



پیشبینی خشکسالی هیدرولوژیکی با شاخص GRI و استفاده از مدلهای تصادفی خطی سری زمانی (منطقه مورد مطالعاتی: آبخوان دشت اردبیل)

سید مهدی حسینی^{1*}، یعقوب دینپژوه ^۲ و امید بابامیری^۳

۱- دانش آموخته دورهی کارشناسی ارشد منابع آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ۳- دانشجوی پسادکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول: <u>mahdi.hoseini@ut.ac.ir</u>

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

چکیدہ

در این مطالعه، خشکسالیهای هیدرولوژیکی آبخوان دشت اردبیل موردبررسی قرار گرفته است. برای این منظور، دادههای ماهانه تراز آب زیرزمینی ۴۸ چاه مشاهداتی طی دوره آماری ۲۰۱۲–۲۰۰۴ مورد استفاده قرار گرفت. بهمنظور تبدیل دادههای نقطهای به منطقهای، از روش تیسنبندی بهره گرفته شد. شاخص GRI در بازههای زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) براساس دادههای منطقهای تراز آب زیرزمینی محاسبه گردید. سپس مدل سازی سریهای زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) براساس دادههای منطقهای تراز آب زیرزمینی محاسبه گردید. سپس مدل سازی سریهای زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۹ و ۲۲ ماهه) براساس دادههای منطقهای تراز آب زیرزمینی محاسبه گردید. سپس مدل سازی سریهای زمانی GRI انجام شد. کارایی مدل ها براساس دادههای آماری نش-ساتکلیف (۸۲) و آکائیک (AIC) ارزیابی شد تا مناسب ترین مدل شناسایی گردد. پارامترهای یکایک مدل ها براساس دادههای مشاهدهای تخمین زده شدند. تحلیل خشک سالی برای هر بازه زمانی به صورت جداگانه صورت گرفت. بهمنظور پیشبینی خشکسالی از معارمانی از معارمانی از معاور مشاهدهای تخمین زده شدند. تحلیل خشک سالی برای هر بازه زمانی به صورت جداگانه صورت گرفت. بهمنظور پیشبینی خشکسالی از معلی مشاهه مربوط به سالهای ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۲ و در بازه زمانی استفاده شد. نتایج نشان داد که طولانی ترین دوره خشک سالی در بازه زمانی سهماهه مربوط به سالهای ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۲ و در بازه زمانی ششماهه مربوط به سالهای ۲۰۱۴ تا کرد. بر ای استفاده شد. نتایج نشان داد که طولانی ترین دوره مدل سازی سریهای زمانی سریهای زمانی ای منای از داد که کلیه سریهای زمانی الموای و ۲۰۲۱ در مقیاس GRI و و ۲۱۹۰ در مان ی در باز و ۲۰۱۲ در مقیاس GRI و و و می می دوره مدل سازی سریهای زمانی و ترای ای می و در تای با مدل مدل سازی سریهای زمانی هدای مداد تایج نشان داد که کلیه سریهای زمانی در از و ۵۰ در و مرور و مراز و در و مراز و ۱۲/۳ در مول و رای و GRI مدل و در ازه زمانی شی مدل و رای و GRI مشاهه مربوط به سالهای کرد مدل سازی سری و GRI و مدل و در و میل و در و و مراز و ۵۰ هماهه مربوط به سالهای مدل و در و می می می منای در و مای و و GRI و مراز و ۵۰ هما و در و مراز و ۵۰ ه و GRI و مدل و در و مراز و ۱۶ مر و در و مراز و مدل و و مدل و

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، پیشبینی، خشکسالی، شاخص، GRI ،ARIMA- SARIMA.

مقدمه

خشکسالی هیدرولوژیکی، خشکسالی کشاورزی و خشکسالی اجتماعی-اقتصادی (;Dikshit et al., 2021;) برای بررسی و Mishra & Singh, 2010; Li et al., 2024). برای بررسی و تحلیل شرایط خشکسالی، شاخصهای متعددی توسعه یافته و به کار گرفته شدهاند که میتوان به شاخص بارش استانداردشده (SPI)، جریان استانداردشده (SDI)، بارش و تبخیر- تعرق استاندارد شده (SPEI)، شاخص اکتشاف

خشکسالی یک پدیده آبوهوایی طبیعی موقتی و پیچیده است که نسبت به سایر بلایای طبیعی، جمعیت Nguyen et al., 2017; کمیدهد (Tsakiris et al., 2007; Wang et al., 2021). با توجه به متغیرهای آبوهوایی مرتبط با خشکسالی، چهار نوع مختلف از این پدیده تعریف شده است: خشکسالی هواشناسی،

خشکسالی (RDI)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) اشاره کرد (,GRI) و 2024; McKee et al., 1993; Yuan et al., 2023 همکاران، ۱۳۹۵).

در زمینه تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی، ابزارهای مختلف تحت عنوان شاخصهای خشکسالی پیشنهاد شده است. یکی از این روشها، شاخص GRI است که با استفاده از دادههای تراز آب زیرزمینی، وضعیت خشکسالی را بهصورت کمی توصيف مي كند (زندى فر و همكاران، ١٣٩٨). اين شاخص در بررسى خشكسالىهاى دشتهاى مختلف ايران مورد استفاده قرار گرفتهاست. بهعنوان مثال، زندیفر و همکاران (۱۳۹۸) از این شاخص برای تحلیل خشکسالیهای حوضه آبریز زهره-جراحی طی دوره آماری ۱۳۸۵–۱۳۹۵ استفاده کردند و نشان دادند که تأثیر کاهش بارش بر تراز آب زیرزمینی، حدود ۶ ماه تاخیر دارد. همچنین، خسروی دهکردی و همکاران (۱۳۹۸) با بهکارگیری شاخص GRI، پایش خشکسالیهای دشت شهرکرد را در دوره آماری ۱۳۶۴–۱۳۹۴ انجام دادند و با استفاده از زنجیره مارکوف برای پیشبینی خشکسالی، نتیجه گرفتند که در آبان ۱۳۷۲، شاخص GRI به بالاترین مقدار خود (معادل ۱/۸۳) رسید.

برای پیشبینی خشکسالی، روشهای مختلفی پیشنهاد شده که بیشتر آنها مبتنی بر مدلهای تصادفی و احتمالاتی هستند. در مدلهای سری زمانی، نویز یا خطای تصادفی که ناشی از عوامل غیرقابل پیشبینی است، در مدلسازی لحاظ می شود. برخی مدل ها، مانند زنجیره مارکوف، به گونهای طراحی شدهاند که مقدار متغیر در زمان فعلی را براساس مقادیر قبلی پیشبینی میکنند (زندی و همکاران، ۱۳۹۸). در تحقیقی مشابه جانی (۱۳۹۸) از مدلسازی سری زمانی ARIMA برای تحلیل تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت تبریز در مقیاس ۴۸ ماهه استفاده کرده و با اعمال روش تجزیه خوشهای، ایستگاهها را به ۷ کلاس تفکیک کرده و برای هر کلاس مدلسازی جداگانهای انجام داد. نتایج مطالعه نشان داد که افزایش نوسان در دادههای سری زمانی موجب کاهش دقت مدل ARIMA می شود. عظیمی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی در ایران پرداخته و از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص منابع آب

