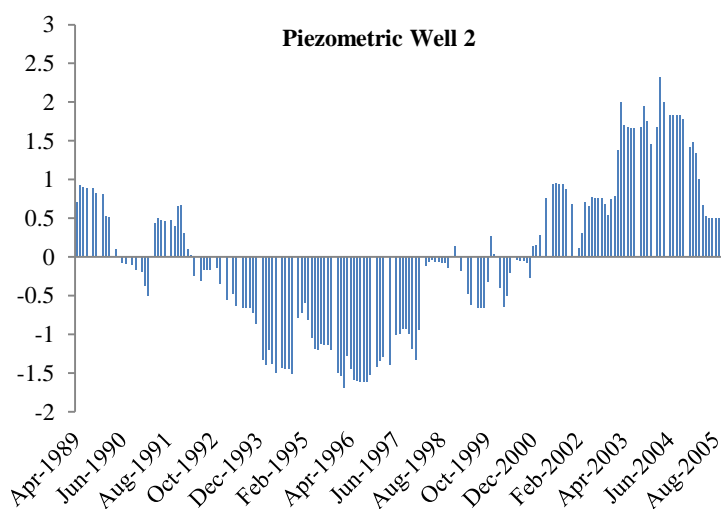
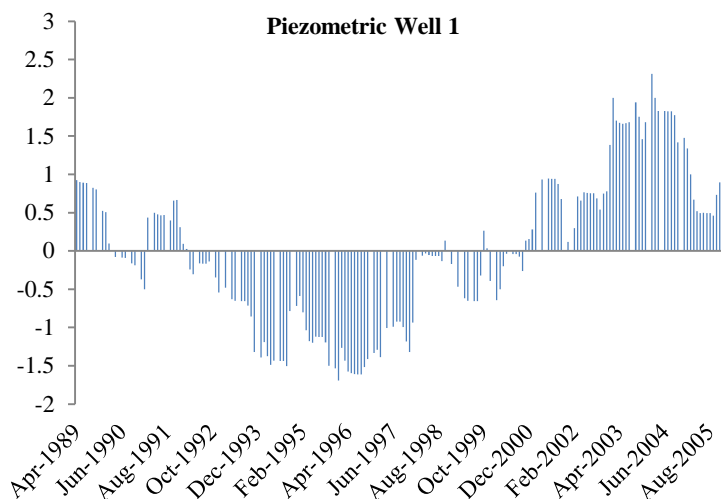
$R^2$	تأخیر زمانی (ماه)	پارامترهای محاسبه شده مدل			چاه پیژومتریک
		$K_0$	$K_1$	$K_2$	
۰/۹۴۷	۶۰	-۶۶/۱۷	۰/۰۳۹۹	-۰/۱۳۶۱	چاه شماره ۱
۰/۷۸	۴۸	-۲۹/۲۷	۰/۰۲۲۶	-۰/۰۴۴۶	چاه شماره ۲
۰/۸۴	۳	-۷/۷۹	۰/۰۲۳۵	-۰/۰۴۶۹	چاه شماره ۳

جدول ۳- نتایج نکوئی برازش در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی برای چاه‌های پیژومتری انتخابی

چاه پیژومتریک	کالیبراسیون			اعتبارسنجی		
	MAE	RMSE	R	MAE	RMSE	R
چاه شماره ۱	۰/۹۸	۱/۸	۱/۶	۰/۹۶	۱/۱۵	۰/۹
چاه شماره ۲	۰/۸۴	۱/۵	۱/۴	۰/۸۶	۱/۷	۱/۳
چاه شماره ۳	۰/۹۴	۰/۸	۰/۷	۰/۹۳	۰/۹	۰/۶



شکل ۳- سطح ایستابی مشاهداتی و برآورد شده توسط مدل HARTT و اثرات بارش بر سطح ایستابی



