



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و ششم، شماره دوم، ۱۳۹۸

۱۱۷-۱۳۶

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.15085.3048

## ارزیابی و پیش‌بینی خشکسالی‌های آب زیرزمینی با استفاده از شاخص GRI و مدل‌های زنجیره مارکف مرتبه اول تا سوم (مطالعه موردی: دشت بروجن)

امیر خسروی دهکردی<sup>۱</sup>، \* رسول میرعباسی نجف‌آبادی<sup>۲</sup>، حسین صمدی بروجنی<sup>۲</sup>

و احمد رضا قاسمی دستگردی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد،

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۴

### چکیده

**سابقه و هدف:** مدیریت منابع آب به‌خصوص آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از موارد مهم در مدیریت بهینه منابع آب پیش‌بینی شرایط خشک‌سالی است. آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب مصرفی در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب در دشت بروجن محسوب می‌شود. از این‌رو، بررسی وضعیت خشک‌سالی منابع آب زیرزمینی در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار این منابع بسیار دارای اهمیت است. تاکنون روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران برای پیش‌بینی انواع مختلف خشک‌سالی‌ها توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها پیش‌بینی وضعیت رطوبتی با زنجیره مارکوف می‌باشد. در اغلب مطالعات پیشین در زمینه پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها، از زنجیره مارکف مرتبه اول و دوم استفاده شده است. در پژوهش حاضر، خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی در دشت بروجن در طی سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴ مورد ارزیابی قرار گرفت و شرایط رطوبتی این دشت با استفاده از زنجیره مارکف مرتبه سوم پیش‌بینی شد.

**مواد و روش‌ها:** به‌منظور ارزیابی خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی دشت بروجن مقادیر شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه شد. بدین‌منظور، از آمار تراز آب زیرزمینی ۱۳ چاه مشاهده‌ای در دشت بروجن در دوره ۳۱ ساله (۹۴-۱۳۶۴) استفاده شد. برای پیش‌بینی مقادیر شاخص GRI در ماه‌های آتی در دشت بروجن از روش زنجیره مارکف با مرتبه‌های اول، دوم و سوم استفاده گردید و عملکرد این مدل با روش جدول توافقی مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از تهیه جدول توافقی برای زنجیره مارکف مرتبه اول، دوم و سوم، مقادیر آماره‌های CSI، POD و FAR محاسبه شد. مقدار CSI برای دشت بروجن در مقیاس‌های زمانی یک، سه و شش و دوازده ماهه برای مدل مارکف مرتبه اول به‌ترتیب برابر ۰/۵۸، ۰/۵۰، ۱ و ۱، برای مدل مارکف مرتبه دوم در مقیاس‌های زمانی یک، سه و

\* مسئول مکاتبه: [mirabbasi\\_r@yahoo.com](mailto:mirabbasi_r@yahoo.com)

شش ماهه به ترتیب برابر ۰/۴۵، ۰/۳۳ و ۱ و برای مارکف مرتبه سوم در مقیاس‌های زمانی یک، سه و شش ماهه به ترتیب برابر ۰/۴۰، ۰/۳۸ و ۱ به دست آمد که نشانگر مهارت متوسط روش پیشنهادی در مقیاس یک و سه ماهه پیش‌بینی شرایط رطوبتی و مهارت خوب آن در مقیاس شش ماهه پیش‌بینی شرایط رطوبتی بود. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص GRI در این دشت با انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی، ترسیم گردید.