زیرزمینی (GRI) بهعنوان معیارهای اصلی برای تحلیل تغییرات خشکسالی استفاده کردند. در این پژوهش، با بهره گیری از مدل زنجیره مارکوف، دادههای بیش از ۲۶ هزار چاه و ۶۰۰ ایستگاه هواشناسی طی یک بازه ۲۰ ساله ارزیابی شده و روند پایداری خشکسالی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که احتمال وقوع خشکسالی از ۶۲ درصد در دوره یافته است. در مجموع، میانگین احتمال وقوع خشکسالی در کل منطقه مطالعه تا حدود ۶۴ درصد برآورد شد. عزیزی و زیرزمینی دشت ورامین را با استفاده از شاخصهای ISTOR زیرزمینی دشت ورامین را با استفاده از شاخصهای GRI و NISTOR بررسی کردند و نتایج نشان داد که شاخص ISTOR در هنگام بروز خشکسالی از وضعیت نرمال به خشکسالی شدید تغییر میکند، که یافتههای شاخص NISTOR نیز این

بهمنظور مدیریت بهینه منابع آب و کاهش خسارات ناشی از خشکسالی، پیشبینی آن امری ضروری است (Buri et al., 2025). در این راستا، روشهای متعددی ارائه شده که مدلهای سری زمانی از رایجترین آنها محسوب میشوند Araghinejad et al., 2017; Batool et al., 2025; Van) Loon et al., 2012; Yan et al., 2017). مدل های تصادفی خطی مانند ARIMA و مدل میانگین متحرک یکپارچه خودهمبسته فصلی (SARIMA) بهطور گسترده در هیدرولوژی مورد استفاده قرار گرفتهاند (Mishra & Desai, 2005). موساد و العربا (۲۰۱۵) نشان دادند که مدل ARIMA توانایی بالایی در پیشبینی خشکسالی بر اساس شاخص SPEI دارد. این مدل انعطاف پذیر بوده و از پرکاربردترین مدلهای پیشبینی در مطالعات مربوط به خشکسالی است. خو و همکاران (۲۰۲۰) برای بهبود پیشبینی خشکسالی، مدل ترکیبی ARIMA-SVR را که ترکیبی از ویژگیهای خطی و غیرخطی مدلهای دادهمحور است، بررسی کردند. در این مطالعه، شاخص استاندارد بارش (SPI) در مقیاسهای ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه برای استان هنان چین تحلیل شد. مقایسه عملکرد مدل ترکیبی با مدل ARIMA نشان داد که دقت پیشبینی با افزایش مقیاس زمانی بهبود یافته اما با افزایش زمان پیشبینی کاهش مییابد. مدل ARIMA-SVR نسبت

به ARIMA، خصوصاً در بازههای ۱ تا ۲ ماهه، دقت بالاتری داشت. همچنین، برای تحلیل فضایی دقت پیشبینیها از روش کریجینگ در نرمافزار ArcGIS استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی برتری قابلتوجهی در پیشبینی خشکسالی دارد. عاقل پور و همکاران (۲۰۲۱) نیز با محاسبه شاخص SDI در پنجرههای زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه، اقدام به پیش بینی خشکسالی با استفاده از مدل سری زمانی کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل SARIMA برای پنجرههای زمانی ۱، ۳، ۶ و ۹ ماهه مناسب بوده، اما در پنجره زمانی ۱۲ ماهه مدل ARIMA عملکرد بهتری دارد. در زمینه پیشبینی شاخص GRI نیز مطالعاتی انجام شده است. فرزین و همکاران (۲۰۲۲) با معرفی یک رویکرد ترکیبی نوین، به پیشبینی تراز آب زیرزمینی (GWT) و تحلیل خشکسالی پرداختهاند. آنها برای مدلسازی سریهای زمانی GWT، از ترکیب مدل حافظه طولانی-کوتاه دوطرفه (BLSTM) و الگوریتم بهینهسازی شاهین هریس (HHO) بهره گرفته و عملکرد این مدل را با روش های ANN، SARIMA، ARIMA و LSTM و LSTM مقایسه کردهاند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل –BLSTM HHO از نظر دقت پیشبینی برتری قابلتوجهی داشته و در مقایسه با سایر روشها، عملکرد بهتری بر اساس معیارهای NSE ،RRMSE و dr ارائه میدهد. تحلیل دادههای مربوط به سالهای ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ در سه آبخوان منتخب حاکی از کاهش سطح آب زیرزمینی بوده است. علاوه بر این، ارزیابی خشکسالی بر مبنای شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI) نشان داد که روند خشکسالی در سالهای آینده تداوم خواهد داشت و شدت آن افزایش خواهد یافت.

خشکسالی موجب کاهش دسترسی به منابع آب، بهویژه آبهای زیرزمینی، است که منجر به محدودیتهای قانونی در اجرای طرحهای توسعه پایدار منابع آب می شود. آبخوان دشت اردبیل بهعنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب کشاورزی و شرب، در سالهای اخیر با خشکسالیهای پی در پی مواجه شده که کاهش منابع آب سطحی و برداشت بیش از حد از آبهای زیرزمینی را در پی داشته است. این روند موجب افت شدید تراز آبخوان شده است. بررسی منابع نشان می دهد تاکنون خشکسالیهای دشت اردبیل با شاخص GRI تحلیل نشده و مدل سازی سریهای زمانی برای پیش بینی آن

انجام نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه، پایش تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت اردبیل با شاخص GRI و پیشبینی آن با استفاده از مدلهای تصادفی سری زمانی است.

مواد و روشها منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت اردبیل با مساحتی بالغ بر ۲۸۰۴/۷ کیلومترمربع در قسمت شمال غرب ایران، بین عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی واقع شده است. دشت اردبیل از شمال به مرز ایران و آذربایجان، از شرق به ارتفاعات تالش، از جنوب به رودخانه آرپاچای و از غرب به دامنه کوه سبلان منتهی میشود. تنها راه خروجی دشت اردبیل رودخانه قرهسو بوده میشود (حسینی و خوش سیما چنار، ۱۴۰۳ ؛ کرد و همکاران، میشود (حسینی و خوش سیما چنار، ۱۴۰۳ ؛ کرد و همکاران، عبور خود از دشت اردبیل، آب رودخانه بالیخلی چای را نیز در خود جمع کرده و در محلی به نام اصلاندوز به ارس می ریزد. حجم آورد سالانه آن حدود ۵۵۴ میلیون مترمکعب است (اکبرینیازی و همکاران، ۱۴۰۲).

بر اساس شاخص دومارتن، اقلیم اردبیل از نوع نیمهخشک بوده (طاوسی و دلآرا, ۱۳۹۷) و براساس دادههای هواشناسی، میانگین بارش سالانه دشت اردبیل حدود ۲۷۳ میلیمتر است. پرباران ترین و کمباران ترین ماه در این دشت به تر تیب، اردیبهشت و مرداد با متوسط بارش ۴۴/۵ و ۴/۵ میلیمتر هستند. میانگین دمای ایستگاه سینوپتیک اردبیل برابر با ۹/۹ درجه سلسیوس است. حداکثر دمای ثبت شده اردبیل در تابستان ۴۴ درجه سلسیوس و حداقل دمای ثبت شده در زمستان ۸/۳۳ - درجه سلسیوس است. همچنین، متوسط تعداد رورهای بارانی، برفی و یخبندان در اردبیل به تر تیب، ۱۰۰، ۳۴ و ۲۲۷ روز در سال میباشد (دانشور و ثوقی و همکاران، ۱۳۹۸) طاوسی و دل آرا، ۱۳۹۷، بینام، ۱۳۹۱). آبخوان دشت اردبیل دارای ۲۴۸۳ حلقه چاه بهرهبرداری، ۱۴ دهنه چشمه و ۲۶ و صنعت را برآورد میکند. در مطالعه حاضر، آمار ۴۸ حلقه چاه مشاهداتی در مقیاس دشت اردبیل و نیز چاههای مشاهداتی منتخب را نشان

ماهانه در خلال سال.های آبی ۸۴–۱۳۸۳ تا ۱۴۰۰–۱۳۹۹ می.دهد. مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی آبخوان



شکل ۱- محدوده آبخوان دشت اردبیل و موقعیت چاههای مشاهداتی منتخب. Figure 1- Ardabil Plain Aquifer Area and Location of Selected Observation Wells.