شکل ۴- مقادیر شاخص NGDI محاسبه شده برای سه چاه مشاهده‌ای انتخابی

جدا نمود و از آن برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی آبهای زیرزمینی بهره برد. اما نکته قابل توجه در مورد این مدل این است که این مدل در محل‌هایی که سطح ایستابی در عمق‌های کم (کمتر از ۲ متر) قرار دارد نتایج مطلوبی ارائه نمی‌دهد که دلیل اصلی آن در نظر نگرفتن اثرات تبخیر بر سطح ایستابی می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج فردوسیان و همکاران (Ferdowsian et al., 2001)، فردوسیان و همکاران (Ferdowsian et al., 2002)، سیسرو (CSIRO, 2009)، یدجو و وب (Yihdego and Webb, 2011) و پیترسون و وسترن (Peterson and Western, 2011) همخوانی دارد. پس از کالیبراسیون چاه‌ها در مدل HARTT و جداسازی اثرات بارش بر سطح ایستابی از فعالیت‌های انسانی مقادیر شاخص NGDI برای چاه‌های موجود در سطح دشت محاسبه گردید. در هر یک از این چاه‌ها با توجه به شرایط فیزیکی منطقه یک توزیع خاص برازش بهتری را نشان داد، که نتایج تابع توزیع برازش یافته برای سه چاه پیرومتری انتخابی در جدول ۴ ارائه شده است.

همچنین در شکل ۳ نمودار مقایسه مقادیر سطح ایستابی مشاهداتی و برآورد شده توسط مدل HARTT و اثرات بارش بر سطح ایستابی نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که با استفاده از مدل HARTT علاوه بر پیش‌بینی سطح ایستابی می‌توان اثرات تغییر بارش بر سطح ایستابی و نیز تأخیر زمانی بین بارش و اثر آن بر سطح ایستابی را مشخص نمود، که این تأخیر برای چاه‌های مختلف با توجه به پارامترهای مختلف مؤثر، متفاوت می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل HARTT نشان داد که با استفاده از این مدل می‌توان تغییرات سطح ایستابی را با استفاده از تغییرات بارش برآورد نمود.

با توجه به ویژگی‌های مدل HARTT، در صورت کالیبراسیون صحیح آن، به خوبی می‌توان از آن برای بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و پایش خشکسالی آبهای زیرزمینی استفاده نمود. همچنین با استفاده از این مدل می‌توان اثرات فعالیت‌های انسانی بر سطح ایستابی را از خشکسالی طبیعی در منطقه

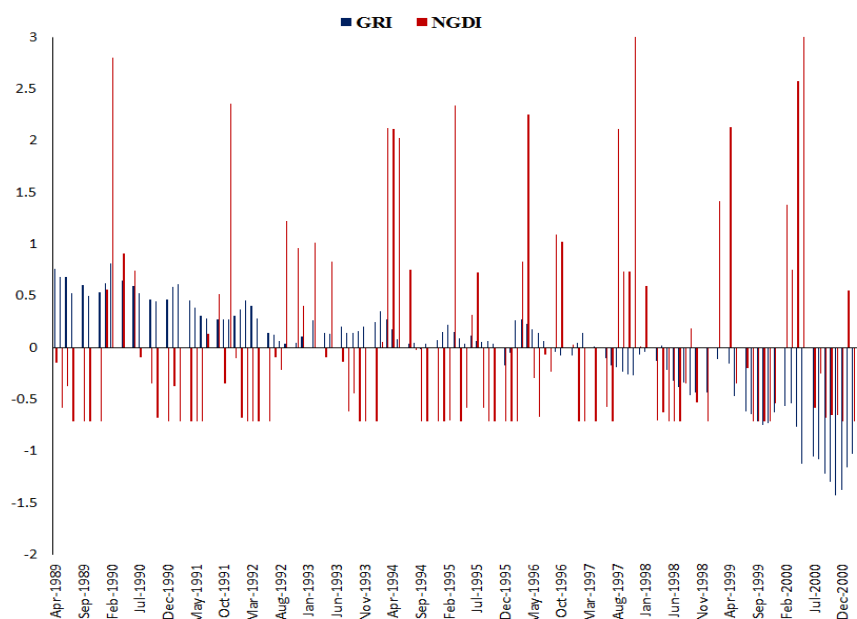
جدول ۴- نتایج بهترین تابع توزیع برازش یافته بر داده‌های تغییرات سطح ایستابی پیرومتری انتخابی