**یافته‌ها:** نقشه پهنه‌بندی شاخص GRI در دشت بروجن نشان می‌دهد قسمت‌های میانی دشت اغلب با خشک‌سالی شدید مواجه شده است. مقایسه عملکرد مرتبه‌های مختلف زنجیره مارکف در پیش‌بینی شرایط رطوبتی دشت بروجن بر اساس آماره‌های CSI، POD و FAR نشان داد که روش زنجیره مارکف مرتبه اول از دقت بیش‌تری در پیش‌بینی مقادیر شاخص GRI در تمام مقیاس‌های زمانی برخوردار بوده است، بنابراین از آن می‌توان برای پیش‌بینی خشک‌سالی آب زیرزمینی دشت بروجن استفاده کرد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج حاصل از بررسی شاخص GRI در دشت بروجن نشان داد که در دوره زمانی مورد بررسی، دوره خشک‌سالی آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۷ شروع شده است. به‌طورکلی خشک‌سالی‌های شدیدی که در سال‌های اخیر به دلیل کاهش نزولات جوی رخ داده است، به همراه اضافه برداشت از چاه‌های موجود در دشت، منطقه را با بحران شدید کاهش سطح آب زیرزمینی مواجه کرده که کاهش کیفیت آب و فرونشست زمین را در پی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** آبخوان بروجن، پیش‌بینی خشک‌سالی، خشک‌سالی آب زیرزمینی، زنجیره مارکف، شاخص GRI

#### مقدمه

به عقیده ویلهایت (۱۹۸۵) یکی از اساسی‌ترین نیازهای بشر دسترسی به آب بوده و کمبود آن می‌تواند موجب بروز بحران‌های جدی در زندگی انسان‌ها شود و به‌طور غیرمستقیم زندگی اجتماعی آن‌ها را نیز تحت تأثیر خود قرار دهد (۱۹). داس سومانتا و همکاران (۲۰۱۶) بیان نمودند که کمبود آب را می‌توان به‌عنوان معلول خشک‌سالی بر شمرده که خود متأثر از کاهش بارندگی هست (۵). کمبود آب در دهه‌های اخیر در حال تبدیل شدن به یک تهدید جدی است که ممکن است اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی - اقتصادی شدیدی به دنبال داشته باشد. خشک‌سالی پدیده‌ای است که در هر منطقه و کشوری، چه دارای آب‌وهوای خشک باشد و چه مرطوب، اتفاق می‌افتد و با خشکی و کم‌آبی متفاوت است. با

این وجود، خشک‌سالی، شرایط خشکی (آب و هوا) و مسأله کم‌آبی راه، حادث‌تر خواهد کرد. امکان جلوگیری از وقوع خشک‌سالی در هیچ منطقه و شرایطی وجود ندارد، ولی برای مقابله با آن و کاهش خسارت‌های احتمالی، می‌توان اقداماتی را انجام داد. افزایش دمای جهانی پیش‌بینی شده و تغییرات در توزیع منطقه‌ای و شدت بارش ممکن است فراوانی، شدت و مدت خشک‌سالی‌ها را تغییر دهد (۱۰). پژوهشگران خشک‌سالی‌ها را به انواع مختلفی شامل هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی و اقتصادی - اجتماعی تقسیم کرده‌اند. مفهوم خشک‌سالی آب زیرزمینی یا  $GWD^1$  توسط ویلهایت و همکاران (۲۰۱۳) به معنی شرایط بحرانی آب‌های زیرزمینی در طی یک خشک‌سالی هواشناسی طولانی مدت نشان می‌دهد که خود باعث

(۱۳). تاکنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی شرایط رطوبتی توسط پژوهشگران مختلف توسعه داده شده است، که از آن جمله می‌توان به روش زنجیره مارکف<sup>۲</sup>، مدل لوگ خطی، سری‌های زمانی، مدل‌های هوش مصنوعی و ... اشاره نمود. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه کاربرد زنجیره مارکف در مدل‌سازی احتمالاتی رخدادهای خشک‌سالی به انجام رسیده است، که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. برای اولین بار توسط گابریل و نیومن در سال ۱۹۶۲ مدل زنجیره مارکف به‌منظور پیش‌بینی روزهای بارش به‌کار گرفته شد (۸). پیاداسا و سونادارا (۲۰۱۰) وقوع بارندگی روزانه را در سریلانکا با توجه به داده‌های بلندمدت سه ایستگاه و با استفاده از مدل زنجیره مارکف مرتبه‌های اول و دوم پیش‌بینی نمودند. نتایج نشان داد که هر دو مرتبه اول و دوم زنجیره مارکف با دقت  $72 \pm 4\%$  قادر به پیش‌بینی است (۱۷). مدی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده SPI و زنجیره مارکف به پیش‌بینی خشک‌سالی در هفت منطقه الجزایر پرداختند. نتایج آن‌ها احتمال وقوع ترسالی در دو فصل زمستان و بهار را در حدود ۵۰ درصد نشان داد (۱۴). مورا و همکاران (۲۰۱۵) روند وقوع خشک‌سالی در شمال الجزایر را بررسی کردند. آن‌ها از شاخص SPI و روش زنجیره مارکف استفاده کردند. نتایج نشان داد که احتمال وقوع کلاس خشک‌سالی شدید در آینده به‌طور قابل‌توجهی در حال افزایش است، به‌طوری‌که احتمال خشک‌سالی از مقدار ۰/۲۶۵ در سال ۲۰۰۵ به مقدار احتمال پایدار ۰/۵۷۶ در سال ۲۰۴۱ خواهد رسید (۱۶).