دادههای مورداستفاده

دادههای موردنیاز پژوهش حاضر از شرکت آب منطقهای استان اردبیل اخذشده است که از بین آمار ۵۲ حلقه چاه مشاهداتی، ۴۸ حلقه چاه که دارای دوره آماری مشترک (۱۴۰۰-۱۳۸۳) بود، برای مطالعه حاضر انتخاب گردید. به منظور تحلیل دادههای چاههای مشاهداتی با استفاده از روش-های آماری نرمالیته، خلاء آماری و وجود داده پرت مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا پس از آمادهسازی سری زمانی دادهها، مشخص شد که ۱۲ چاه مشاهداتی در سالهای مختلف دارای کمبود داده بوده که با استفاده از روشهای حداقل مربعات و رگرسیون خطی تکمیل شدند. سیس نرمال-بودن و همگنی دادههای اصلی به ترتیب از طریق آزمون

کلموگروف-اسمیرنوف و ران تست در نرم افزار Minitab مورد ازیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصله، تراز آبخوان دشت اردبیل با استفاده از روش تیسنبندی در نرم افزار Arc GIS محاسبه گردید. سپس با در دستداشتن سری زمانی تراز آبخوان در مقیاس زمانی سالانه در دوره آماری مذکور شاخص GRI در مقیاسهای زمانی یک، سه، شش، نه و ۱۲ ماهه محاسبه گردید. با استفاده از روش مدلهای سریهای زمانی تصادفی مناسبترین مدل در هر پنجره زمانی مشخص شد و در نهایت شاخص مذکور برای سالهای آتی با توجه به مدل سری زمانی برازش یافته پیش بینی شد.

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

انواع شاخصهای خشکسالی در متون مختلف وجود دارد. یکی از آنها که با تراز آب زیرزمینی قابل محاسبه است، شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) است. این شاخص در ابتدا توسط مندسینو و همکاران (۲۰۰۸) معرفی و بهعنوان شاخصی باقابلیت اعتمادپذیری بالا برای مدلسازی، پایش و پیشبینی خشکسالی شناخته شده است (خسرویدهکردی و همکاران، خشکسالی شناخته شده است (خسرویدهکردی و همکاران، و سپس برای کل دشت با میانیابی به روشهای مختلف و رسم نقشههای مکانی بسط داده میشود (زندیفر و همکاران، رسم نقشههای مکانی بسط داده میشود (زندیفر و همکاران، رسم این شاخص با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Mendicino et al., 2008):

$$GRI_{y,m} = \frac{(D_{y,m} - \mu_{D,m})}{\sigma_{D,m}} \tag{1}$$

که در آن $GRI_{y, m}$ بیانگر مقدار شاخص مذکور در ماه m از w سال y، مقدار $D_{y, m}$ تراز سطح ایستابی در ماه m از سال y $\mu_{D, m}$ میانگین طولانی مدت سطح ایستابی ماه m در طول D سال دوره آماری و مقدار $\sigma_{D,m}$ انحراف معیار دادههای سطح ایستابی ماه m برای D سال میباشد. توصیف کیفی خشکسالی و ترسالی با توجه به شاخص GRI در جدول (۱) ارائهشده است 2008 et al., 2008).

جدول ۱- طبقهبندی شدت شاخص GRI جدول ۱- طبقهبندی شدت شاخص (2008

Table 1 - Classification of GRI Index Severity (Mendicino et al., 2008)	
GRI values	Drought class
≥2	Extremely wet
1.5 to 1.99	Severly wet
1 to 1.49	Moderately wet
0.99 to -0.99	Normal
-1 to -1.49	Moderately dry
-1.5 to -1.99	Severly dry
≤-2	Extremely dry

مدلهای سری زمانی

پس از محاسبه شاخص GRI آبخوان دشت اردبیل، از مدلهای سری زمانی برای مدلسازی و سپس پیش بینی پدیده خشکسالی استفاده شد (Box and Jenkins, 1976). به این منظور، ایستایی سری دادههای مشاهداتی GRI مورد آزمون واقع شده و سپس مدلهای باکس-جنکنز شامل مدلهای

خودهمبسته (AR)، میانگینمتحرک (MR)، مدل خودهمبسته-میانگین متحرک (ARMA) و مدل غیرفصلی میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه (ARIMA) برای هر سری ارزیابی گردید. همچنین مدل فصلی SARIMA نیز برای هرکدام از سریها آزمایش شد (Box and Jenkins, 1994).

مدل خود همبسته^(AR)

مدلهای خودهمبسته (AR) با استفاده از یک رابطه خطی مقدار کمیت مورد بررسی (در اینجا شاخص GRI) را در زمان t به مقادیر نظیر در زمانهای پیشین شامل زمانهای -t 1، 2-t، ... و t- ربط میدهد (Box et al., 1994). این مدل بهشرح زیر در نظر گرفته شد (Salas, 1980):

$$\begin{split} Z_t &= \varphi_1 Z_{t-1} + \varphi_2 Z_{t-2} \dots \\ &+ \varphi_p Z_{t-p} + \varepsilon_t \end{split} \tag{7}$$

که در آن φ ها ضرایب مدل خود همبسته یا اتور گرسیو و \mathcal{F}_i مقدار خطای مدل در زمان t میباشد. در عمل برای اکثر سریهای هیدرولوژیکی تعداد گامهای پیشین محدود بوده و آن را با q نشان میدهند. در این مطالعه q با رسم نمودار تابع خودهمبستگی مشاهدات نمونه⁷ (ACF) و نیز نمودار خودهمبستگی جزئی⁷ (PACF) تخمین زده شدند.

مدل میانگین متحرک (MA)

در مدل میانگین متحر \mathcal{O}^{\dagger} (MA) مقدار متغیر مورد بررسی در زمان t با y و میانگین سری با \overline{y} در نشان داده میشود. در عمل برای مدلبندی سری زمانی از متغیر جدید موسوم به $Z_t = y_t - \overline{y}$ استفاده میشود که در آن $\overline{y} - \overline{y}$ است. در مدل MA سری زمانی فاقد حافظه است، بهعبارت دیگر مقدار متغیر نرمال شده در زمان t فقط به نویز (نوسان) در چند گام پیشین بستگی دارد. مقدار نویز در زمان t با z_t نشان داده می شود. در عمل تعداد گامهای پیشین محدود بوده و آن را با p نشان میدهند. بنابراین، مدل MA از مرتبه p بشرح زیر در نظر گرفته شد (1994; Box et al., 1997; Box et al., 1997)

$$Z_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}$$
(**Y**)

که درآن θ ضرایب مدل MA میباشند. تعداد گامها یا q با رسم نمودار ACF مشاهدات نمونه و نیز نمودار PACF تخمین زده شدند. گرچه راههای مختلفی برای قضاوت پیرامون برازش مدل با مشاهدات وجود دارد، با این حال در مطالعه فعلی، به

¹AutoRegressive (AR)

²Autocorrelation Function (ACF)

³Partial Autocorrelation Function (PACF)

⁴Moving Average (MA)

علت سادگی مدل در یک دیاگرام رسم و به بررسی شباهت آنها پرداخته شد.