چاه پیرومتری	P-value in KS test	بهترین تابع توزیع برازش یافته	پارامترهای بهتری تابع توزیع برازش یافته
چاه شماره ۱	۰/۶۶۲	Wakeby ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \xi$ )	۵/۴۸۴۹- ۰/۴۶۵۴ ۰/۴۶۶۹۷ ۱/۶۱۱۲ ۴/۴۸۰۵
چاه شماره ۲	۰/۶۶۹	Wakeby ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \xi$ )	۹/۶۹۹۴- ۰/۴۶۵۴ ۰/۸۲۵۷۸ ۱/۶۱۱۲ ۷/۹۲۳۳
چاه شماره ۳	۰/۵۰۴	Johnson SB ( $\gamma, \delta, \lambda, \xi$ )	- ۵/۳۳۶۹ ۵/۰۳۹۸ ۰/۹۲۲۲ ۰/۰۰۶۰۱

می‌توان اثرات خشکسالی و ترسالی‌های طبیعی مشخص شده توسط شاخص NGDI را مشاهده نمود. همچنین در شکل ۵، برای چاه شماره ۲ به عنوان نمونه مقادیر شاخص NGDI محاسبه شده با شاخص GRI مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، شاخص GRI صرفاً از روند کلی منفی افت سطح ایستابی پیروی می‌کند و تمامی ماه‌های ابتدای بازه را ترسالی و تمامی ماه‌های انتهایی بازه را خشکسالی در نظر گرفته است. در حالی که در شاخص NGDI به تناوب دوره‌های ترسالی و خشکسالی با شدت متفاوت قابل تشخیص می‌باشد. بنابراین در تعیین خشکسالی آبهای زیرزمینی بایستی از شاخص‌هایی استفاده نمود که اثرات فعالیت‌های انسانی را به عنوان خشکسالی در نظر بگیرند. این نتیجه‌گیری در تحقیقات دیگری مانند تحقیقات انجام شده توسط ون لون و ون لنن (Van Loon and Van Lanen, 2013)، گودرزی و همکاران (Goodarzi et al., 2016)، سنوبیو کروز و همکاران (Cenobio-Cruz et al., 2017)، پاتک و دودامانی (Pathak and Dodamani, 2018)، نیز مورد اشاره و تأیید قرار گرفته است.

بعد از تعیین توابع توزیع برای هر چاه مشاهده‌ای مقادیر NGDI برای این نواحی در سال‌های مختلف تعیین و خشکسالی و ترسالی آبهای زیرزمینی مشخص گردید. در شکل ۳ مقادیر شاخص NGDI برای سه چاه مشاهده‌ای انتخابی نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود برای پیرومتری‌های شماره ۱ و ۲ در بازه سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰ شرایط خشکسالی طبیعی بر منابع آب زیرزمینی حاکم بوده و برای پیرومتر شماره ۳ نیز در بازه سال‌های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۸ شرایط خشکسالی طبیعی بر منابع آب زیرزمینی حاکم بوده است. در مجموع در اکثر چاه‌های مشاهده‌ای موجود در سطح دشت در بازه سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰ شرایط خشکسالی طبیعی بر منابع آبهای زیرزمینی حاکم بوده است. این نتایج با نتایج گودرزی و همکاران (Goodarzi et al., 2016)، که خشکسالی آبهای زیرزمینی را با استفاده از شاخص GRDI در منطقه نجف‌آباد تعیین کردند همخوانی دارد. در تحقیق مذکور نیز برای سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۱ خشکسالی‌های کم تا شدید برآورد گردیده است. با مقایسه شکل ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود که علیرغم اینکه تغییرات سطح ایستابی دارای یک روند کلی منفی به دلیل برداشت بی‌رویه از آبخوان می‌باشد اما