غیرقابل‌دسترس شدن منابع آب‌های زیرزمینی و یا کاهش آن‌ها برای استفاده انسان می‌شود (۱۸). مک‌دونالد و همکاران (۲۰۰۹) به این نکته اشاره داشتند که واژه خشک‌سالی آب زیرزمینی اولین بار توسط روتولیس در سال (۱۹۸۷) ابداع شد و بعد از آن توسط کالو و همکاران (۱۹۹۷) به تفصیل شرح داده شد، آن‌ها پیشنهاد نمودند که نیاز به یک چارچوب مفهومی برای نگارش جامع (انسانی و فیزیکی) آسیب‌پذیری خشک‌سالی آب زیرزمینی و تهیه نقشه خشک‌سالی در اتیوپی دارند (۱۱). یکی از شیوه‌های متداول برای ارزیابی شرایط رطوبتی، استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی است. تاکنون شاخص‌های بسیاری توسط پژوهشگران برای کمی نمودن خشک‌سالی پیشنهاد شده است که با استفاده از متغیرهای هیدرولوژی و هواشناسی محاسبه می‌شوند. هر کدام از این شاخص‌ها دارای نقاط قوت و ضعف به خصوصی هستند. میشر و سینگ (۲۰۱۰) مرور جامعی از شاخص‌های مختلف خشک‌سالی به همراه نقاط قوت و محدودیت‌های آن‌ها ارائه دادند (۱۵). تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه تحلیل و پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها در ایران و کشورهای دیگر توسط پژوهشگران انجام شده است که از مهم‌ترین این شاخص‌ها برای بررسی خشک‌سالی آب زیرزمینی، شاخص منبع آب زیرزمینی<sup>۱</sup> GRI، می‌باشد. شاخص GRI در سال ۲۰۰۸ توسط مندسینو و همکاران به‌عنوان شاخص قابل‌اعتماد برای مدل‌سازی، پایش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شد. مهم‌ترین قابلیت این شاخص همبستگی بالای آن با متوسط رواناب در برخی از رودخانه‌های حوضه در پیش‌بینی خشک‌سالی‌های فصل تابستان بود

مقایسه عملکرد مراتب مختلف مدل زنجیره مارکف در پیش‌بینی خشک‌سالی آب زیرزمینی دشت بروجن از دیگر اهداف این مطالعه می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