مدل خود همبسته-میانگین متحرک ARMA

مدل تلفیقی خود همبسته-میانگین متحرک (ARMA)، از ترکیب مدلهای AR و MA حاصل میشودکه این ARMA نسبت به دو مدل AR و MA انعطاف پذیری و کارایی بیشتری دارد. از رابطه ۴ مقدار ARMA محاسبه می شود Box and) (Jenkins, 1994).

$$Z_{t} = \phi_{1} Z_{t-1} \dots + \phi_{p} Z_{t-p} + \varepsilon_{t} - \theta_{1} \varepsilon_{t-1} \dots - \theta_{q} \varepsilon_{t-q} \qquad (\texttt{f})$$

مدل میانگین متحرک خود همبسته یکپارچه ARIMA

مدل ARIMA یک مدل غیر فصلی از سری مدلهای باکس-جنکینز بوده که از ترکیب عملگرهای AR با مرتبه p و MA با مرتبه p بهدست می آید. مدل ARIMA که در رابطه ۵ نشانداده شده است برای جهت حذف ناایستایی مدل از عمل تفاضل گیری مرتبه لمام بهره گرفته شده است. از این جهت مدلهای ARIMA براساس مقادیر سه پارامتر اصلی مدل، دسته بندی می شوند (Box and Jenkins, 1994).

$$(\Delta)$$
 $(\Phi(B)
abla_{zt}^{d} = heta(B)a_{t}$ (۵) که در آن، $(B) e$ و $(B) e$ به ترتیب چندجملهایهای مرتبه $(B) e$ و $(B) e$ بوده که در رابطه ۶ و ۲ محاسبه شده است.

$$\varphi(\mathbf{B}) = (1 - \varphi 1 B - \varphi 2 B^2 - \cdots \varphi p B^p \qquad (\hat{\mathbf{y}})$$

$$\theta(B) = (1 - \theta 1B - \theta 2B^2 - \dots \theta qB^q \qquad (Y)$$

بهطور کلی ARIMA از سه مرحله تعیین q، b و q با استفاده از نمودار ACF و PACF جهت برآورد q و q و بررسی باقی-ماندههای مدل به منظور ارزیابی چگونگی برازش مدل به سری مورد بررسی تشکیل میشود. (Box and Jenkins, 1994).

مدل فصلی SARIMA

مدل SARIMA همانند مدل ARIMA بدون حذف خاصیت فصلی میباشد این مدل به شرح زیر در نظر گرفته شد:

 $\emptyset(B)\emptyset(B^{s})(1-B)^{d}(1-B^{s})^{D}(Z_{t}^{(\lambda)}-\mu_{t})=\theta(B)\Theta(B^{s})a_{t} \quad (\Lambda)$

که در آن Z_t نمایانگر داده مشاهداتی در زمان s ،t بیانگر تعداد فصل در یک سال و مؤلفه نویز a_t میباشد. در رابطه ۵، مؤلفههای اتورگرسیو (AR) عبارتاند از $\phi(B^{(S)})$ و

که به ترتیب بیانگر مؤلفه فصلی و غیر فصلی با مرتبههای p و p میباشند. همچنین مؤلفه میانگینمتحرک (MA)، در رابطه 0 = 0 میباشند. همچنین مؤلفه میانگینمتحرک (MA)، در رابطه 0 = 0 = 0 و $\theta(B^s)$ و $\theta(B)$ به ترتیب مربوط به مؤلفههای فصلی و غیر فصلی با مرتبههای p و Q میباشد. عملگرهای تفاضلی فصلی و غیر فصلی به ترتیب با $(B = 1)^{b} = 0$ و $(1 - B^{s})^{c}$ و نشان داده شدهاست. همچنین Λ بیانگر ضریب مربوط به تبدیل باکس–کاکس میباشد (Box et al., 1994).

شاخصهای ارزیابی مدل

بهمنظور پیشبینی شاخص GRI از مدلهای تصادفی سری زمانی ARIMA و SARIMA استفاده شد. دادههای مورداستفاده دارای مقیاس ماهانه بوده و از کل ۱۸ سال دوره آماری (۲۰۰۴ تا ۲۰۲۱)، تعداد ۱۷ سال (۲۰۴ ماه) برای واسنجی مدل و یک سال آخر (۱۲ ماه) برای صحتسنجی آن در نظر گرفته شد. برای ارزیابی عملکرد مدل، مقادیر پیشبینیشده توسط سریهای زمانی با مقادیر واقعی مقایسه گردید. در این راستا، از معیارهای ارزیابی شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (۲۵)، آماره آکائیک (AIC)، میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NS) مطابق روابط زیر استفاده شد:

RMSE=
$$\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_{i}-f_{i})^{2}}$$
 (9)

$$R^{2} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{\overline{y}})(f_{i} - \overline{f})}{2}\right]^{2} \qquad (1 \cdot)$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^* \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (f_i - \bar{f})}}$$

AIC=2LN(MSE)+2m (11)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - f_i)^2$$
(17)

NS=1-
$$\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}$$
 (17)

که درآن i y و y بهترتیب مقدار مشاهداتی ilم و میانگین \overline{f} و \overline{f} سری زمانی تاریخی میباشد. همچنین مؤلفههای f_i و \overline{f} و \overline{f} بهترتیب نمایانگر دادههای پیشبینی و میانگین آنها بوده و m در رابطه ۸ بیانگر مجموع مرتبههای مربوط به بخش میانگین متحرک یا p و بخش خودهمبسته یا p (یا مجموع میانگین میانگین مجموع میانگین موروط به بخش میانگین متحرک یا p و بخش خودهمبسته یا g (یا مجموع میانگین میانگین محموع مور میانگین آن ها بوده و میانگین آنها بوده و میانگین آنها بوده و میانگین آنها بوده و میانگین آنها بوده و m در رابطه ۸ بیانگر مجموع مرتبههای مربوط به بخش میانگین متحرک یا p و بخش خودهمبسته یا c (یا مجموع میانگین میانگین محموع میانگین محموع مور میا و (p+q R²) میباشد. در آماره MSE، مقادیر نزدیک به مقدار RS به عدد یک نزدیک تر باشد، نشاندهنده دقت بالاتر مدل در فرآیند پیشبینی خواهد بود. بازه MSE از صفر تا مثبت در فرآیند پیشبینی خواهد بود. بازه MSE از صفر تا مثبت مینهایت متغیر است، بهطوری که مقدار صفر نشاندهنده

تطابق کامل مدل با دادهها بوده و مقادیر بزرگتر نشاندهنده کاهش دقت مدل است. بنابراین، هرچه مقدار MSE کمتر باشد، مدل عملکرد بهتری خواهد داشت. ACI معیاری برای انتخاب مدل بهینه در تحلیلهای آماری محسوب میشود. مقدار این شاخص از منفی بینهایت تا مثبت بینهایت متغیر است. با این حال، مقدار AIC به تنهایی قابل تفسیر نیست، بلکه باید در مقایسه با سایر مدلها مورد بررسی قرار گیرد تا مدل بهینه انتخاب شود.

نتایج و بحث

تراز آب زیرزمینی آبخوان دشت اردبیل

شکل ۲ هیدروگراف واحد آبخوان دشت اردبیل که با استفاده از روش تیسنبندی رسم گردیده را نشان میدهد. براساس شکل فوق که برای دوره آماری (۲۰۲۱–۲۰۰۴) رسم شدهاست، افت سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت اردبیل در دوره ۱۸ ساله مشهود میاشد. مقدار کل افت تراز سطح ایستابی در طول ۱۷ سال در آبخوان دشت اردبیل ۵/۳۶ متر میباشد به عبارت دیگر، متوسط افت تراز سالانه آبخوان ۲۰/۳ متر در سال میباشد.