شکل ۵- مقایسه شاخص NGDI با شاخص GRI

مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از شاخص می‌توان خشکسالی طبیعی آبهای زیرزمینی را تعیین نمود و آن را از اثرات انسانی تفکیک نمود. با تعیین خشکسالی طبیعی می‌توان وقایع خشکسالی که در منابع آب زیرزمینی رخ می‌دهد را مشخص نمود در غیر این صورت به دلیل افت پیوسته سطح ایستابی به دلیل فعالیت‌های انسانی تمامی سال‌های به عنوان خشکسالی در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی خطا ایجاد می‌گردد. همچنین، این شاخص در دشت نجف‌آباد مورد استفاده قرار گرفت و نتایج بدست آمده حاکی از قابلیت مناسب این شاخص در تعیین خشکسالی آبهای زیرزمینی می‌باشد. نتایج نشان داد که اثرات فعالیت‌های انسانی به مراتب بیشتر از خشکسالی باعث افت سطح ایستابی می‌شود. به طور کلی این شاخص امکان تفکیک خشکسالی از فعالیت‌های انسانی را فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب برای مدیران به منظور کنترل و مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. شاخص NGDI دارای چند ویژگی اساسی شامل امکان استفاده از روش‌ها و مدل‌های مختلف برای محاسبه شاخص NGDI، قابلیت پیش‌بینی وقوع خشکسالی در آبهای زیرزمینی و قابلیت تشخیص خشکسالی طبیعی ناشی از تغییرات آب و هوا از کمبود آب ناشی از فعالیت‌های انسانی، می‌باشد. شاخص NGDI می‌تواند به عنوان یک چارچوب کلی برای تعیین خشکسالی طبیعی توسط سایر شاخص‌های خشکسالی آبهای زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. در واقع در تمام شاخص‌های موجود برای آب زیرزمینی یا شاخص‌هایی که در آینده توسعه خواهند یافت، باید از این چارچوب استفاده کرد و لازم است

با توجه به نتایج به دست آمده شاخص NGDI ارائه شده دارای چند ویژگی اساسی نسبت به سایر شاخص‌ها می‌باشد. اولین ویژگی این شاخص این است که برخلاف سایر شاخص‌ها مانند شاخص GRI (مندسینو و همکاران (Mendocino et al., 2008))، SGI (بومفیلد و مارچنت (Bloomfield and Marchant, 2013))، SPI (مک کی و همکاران (McKee et al., 1993)) و SWI (بویان و همکاران (Bhuiyan et al., 2006))، شاخص NGDI توانایی پیش‌بینی وقوع خشکسالی در منابع آب زیرزمینی بسته به ویژگی‌های منطقه از چندین ماه و یا حتی بیش از یک سال قبل از وقوع را دارا می‌باشد. همچنین، در صورت عدم وجود داده‌های تراز سطح آب زمینی، می‌توان از روش‌های محاسبه تغذیه آبخوان استفاده نمود و شاخص را به جای استفاده از رقوم سطح ایستابی با مقادیر تغذیه تعیین نمود. یکی دیگر از برتری‌های این شاخص این است که برخلاف سایر شاخص‌های ارائه شده برای آبهای زیرزمینی در این شاخص اثرات برداشت بی‌رویه از آبخوان از پدیده خشکسالی جدا می‌شود و شاخص صرفاً معرف خشکسالی طبیعی می‌باشد نه اثرات انسانی. لذا می‌تواند از این شاخص در زمینه پیش‌بینی و سیستم‌های هشدار دهنده خشکسالی برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی استفاده نمود.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک شاخص جدید برای تعیین خشکسالی طبیعی در آبهای زیرزمینی ارائه گردید و قابلیت کاربرد آن در دشت نجف‌آباد