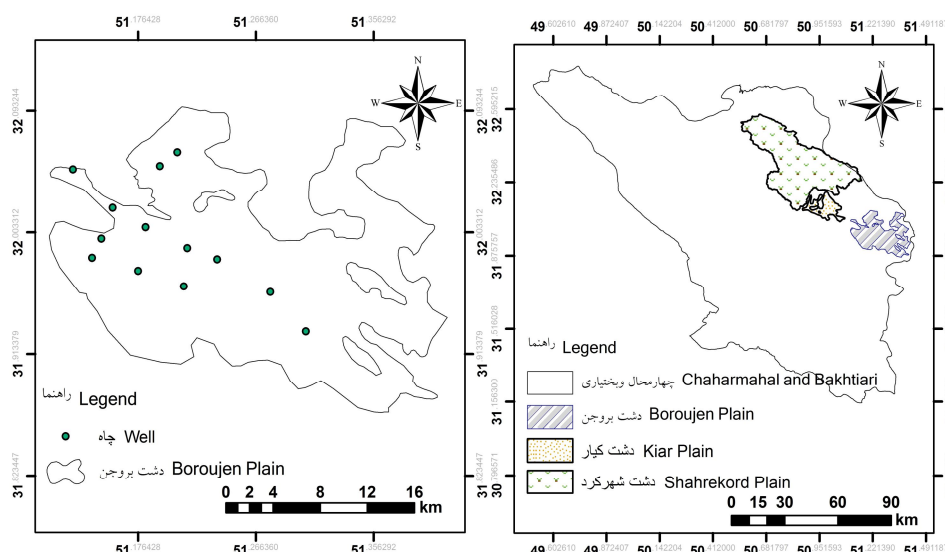
**معرفی منطقه مورد مطالعه:** محدوده مطالعاتی بروجن یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کارون بزرگ با وسعت ۶۶۶/۳۵ کیلومترمربع می‌باشد که در قسمت شرق حوضه واقع شده است که حدود ۳۸۱/۱۴ کیلومترمربع از وسعت محدوده را دشت و ۲۸۵/۲۱ کیلومترمربع از وسعت محدوده را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. حداقل ارتفاع محدوده ۲۱۲۱ متر مربوط به بخش‌های خروجی حوضه و حداکثر ارتفاع محدوده ۲۹۸۳ متر از سطح دریا مربوط به قسمت‌های شمالی حوضه می‌باشد.

پایش آب زیرزمینی در آبخوان بروجن از سال ۱۳۶۳ آغاز شده و در حال حاضر ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای فعال دارد که تغییرات سطح ایستابی آبخوان به‌صورت ماهانه در آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دشت بروجن و چاه‌های مشاهده‌ای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

به‌منظور انجام این پژوهش، ابتدا آمار ۱۳ حلقه چاه مشاهده‌ای که از داده‌های با کیفیت و طول مناسب برخوردار بودند، از شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری اخذ گردید. بعد از مرتب‌سازی و بازسازی داده‌های مفقود با روش ایجاد رگرسیون خطی بین داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای مجاور، یک دوره آماری مشترک ۳۱ ساله (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)، برای بررسی خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی این دشت انتخاب شد.

احمدی‌آخوومه و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی آبخوان مروشدت خرامه در استان فارس با استفاده از شاخص‌های SWI و GRI پرداختند. نتایج هر دو شاخص، شروع خشک‌سالی آب زیرزمینی را از سال ۱۳۸۶ نشان داد که با افزایش مقیاس‌های زمانی، تداوم، شدت و فراوانی آن‌ها نیز افزایش می‌یافت. به‌گونه‌ای که شدیدترین خشک‌سالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه بر اساس شاخص GRI در مهرماه ۱۳۹۰ با مقدار ۱/۹۴- و بر اساس شاخص SWI در شهریور ۱۳۹۰ با مقدار ۲/۰۸ رخ داده است. از نظر مکانی نیز شروع وقوع خشک‌سالی آب زیرزمینی، از بخش‌های شمالی بوده و با گذشت زمان به بخش‌های مرکزی و جنوبی گسترش یافته و هم‌زمان بر شدت آن نیز افزوده شده است (۱). بازیارپور و نادری (۱۳۹۶) به تحلیل احتمالاتی طبقات شدت خشک‌سالی با استفاده از مدل زنجیره مارکف در اقلیم‌های مختلف ایران پرداختند. نتایج نشان داد که احتمال رخداد یک ماه خشک‌سالی شدید بعد از یک ماه بدون خشک‌سالی یا خشک‌سالی خفیف در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی تقریباً صفر است. به‌نظر می‌رسد با افزایش پنجره زمانی SPI، تداوم ثبات خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های شدید افزایش می‌یابد (۳).

بررسی منابع نشان می‌دهد که اغلب مطالعات پیشین، از مدل زنجیره مارکف مرتبه اول برای پیش‌بینی خشک‌سالی یک ماه بعد استفاده نموده‌اند. هدف از مطالعه حاضر، پایش خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی دشت بروجن با شاخص GRI، تهیه نقشه پهنه‌بندی آن و همچنین پیش‌بینی خشک‌سالی آب زیرزمینی تا سه ماه آینده به‌وسیله مدل زنجیره مارکف با مرتبه‌های اول، دوم و سوم می‌باشد. همچنین



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت بروجن و چاه‌های مشاهده‌ای مورد مطالعه.