شکل ۲-آبنمود آبخوان دشت اردبیل در دوره آماری ۱۷ ساله (۲۰۰۴-۲۰۰۴).

Figure 2 - Hydrograph of Ardabil Plain Aquifer over an 17-year statistical period (2004-2021).

پایش شاخص GRI در دوره تاریخی (۲۰۲۱-۲۰۰۴)

محاسبه شاخص GRI در آبخوان دشت اردبیل، در مقیاسهای زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه انجام شد. شکل ۳ شاخص خشکسالی GRI را در مقیاسهای زمانی مختلف در دوره آماری ۱۸ ساله (۲۰۰۴–۲۰۲۱) نشان میدهد. با توجه به شکل ۳ میتوان نتیجه گرفت که در مقیاسهای زمانی مختلف و در طول دورهی آماری، شاخص خشکسالی GRI در پنج مقیاس زمانی بهتدریج از حالت مثبت به حالت منفی تغییر علامت داده است که مفهوم آن این است که در دشت اردبیل

با توجه به تراز آب زیرزمینی در طول دوره آماری بهتدریج از ترسالی به سمت خشکسالی حرکت کرده است. با توجه به شکل ۳، در مقیاس زمانی یکماهه شاخص GRI، در سالهای ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ در ترسالی شدید بوده و در سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ نیز از حالت ترسالی متوسط به سمت نزدیک به نرمال روی آورده است. همچنین در سالهای ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ ترسالیهای متوسط تا شدید بهتناوب رخ دادهاست ولی از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۲۰ شاخص از حالت نزدیک به نرمال سمت خشکسالی شدید حرکت کرده است. در حالت کلی، در مقیاسهای زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه شاخص GRI طی سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴ از ترسالی شدید به سمت نرمال تغییر کردهاست. درحالیکه که شاخص GRI در مقیاسهای زمانی مختلف از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۲۰ از حالت نزدیک به نرمال به حالت خشکسالی شدید تغییر موضع دادهاست. برایناساس بعد از سال ۲۰۱۳ به علت برداشتهای بیرویه آب از آبخوان دشت اردبیل همواره وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی در منطقه حاکم بودهاست، زیرا که مقدار GRI در تمام مدت بعد از سال ۲۰۱۳ منفی میباشد.



Time (monthly)

شکل ۳-نمودار شاخص GRI در مقیاسهای زمانی مختلف در آبخوان دشت اردبیل (۲۰۲۱–۲۰۰۴). Figure 3 - GRI index chart over different time scales in Ardabil plain aquifer (2004-2021).

بصورت خطچین دیده می شود و مقدار ضریب خودهمبستگی به ازای تاخیرهای مختلف (از ۱ تا ۵۰) با نمودارهای ستونی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ می توان یک روند ترکیبی از امواج نمایی و سینوسی ضعیف را (برای هر یک از پنج پنجره زمانی) مشاهده نمود. همانگونه که از شکل ۴ می توان مشاهده کرد، در هر کدام از پنجرههای زمانی ا GRI، GRI، GRI۵، GRI۵ و GRI۶ تعداد ۱۵ تاخیر زمانی از باند اطمینان عبور کرده است. در پنجره زمانی ۲۱ ماهه می توان مشاهده کرد که هرچه تعداد تاخیرها افزایش یابد، مقدار ضریب همبستگی (بجز در موارد اندک) کاهش می یابد. همه ضرایب خود همبستگی (در هر پنجره زمانی) مثبت بوده که

مدلسازی زمانی شاخص GRI نمودارهای ACF و PACF

بهمنظور پیشبینی شاخص خشکسالی GRI، لازم است از بین مدلهای مختلف سریهای زمانی مناسب ترین آنها، انتخاب شود. بر این مبنا، برای سریهایی که دارای روند فصلی بودند، از مدلهای فصلی استفاده شد. اما برای سریهایی که فاقد روند فصلی بودند، از مدلهای غیر فصلی بهره گرفته شد. فاقد روند فصلی بودند، از مدلهای غیر فصلی بهره گرفته شد. بهمنظور شناسایی رفتار شاخص GRI، از نمودار تابع خود همبسته (ACF⁵) استفاده گردید. شکل ۴، نمودارهای ACF را برای سریهای زمانی GRI در مقیاسهای زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و

⁵Auto-Correlation Function

نمایانگر ارتباط مقدار GRI در هر زمان با مقدار آن در محل تقاطع نمودار ACF با باند اطمینان در نظر گرفته زمانهای پیشین است. تعداد زمانهای قبل با توجه به شکل، می شود.



شکل ۴- نمودارهای ACF نظیر شاخص GRI با مقیاسهای زمانی مختلف برای آبخوان دشت اردبیل در دوره آماری (۲۰۲۱-۲۰۰۴). Figure 4 - ACF plots corresponding to the GRI index with different time scales for the Ardabil plain aquifer during the statistical period (2004-2021).

تجاوز کردهباشد. طبق شکل ۵، در پنجرههای زمانی GRI₁، GRI₁ GRI₀، GRI₆، GRI₃ و GRI₉، GRI₆، GRI₃ متلاقی و عبور کرده از باند اطمینان بهترتیب دو، دو، یک، یک و یک تاخیر زمانی است که این اعداد مرتبه نظیر میانگین متحرک را در مدلسازی مشخص می سازد. در شکل ۵ نمودارهای خودهمبستگی جزئی (PACF⁶) را برای شاخص GRI در مقیاسهای زمانی مختلف نشان میدهد. در این شکل باند اطمینان ۹۵ درصد به صورت خط چین رسم شدهاست و مقدار PACF با خطوط عمودی نشان داده شدهاست. تعداد مرتبهی نظیر میانگین متحرک از شکل مذکور عبارتاند از آن تعداد از خطوط قائم که از باند اطمینان

⁶Partial AutoCorrelation Function



شکل ۵- نمودارهای توابع خود همبسته جزئی (PACF) نظیر سریهای زمانی GRI در مقیاسهای زمانی مختلف در آبخوان دشت اردبیل در دوره آماری (۲۰۲۱–۲۰۰۴).

Figure 5 - Partial Auto-Correlation Function (PACF) plots corresponding to the GRI time series at different time scales in Ardabil plain aquifer during the statistical period (2004-2021).

دادههای آبخوان دشت اردبیل را نشان می دهد. در این نمودار، محور قائم مقادیر پیش بینی شده از مدل سری زمانی و محور افقی مقادیر مشاهده شده می باشد. در ادامه، هم بستگی میان دادههای مشاهداتی و پیش بینی شده محاسبه شد. بر اساس شکل ۲، پنجرههای زمانی یک ماهه و سه ماهه، با ضرایب تعیین ۹/۰ و ۰/۶۵ دارای هم بستگی خوبی بوده، در حالی که پنجره زمانی ۱۲ ماهه با ضریب تعیین ۰/۰۹، نشانگر هم بستگی ضعیف در بین دادههای مشاهداتی و محاسباتی است.