- Australia.
- Eltahir, E.A.B. and Yeh, P.J.F. 1999. On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois. *Water Resources Research*. 35: 1199-1217.
- Ferdowsian, R., Pannell, D.J., McCarron, C., Ryder, A. and Crossing, L. 2001. Explaining groundwater hydrographs: Separating atypical rainfall events from time trends. *Australian Journal of Soil Research*. 39(4): 861-875.
- Ferdowsian, R. A., Ryser, R., George, G. and R. Smart. 2002. Groundwater level reductions under lucerne depend on the landform and groundwater flow systems (local and intermediate). *Australian Journal of Soil Research*. 40(3): 381-396.
- Goodarzi, M., Abedi-koupai, J., Heidarpour, M. and Safavi H.R. 2016. Development of a New Drought Index for ground-water and its application in sustainable groundwater extraction. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 142(9): 1-12.
- Goodarzi, M. 2020. Application and performance evaluation of time series, neural networks and HARTT models in predicting groundwater level changes, Najafabad Plain, Iran. *Sustainable Water Resources Management*. 6(4), 67.
- Lafare, E.A.A, Peach, W.D. and Hughes, G.A. 2016. Use of seasonal trend decomposition to understand groundwater behavior in the Perm o- Triassic Sandstone aquifer, Eden Valley, UK. *Hydrogeology Journal*. 24:141-158.
- Li, K. and Makarau, A. E. 1994. Drought and Desertification: Reports to the Eleventh Session of the Commission for Climatology, *WMO/TD 605, Geneva, Switzerland*. 68.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Leist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration time scales. *8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, California*, 179-184.
- Mendocino G., Senatore, A. and Versace, P. 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*. 357:282-302.
- Mishra, A.K. and Desai, V.R. 2005a. Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati River Basin, India. *International Journal of River Basin Management*. IAHR. 3 (1): 31-41.
- Pathak, A.A. and Dodamani, B.M. 2018. Trend Analysis of Groundwater Levels and Assessment of Regional Groundwater Drought: Ghataprabha River Basin, India. *Natural Resources Research*. 28: 631-643.
- Peters, E., Bier, G., Van Lanen, H.A.J. and Torfs, P.J.J.F. 2006. Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. *J. Hydrol.* 321: اثرات انسانی بر سطح آب‌های زیرزمینی تفکیک شود. استفاده از این روش تشخیص خشکسالی آب‌های زیرزمینی را به‌ویژه در مناطق خشک و مناطق مستعد خشکسالی بهبود می‌بخشد. با استفاده از این شاخص می‌توان برنامه برداشت از آب‌های زیرزمینی را به‌گونه‌ای تنظیم نمود که در محدوده برداشت تجدیدپذیر قرار گیرد. بنابراین، استفاده از این شاخص برای تعیین خشکسالی در آب‌های زیرزمینی و ایجاد سامانه‌های پایش و پیش‌بینی خشکسالی به‌منظور بهره‌برداری پایدار منابع آب زیرزمینی پیشنهاد می‌گردد.
- ### منابع
- خشوعی، م. ۱۳۹۱. طراحی سیستم پایش خشکسالی بر اساس شاخص یکپارچه در حوضه آبریز زاینده‌رود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- دکترصفائی، ح. ۱۳۹۱. ارزیابی و تعیین شاخص جامع خشکسالی منابع آب زیرزمینی، مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- گودرزی، م. ۱۳۹۴. بررسی اثرات بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از تلفیق مدل MODFLOW و روش Thornthwaite and Mather. پایان‌نامه دکتری مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- Bhuiyan, C., Singh, R.P. and Kogan, F.N. 2006. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 8: 289-302.
- Bloomfield, J.P. and Marchant, B.P. 2013. Analysis of groundwater drought using a variant of the Standardised Precipitation Index. *Hydrology and Earth System Sciences*. 10: 7537-7574.
- Cenobio-Cruz, A., Breña-Naranjo, A. and Pedrozo-Acuña, A. 2017. Separating hydrological drought from water scarcity in Mexican catchments. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 19, EGU2017-5493.
- Chang, T.J. and Teoh, C.B. 1995. Use of the kriging method for studying characteristics of ground water droughts. *Journal of the American Water Resources Association*. 31: 1001-1007.
- Corder, G.W. and Foreman, D.I. 2009. *Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach*. John Wiley and Sons, 264 pp.
- CSIRO. 2009. Groundwater yields in south-west Western Australia: a report to the Australian Government from the CSIRO south-west Western Australi sustainable yeils project, Technical report,