بررسی عملکرد مدلهای سری زمانی در پیشبینی GRI

جدول ۲ نتایج آزمون مدلسازی سریهای زمانی مختلف GRI برای هر یک از پنجرههای زمانی مورد استفاده نشان میدهد. براساس اطاعات جدول مذکور میتوان نتیجه گرفت که در پنجره زمانی سهماهه مناسب ترین مدل سری زمانی به صورت (SARIMA(5,1,0)(0,2,2 بود. به طوری که در مدل فوق مقدار آماره RMSE برابر ۲/۶۳ متر، مقدار NS برابر ۲/۵۳ و مقدار AIC معادل ۹۵/۶ می باشد. شکل ۶، نمودار پراکنش



جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل های مختلف سری زمانی نظیر شاخص GRI. Table 2 - Results of evaluating various time series models corresponding to the GRI index.

شکل ۶-نمودار پراکنش دادههای مشاهداتی و پیشبینیشده با مدل SARIMA و شاخص GRI در آبخوان دشت اردبیل در

دوره آماری ۲۰۲۱–۲۰۲۲.

Figure 6 - Scatter plots of the observed and the predicted values using the SARIMA model and GRI index in Ardabil Plain aquifer in the period 2021-2022.

GRI، از شاخصهای ارزیابی مدل مانند شاخصهای GRI، با توجه به نتاج حاصله به منظور انتخاب مدل مناسب برای R² ، RMSE و NS بهره گرفته شد. بدین منظور، در ابتدا پیشبینی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص مدلهایی که دارای مقادیر بالای AIC بودند، حذف شدند تا

انتخاب مدل برتر



Figure 7 - Time series plots of the observed and calculated GRI index using the three and 12-months time scales in the period 2021-2022.

تحليل باقىماندەهاي مدل و بررسي صحت پيشبينىها

بهمنظور بررسی کمتخمینی^۷ یا بیشتخمینی^۸ مدلهای ARIMA و SARIMA در پیشبینی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص GRI، از شاخصهای مختلف ارزيابي مدل مانند AIC ، R² ، RMSE و NS استفاده شد. نتایج نشان داد که بهطور کلی، مدل های ARIMA و SARIMA با توجه به آمارهها، عملكرد مطلوبي براي مدل ARIMA داشته است. مقادیر AIC پایین تر از مدل SARIMA بوده، که نشان دهنده تناسب بهتر مدل با دادهها و جلوگیری از پیچیدگی غیرضروری در مدل است. این نتایج نشان میدهد که مدلها نه تنها بیشتخمینی نشدهاند، بلکه در مقایسه با دادههای واقعی، از عملکرد مناسبی برخوردار بودند. در مورد كم تخميني، براساس ارزيابي ها و مقايسه پيش بيني ها با مقادير واقعی، مدلها بهخوبی قادر به شبیهسازی روندهای خشکسالی بوده و عاری از خطاهای بزرگ بودند. همچنین، در برخی از دادهها که رفتار فصلی واضحی داشتند، مدل

مدلهای متناسبتر باقی بمانند. برایناساس، مدلهای مربوط به پنجرههای زمانی ۶، ۹ و ۱۲ ماهه بهدلیل داشتن مقادیر AIC بالا حذف شدند. سیس برای انتخاب مدل بهینه، از شاخص عملکرد RMSE استفاده شد که پنجرههای زمانی ۱ ماهه و ۳ ماهه که کمترین مقادیر RMSE را داشتند، بهعنوان مدلهای بهینه شناسایی شدند. در گام بعدی، از معیارهای NS و R² برای ارزیابی دقیقتر عملکرد مدلها استفاده شد. مدل ینجره زمانی ۳ ماهه با مقدار NS برابر با ۱/۵۳ و مدل ۱ ماهه با NS برابر با ۲۳/۰ عملکرد بهتری را در این شاخص نشان دادند. از سوی دیگر، مقدار آماره R² برای مدلهای ۱ ماهه و ۳ ماهه بهترتیب برابر با ۰/۹ و ۰/۶۵ بود که نشان دهنده عملکرد بهتر مدل ۱ ماهه در پیشبینی خشکسالی هیدرولوژیکی دشت اردبیل با توجه به این شاخص است.

با این حال، GRI3 با توجه به اکثر معیارهای ارزیابی (بهویژه در مقایسه با مدلهای دیگر، خصوصاً مدل ۱ ماهه) عملکرد بهتری داشته که بههمین دلیل بهعنوان مدل برتر برای دشت اردبیل انتخاب شد. هرچند مدل ۱۲ ماهه در شاخص NS عملکرد بهتری نسبت به سایر مدلها داشت، اما در دیگر شاخصها مانند R² عملکرد ضعیفتری نشان داد. بنابراین، براساس تحليل تمام شاخصها، مدل ۳ ماهه بهعنوان مناسبترین مدل و مدل ۱۲ ماهه بهعنوان بدترین مدل شناسایی شد.

باتوجه به نتایج حاصله، می توان ادعا کرد که مدل های سری زمانی توانایی مطلوبی در پیشبینی شاخص هیدرولوژیکی GRI در پنجرههای زمانی مختلف، بهویژه در پنجرههای زمانی کوتاهمدت دارد. در نتیجه، در دشت اردبیل از بین پنج پنجره زمانی مختلف مورداستفاده، پنجره زمانی سهماهه (GRI₃) بهترین پیشبینی را تولید نموده و پنجره زمانی ۱۲ ماهه (GRI₁₂) نامطلوب ترین جواب را ارائه کرد. در این مورد می توان مجددا به شکل ۷ که در آن روند تغییرات GRI مشاهداتی و پیشبینی شده نشان داده شده کرد. طبق شکل ۷، در پنجره زمانی سهماهه مقادیر GRI همپوشانی مطلوبی بین دادههای مشاهداتی و محاسباتی داشته ولی در پنجره زمانی ۱۲ ماهه، همپوشانی ضعیف میباشد.

⁷Underfitting

⁸Overfitting

SARIMA (که به طور خاص برای داده های فصلی طراحی شده بود) دقت بالاتری نسبت به مدل ARIMA نشان داد. با این حال، برای اطمینان از اینکه مدل ها دچار بیش تخمینی نشده اند، تمام داده ها از طریق آزمون های تشخیص بیش برازش (مثل تحلیل مانده ها) بررسی شدند. نتایج نشان داد که سری مانده های مدل ها، حالت تصادفی داشته و در ضمن، پیش بینی ها با توجه به معیارهای ارزیابی مورد استفاده (بخصوص R2 و NS) عملکرد مناسبی را ارائه نمودند. بنابراین، نتایج این تحقیق نشان دهنده عدم وجود مشکلات عمده در مورد کم تخمینی یا بیش تخمینی مدل ها بوده و مدل ها به طور مؤثری توانستند خشک سالی هیدرولوژیکی را پیش بینی کنند.

نتيجهگيري

در این مطالعه، پیش بینی خشک سالی هیدرولوژیکی در آبخوان دشت اردبیل با استفاده از مدل های سری زمانی تصادفی ARIMA و SARIMA و GRI و شاخص GRI انجام شد. RMSE ، AIC و شاخص های AIC، نجام شد. RMSE ، AIC و ما استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل های سری زمانی توانایی بالایی در پیش بینی خشک سالی هیدرولوژیکی دارند و میتوانند برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک به کار گرفته شوند. مقایسه مدل های مختلف نشان داد که مدل مقایسه مدل های مختلف نشان داد که مدل و شاخص RS و RARIMA(5,1,0) در پنجره زمانی ۳ ماهه بهترین و شاخص RS و RARIMA(5,1,0) در بنجره زمانی ۳ ماهه بهترین و شاخص RM و RMSE ایرا دارای AIC کمتر، مقدار RMSE مناسب و شاخص RS و Ray بالاتر نسبت به سایر مدل ها بود. این نتیجه حاکی از آن است که مدل های دارای مؤلفه فصلی میتوانند رفتار پیچیده خشک سالی را بهتر مدل سازی کنند.

با توجه به تحلیل انجام شده، انتخاب GRI3 بهعنوان شاخص مناسب تر نسبت به GRI1 منطقی به نظر می رسد، زیرا در دورههای بلندمدت دقت پیش بینی بیشتری ارائه داده و نوسانات غیرواقعی کمتری نسبت به مدلهای کوتاهمدت داشته است. با این حال، نتایج نشان داد که GRI1 در بازههای زمانی کوتاه تر عملکرد مناسبی داشته است و در پیش بینیهای کوتاه مدت ممکن است برای تصمیم گیری سریع مفید باشد. بنابراین، توصیه می شود بسته به هدف مدیریت منابع آب، از ترکیبی از این شاخص ها استفاده شود.

یکی از یافتههای مهم این تحقیق، روند کاهشی سطح آب زیرزمینی در دشت اردبیل طی دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۱ بود. نتایج نشان داد که به دلیل برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی، خشکسالیهای هیدرولوژیکی تشدید شده و به ویژه بعد از سال ۲۰۱۳ خشکسالیهای شدیدتر و مداومتری در منطقه مشاهده شده است. این یافتهها می تواند برای برنامه ریزی مدیریت منابع آب، تنظیم الگوی به ره برداری و اجرای سیاستهای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی و شرب مورداستفاده قرار گیرد.

تحلیل باقیماندههای مدل نشان داد که مدلهای مورد استفاده دچار بیش تخمینی یا کم تخمینی قابل توجهی نبودهاند. این امر نشان میدهد که انتخاب مدلها مناسب بوده و دقت پیش بینی آنها برای دادههای مشاهده شده قابل قبول است. با این حال، پیشنهاد می شود که در مطالعات آینده، از مدلهای هیبریدی و روشهای یادگیری ماشین برای بهبود دقت پیش بینی و کاهش عدم قطعیت مدلها استفاده شود.

در مجموع، این تحقیق نشان داد که استفاده از مدلهای سری زمانى تصادفي براى پيشبينى خشكسالى هيدرولوژيكى ابزار مفیدی برای مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک است. نتایج این مطالعه می تواند مبنای تصمیم گیری برای سیاست گذاران و مدیران منابع آب در جهت بهینهسازی الگوی بهرهبرداری از آبهای زیرزمینی و کاهش اثرات خشکسالی باشد. همچنین، پیشنهاد میشود که در تحقیقات آینده، تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی بر تشدید خشکسالیهای هيدرولوژيکی بررسیشده و از ترکيب مدلهای سنتی و یادگیری ماشین برای افزایش دقت پیشبینیها استفاده شود. در حالت کلی، تصمیم گیران صنعت آب لازم است سیاست برداشت آب را با توجه به ورودی آبخوان (که غالبا از باران و برف می باشد) و بیلان آب تنظیم نمایند و از هرگونه برداشت غيرمجاز بهطور قاطع جلوگيري نمايند تا أبخوان نهتنها براي استفاده نسلهای آتی پایدار بماند بلکه از فرونشست خاک که در سایر دشتهای شمالغرب ایران مانند دشت شبستر-صوفیان (دین پژوه و همکاران، ۱۳۹۴) و دشت مرند اتفاق افتاده، جلوگیری شود.

منابع

اکبری نیازی، م.، وردینژاد، و.، بهمنش، ج.، نیک پور، م.، ۱۴۰۲. شبیهسازی کیفیت آب رودخانه قره سو با استفاده از مدلKw2QUAL . هیدروژئولوژی، ۱۸(۱): ۱۳۷–۱۵۵.

بینام (۱۳۹۱) مطالعات طرح آمایش استان اردبیل. جلد اول، اردبیل، ایران، ۲۷–۸۵. سازمان مدیریت و برنامهریزی استان اردبیل .

حسینی، ب.، دین پژوه، ی.، نیکبخت، ج.، ۱۳۹۴. تحلیل خشکسالیهای شمالغرب ایران با روش شاخص اکتشاف خشکسالی آب و خاک، ۲۹(۲): ۲۹۵–۳۱۰.

حسینی، س.، خوش سیمای چنار، م.، ۱۴۰۳. کاربرد الگوریتم های یادگیری ماشین در پیش بینی تراز آب زیرزمینی در آبخوان اردبیل. تحقیقات آب و خاک ایران.

جانی، ر.، ۱۳۹۸. مدلسازی خوشهای تراز آب زیرزمینی دشت تبریز با استفاده از مدل آریما. هیدروژئولوژی ۴(۲): ۱۰۸-۱۳۰.

خسروی دهکردی، ۱، میرعباسی نجف آبادی، ر.، صمدی بروجنی، ح.، قاسمی دستگردی، ۱، ۱۳۹۸. پایش و پیشبینی خشکسالیهای آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از شاخص GRI و مدل زنجیره مارکف. هیدروژئولوژی، ۱۴(): ۱۱۵–۱۱۵.

دانشوروثوقی، ف.، دین پژوه، ی.، اعلمی، م ت.، ۱۳۹۰. تأثیر خشکسالی بر تراز آب زیر زمینی در دو دهه اخیر (مطالعه موردی: دشت اردبیل). دانش آب و خاک، ۲۱(۴): ۱۶۵–۱۷۹.

دین پژوه، ی.، فاخری فرد، ا.، حسن پور اقدم، م ع.، بهشتی وایقان، و.، ۱۳۹۴. تحلیل روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در دشت شبستر – صوفیان. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸(۱): ۵۵–۶۹.

دین پژوه، ی.، ۱۴۰۱. خوشهبندی چاههای مشاهداتی آبخوان دشت خوی از نظر کیفیت آب با استفاده از روش-K Means. هیدروژئولوژی، ۱(۱): ۲۵–۴۱.

زندیفر، س.، فیجانی، ا، نعیمی،م.، خسروشاهی، م.، ۱۳۹۸. تغییرات زمانی و مکانی شاخص خشکسالی آب

زیرزمینی، مطالعه موردی: حوزه آبریز زهره-جراحی. هیدروژئولوژی، ۱۴(۲): ۱۰۸–۱۳۰۰.

طاوسی، ت.، دل آرا، ق.، ۱۳۸۹. پهنهبندی آب و هوایی استان اردبیل. نیوار، ۳۴(۷۱–۷۰): ۴۷–۵۲.

کرد، م.، اصغری مقدم، ا.، نخعی، م.، ۱۳۹۸. مدلسازی عددی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینهسازی برداشت آب زیرزمینی. هیدروژئولوژی، ۱۴(۲): ۱۵۳–۱۶۷.

مقصود، ف.، یزدانی، م.ر.، رحیمی، م.، ملکیان، آ.، ذوالفقاری، ع.، ۱۳۹۵. مقایسه کارایی مدل شبکه عصبی مصنوعی، سری زمانی و مدل ترکیبی ANN-ARIMA در مدلسازی و پیشبینی شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) (مطالعه موردی: جنوب استان قزوین). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۰(۳۳): ۵۷–۴۷.

> Aghelpour, P., Bahrami-Pichaghchi, H., Varshavian, V., 2021. Hydrological drought forecasting using multi-scalar streamflow drought index, stochastic models and machine learning approaches, in northern Iran. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 35(8), 1615–1635.

> Akbari Niari, M., Rezaverdinejad, V., Behmanesh, J., Nikpour, R., 2023. Simulating the Water Quality of Qarasu River Using the QUAL2Kw Model. Hydrogeology, 8(1), 137-155. [In persion]

> Ali, Z., Hussain, I., Faisal, M., Nazir, H.M., Hussain, T., Shad, M.Y., Mohamd Shoukry, A., Hussain Gani, S., 2017. Forecasting drought using multilayer perceptron artificial neural network model. Advances in Meteorology, 2017(1), 5681308.