- Scatena, F., and Servat, E., International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 5th FRIEND World Conference Havana, Cuba, November 2006, IAHS Publication no. 308, Wallingford, UK, 128–133.
- Van Lanen, H.A.J., Wanders, N., Tallaksen, L.M. and Van Loon, A.F. 2013. Hydrological drought across the world: impact of climate and physical catchment structure. *Hydrology and Earth System Sciences*. 17: 1715–1732.
- Van Loon, A.F. and H.A.J. Van Lanen. 2013. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research*. 49: 1483-1502.
- Yihdego, Y. and Webb, J.A. 2011. Modeling of bore hydrograph to determine the impact of climate and land-use change in a temperate sub humid region of southeastern Australia. *Hydrogeology Journal*. 19: 877-887.
- Zarei, A.R., Moghimi, M.M. and Koohi, E. 2021. Sensitivity assessment to the occurrence of different types of droughts using GIS and AHP techniques. *Water Resources Management*. 35(11): 3593-3615.
- 257–275.
- Peters, E., Van Lanen, H.A.J., Torfs, P.J.J.F. and Bier, G. 2005. Drought in groundwater drought distribution and performance indicators. *Journal of Hydrology*. 306: 302–317.
- Peterson, T.J. and Western, A.W. 2011. Time-series modeling of groundwater head and its decomposition to historic climate periods, 34<sup>th</sup> IAHR World Congress, Brisbane, Australia, 26 June-1 July 2011.
- Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G. and Giakoumakis, S. 1992. On regional drought estimation and analysis. *Water Resources Management*. 6: 249-277.
- Shapoori, V., Peterson, T.J., Western, A.W. and Costelloe, J. 2011. Quantifying the impact of pumping on groundwater heads using observation data and advanced time series analysis. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 3966-3972.
- Tallaksen, L.M., Hisdal, H. and Van Lanen, H.A.J. 2006. Propagation of Drought in a Groundwater Fed Catchment, the pang in the UK in *Climate Variability and Change: Hydrological Impacts*. Edited by: Demuth, S., Gustard, A., Planos, E.,

## Determination of Natural Groundwater Drought by Using New Developed NGDI Index

M. Goodarzi<sup>1\*</sup>, G.R. Goodarzi<sup>2</sup>

Received: Jan.18, 2023

Accepted: Apr.16, 2023

### Abstract

In addition to the over extraction of groundwater resources, one of the problems with sustainable use of groundwater, especially in the arid areas, is the occurrence of successive droughts. Therefore, an important challenge in managing groundwater resources, is to consider the effects of drought in the hydrological system. In this study, due to the necessity of separating human activities from natural droughts, a new groundwater drought index was developed and its capability evaluated in the Najaf Abad plain. In the new index, first, the effects of human activities, such as groundwater extraction or land use changes, were separated by HARTT model, and then the natural drought values are determined, by fitting the best probabilistic distribution function and standardizing that. The results of the evaluation of NGDI index in the Najafabad plain showed that, natural drought conditions prevailed over the groundwater resources in the plain between 1992 and 2000. According to the obtained results, the NGDI index provides the ability to determine the natural drought in the groundwater and distinguish the human effects from it and predict drought from several months or even more than a year before it occurs. This index can be used as an appropriate tool for managers to better control and manage groundwater resources. Therefore, the use of this index is recommended in management strategies for prediction and drought warning systems.

**Keywords:** Drought, Groundwater Level, Groundwater, HARTT

---

1- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran

2 - Assistant Professor, Research Division of Natural Resources, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran

(\*-Corresponding Author Email: goodarzimustafa@gmail.com)