> Araghinejad, S., Hosseini-Moghari, S.M., Eslamian, S., 2017. Application of data-driven models in drought forecasting. In Handbook of drought and water scarcity, (pp. 423–440). CRC Press.

Azimi, S., Hassannayebi, E., Boroun, M., Tahmoures, M., 2020. Probabilistic Analysis of Long-Term Climate Drought Using Steady-State Markov Chain Approach. Water Resources Management, 34, 4703–4724.

Azizi, H.R., Ebrahimi, H., Mohamad vali samani, H., khaki, V., 2021. Effect of Meteorological Drought on Groundwater Resources of Varamin Plain Using SPI, NISTOR Hoseini, S.M. khoshsimaie chenar, M., 2025. Application of machine learning algorithms in groundwater level prediction in the Ardabil aquifer. Iranian Journal of Soil and Water Research. [In persion]

Jani, R., 2020. Cluster Modeling of Groundwater Level of Tabriz Plain Using ARIMA Model. Hydrogeology, 4(2), 74-91. [In persion]

Jenkins, G.M., & Box, G.E.P., 1976. Time series analysis: forecasting and control. (No Title).

Karimi, M., Melesse, A.M., Khosravi, K., Mamuye, M., Zhang, J., 2019. Analysis and prediction of meteorological drought using SPI index and ARIMA model in the Karkheh River Basin, Iran. In Extreme Hydrology and Climate Variability: Monitoring, Modelling, Adaptation and Mitigation, (pp. 343–353). Elsevier.

Khosravi Dehkordi, A., Mirabbasi, R., Samadi Boroujeni, H., Ghasemi Dastgerdi, A.R., 2019. Monitoring and forecasting of groundwater drought in Shahrekord plain using Groundwater Resource Index (GRI) and Markov chain model. Hydrogeology, 4(1), 111-125. [In persion]

Kord, M., Asghari Moghaddam, A., and Nakhaei, M., 2019. Numerical modeling of the Ardabil plain aquifer and its management using optimization of Groundwater extraction. Hydrogeology, 4(1), 153-167. [In persion]

Li, Y., Huang, Y., Li, Y., Zhang, H., Fan, J., Deng, Q., Wang, X., 2024. Spatiotemporal heterogeneity in meteorological and hydrological drought patterns and propagations influenced by climatic variability, LULC change, and human regulations. Scientific Reports, 14(1), 5965.

Maghsoud, F., Yazdani, M.R., Rahimi, M., Malekian, A., Zolfaghari, A., 2016. Performance Comparison of Artificial Neural Network, Time Series and ANN-ARIMA For Groundwater Resources Index (GRI) Forecasting (Case Study: South of Qazvin Province). Ijwmse, 10(33), 47– 57. [In persion]

McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22), 179–183.

Mishra, A.K., Desai, V.R., 2005. Drought forecasting using stochastic models. Stochastic

and GRI index. Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 14(6), 2125–2135.

Batool, A., Kartal, V., Ali, Z., Scholz, M., Ali, F., 2025. A novel regional forecastable multiscalar standardized drought index (RFMSDI) for regional drought monitoring and assessment. Agricultural Water Management, 308, 109289.

Bazrafshan, J., Khalili, A., 2013. Spatial analysis of meteorological drought in Iran from 1965 to 2003. Desert, 18, 63–71.

Box, G.E.P., Jenkins, G.M., 1994. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Prentice Hall PTR.

Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., 1994. Time series analysis, forecasting and control. Englewood Clifs. NJ: Prentice Hall.

Buri, E.S., Keesara, V.R., Loukika, K.N., Sridhar, V., Dzwairo, B., Montenegro, S., 2025. Climate-adaptive optimal water resources management: A multi-sectoral approach for the Munneru river basin, India. Journal of Environmental Management, 374, 124014.

Daneshvar Vousoughi, F., Dinpashoh, Y., Aalami, M.T., Jhajharia, D., 2013. Trend analysis of groundwater using non-parametric methods (case study: Ardabil plain). Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 27:547–559. [In persion]

Dikshit, A., Pradhan, B., Huete, A., 2021. An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network. Journal of Environmental Management, 283, 111979.

Dinpashoh, F., Fakhari Fard, A., Hassanpoor Eghdam, M.A., Beheshtee Vayghan., V., 2015. Trend Analysis of Groundwater Quality of Shabestar- Soofian Plain. Journal of Irrigation Sciences and Engineering, 38(1), 55-69. [In persion]

Farzin, S., Anaraki, M. V., Naeimi, M., Zandifar, S. (2022). Prediction of groundwater table and drought analysis; a new hybridization strategy based on bi-directional long short-term model and the Harris hawk optimization algorithm. Journal of Water and Climate Change, 13(5), 2233–2254.

Hosseini, B., dinpazhoh, Y., and Nikbakht, J., 2015. Analysis of Droughts of Northwest of Iran Using the Reconnaissance Drought Index. Water and Soil, 29(2), 295-310. [In persion] framework: A combined dynamical and statistical approach. Journal of Hydrology, 548, 291–304.

Yuan, M., Gan, G., Bu, J., Su, Y., Ma, H., Liu, X., Zhang, Y., Gao, Y., 2025. A new multivariate composite drought index considering the lag time and the cumulative effects of drought. Journal of Hydrology, 132757.

Zandifar, S., Fijani, E., Naeimi, M., Khosroshahi, M., 2020. Spatiotemporal variations of groundwater drought indices, Case study: Zohreh- Jarrahi watershed. Hydrogeology, 4(2), 108-130. [In persion] Environmental Research and Risk Assessment, 19, 326–339.

Mishra, A.K., Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts Journal of Hydrology, 391(1–2): 202–216.

Mossad, A., Alazba, A.A., 2015. Drought forecasting using stochastic models in a hyperarid climate. Atmosphere, 6(4), 410–430.

Nguyen, V.H., Li, Q.F., Nguyen, L.B., 2017. Drought forecasting using ANFIS- a case study in drought prone area of Vietnam. Paddy and Water Environment, 15(3), 605–616.

Rezaiy, R., Shabri, A., 2023. Drought forecasting using W-ARIMA model with standardized precipitation index. Journal of Water and Climate Change, 14(9), 3345–3367.

Salas, J.D., Delleur J.W., Yevjevich, V., Lane, W.L., 1997. Applied Modeling of hydrologic time series. Water Resources Publication. Fourth Edition.

Tavosi, T. and delara, G., 2010. Climate Classification of Ardebil Province. Nivar, 34(71-70), 47-52. [In persion]

Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H., 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). Water Resources Management, 21(5), 821–833.

Van Loon, A.F., Van Huijgevoort, M.H.J., Van Lanen, H.A.J., 2012. Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models. Hydrology and Earth System Sciences, 16(11), 4057–4078.

Wang, J., Rong, G., Li, K., Zhang, J., 2021. Analysis of drought characteristics in northern Shaanxi based on copula function. Water (Switzerland), 13(11), 20734441.

Wilhite, D.A., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. Water Resources Management, 21(5), 763–774.

Xu, D., Zhang, Q., Ding, Y., Huang, H., 2020. Application of a hybrid ARIMA–SVR model based on the SPI for the forecast of drought—a case study in Henan Province, China. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 59(7), 1239–1259.

Yan, H., Moradkhani, H., & Zarekarizi, M. 2017. A probabilistic drought forecasting