Figure 1. Geographical location of Boroujen plain and the piezometers in the study area.

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

که در آن،  $GRI_{y,m}$  مقدار شاخص در ماه  $m$  از سال  $y$ ،  $D_{y,m}$  ارتفاع سطح ایستابی در ماه  $m$  از سال  $y$ ،  $\mu_{D,m}$  میانگین داده‌های سطح ایستابی ماه  $m$  برای  $D$  سال و  $\sigma_{D,m}$  انحراف معیار داده‌های سطح ایستابی ماه  $m$  برای  $D$  سال می‌باشند. جدول ۱ کلاس‌های مختلف خشک‌سالی و ترسالی را با توجه به مقادیر  $GRI$  نشان می‌دهد.

**مدل زنجیره مارکف:** تجزیه و تحلیل مارکف یا زنجیره مارکف مشابه ابزاری توصیفی است که هدف عمده‌اش پیش‌بینی رفتار آینده است. این روش تداعی‌کننده برنامه‌ریزی پویاست و حتی برای حل مسائل برنامه‌ریزی پویا به‌کار می‌رود. روش مارکف روشی تحلیلی است که این امکان را فراهم می‌آورد تا آینده را با به‌کار بردن حالت‌های احتمالی و ماتریس احتمالات انتقال پیش‌بینی نمود.

به‌منظور تشخیص و پایش خشک‌سالی آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی دشت بروجن از شاخص  $GRI$  استفاده گردید. مقادیر شاخص  $GRI$  در مقیاس یک، سه، شش و ۱۲ ماهه برای کل منطقه مورد مطالعه و برای هر کدام از چاهک‌های مشاهده‌ای به‌صورت جداگانه محاسبه شد. سپس وضعیت رطوبتی برای یک، دو و سه ماه آینده به‌ترتیب با زنجیره مارکف مرتبه یک، دو و سه پیش‌بینی شد. در نهایت دقت هر روش بر اساس آماره‌های مستخرج از جدول توافقی مورد ارزیابی قرار گرفت و بهترین مرتبه زنجیره مارکف تعیین گردید.

**شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI):** شاخص  $GRI$  توسط مندسینو و همکاران (۲۰۰۸) به‌عنوان شاخصی قابل‌اعتماد برای مدل‌سازی، پایش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شد. مهم‌ترین قابلیت این شاخص همبستگی بالای آن با متوسط رواناب در برخی از رودخانه‌های حوزه در پیش‌بینی خشک‌سالی‌های فصل تابستان هست (۱۳). مقدار آماره شاخص  $GRI$  با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت شاخص GRI توسط مندسینو و همکاران (۱۳۸۷).

Table 1. Classification of GRI index by Mendicino et al. (2008).

علامت اختصاری Symbol	مقادیر GRI GRI values	کلاس خشکسالی Drought Class	ردیف j
nd	0 <	بدون خشکسالی (No- Drought)	1
md	-0.99 to 0	خشکسالی ملایم (Mild Drought)	2
od	-1.49 to -1	خشکسالی متوسط (Moderate Drought)	3
sd	-1.99 to -1.5	خشکسالی شدید (Sever Drought)	4
ed	-2 ≥	خشکسالی بسیار شدید (Extreme Drought)	5

در این مطالعه، بعد از محاسبه مقادیر شاخص GRI، با استفاده از جدول ۱ وضعیت رطوبتی ایستگاه موردنظر در هر ماه از هر سال و برای مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه مشخص می‌شود و فراوانی نسبی آن برآورد می‌گردد. سپس ماتریس احتمال انتقال تشکیل می‌گردد. در مرحله بعد با استفاده از مقادیر احتمال انتقال شرطی، احتمال تعادل برای هر یک از حالت‌های خشک‌سالی بسیار شدید (ed)، خشک‌سالی شدید (sd)، خشک‌سالی متوسط (od)، خشک‌سالی ملایم (md) و ترسالی (nd) محاسبه گردید:

ملایم به ماه خشک متوسط می‌باشد. N تعداد کل حالات انتقال ممکن از یک کلاس رطوبتی به کلاس رطوبتی دیگر است. برای تعیین دوره‌های خشک و تر مورد انتظار در آینده ابتدا باید احتمال وقوع دوره‌های خشک و تر در سری مورد مطالعه تعیین گردد. اگر محیط در حالت تر باشد و به حالت خشک گرایش پیدا کند، خشک‌سالی روی می‌دهد. با این توضیح احتمال رویدادهای ترسالی، خشک‌سالی ملایم، خشک‌سالی متوسط، خشک‌سالی شدید و خشک‌سالی خیلی شدید، از رابطه زیر به‌دست می‌آیند:

$$P_i = \sum_{j=1}^5 P_j^* \times p_{ji} \quad (i \neq j) \quad (3)$$

$$P_i^* = \frac{\sum_{j=1}^5 p_{ji}}{N} \quad (i \neq j) \quad (2)$$

برای به‌دست آوردن تعداد متوسط خشک‌سالی‌های مورد انتظار در دوره مورد مطالعه یا امید ریاضی خشک‌سالی، حاصل ضرب احتمال گذر از یک سطح آستانه در طول مدت سری زمانی (اندازه نمونه) مورد بررسی محاسبه گردید که به شکل رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$E(i) = P_i \times t \quad (4)$$

که در آن، i و j کلاس رطوبتی می‌باشند که از یک تا پنج (به ترتیب معادل کلاس‌های nd, md, od, sd و ed) تغییر می‌کنند؛  $P_i^*$  احتمال تعادل کلاس رطوبتی مورد نظر،  $p_{ji}$  احتمال انتقال از کلاس رطوبتی j ام (به جز کلاس رطوبتی موردنظر i ام)، به کلاس رطوبتی i ام می‌باشد. برای مثال،  $P_{ndmd}$  یا  $P_{12}$ ، احتمال انتقال از یک ماه تر به یک ماه خشک ملایم،  $P_{mdod}$  یا  $P_{23}$  احتمال گذر از یک ماه خشک

که در آن،  $E(i)$  امید ریاضی حالت مورد نظر و یا تعداد متوسط حالت مورد انتظار در دوره مورد مطالعه، برای مثال  $P_{sd}$  احتمال رویداد خشک‌سالی‌های شدید (احتمال رفتن از حالت‌های غیر از خشک‌سالی‌های شدید به خشک‌سالی شدید) هست. برای پیش‌بینی میانگین تداوم خشک‌سالی شدید در آینده، کافی است که احتمال تعادل حالت خشک شدید را بر احتمال رویداد دوره خشک شدید حاصل از رابطه ۳ به شکل زیر تقسیم شود:

که در آن،  $E(Li)$  تداوم خشک‌سالی در آینده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه از زنجیره مارکف مرتبه دوم و سوم نیز استفاده شده که به‌خاطر مشابه بودن فرمول‌ها از ارائه آن‌ها خودداری شد. ارزیابی عملکرد مدل زنجیره مارکف: به‌منظور صحت‌سنجی پیش‌بینی‌های آماری در علم هواشناسی، شیوه‌های امتیازدهی زیادی توسط پژوهشگران توسعه داده شده است (۴، ۶ و ۲۰). گاندین و مورفی

$$E(Li) = \frac{P_i^*}{P_i} \quad (5)$$

۱- Hit یا پیش‌بینی مثبت درست: یعنی این‌که وقوع یک پیشامد پیش‌بینی می‌شود و آن پیشامد روی می‌دهد.

۲- Miss یا پیش‌بینی منفی نادرست: یعنی این‌که پیش‌بینی می‌شود یک پیشامد روی ندهد، ولی روی می‌دهد.

۳- False alarm یا پیش‌بینی مثبت نادرست: یعنی این‌که پیش‌بینی می‌شود یک پیشامد روی دهد، ولی روی نمی‌دهد.

۴- Correct negative یا پیش‌بینی منفی درست: یعنی این‌که پیش‌بینی می‌شود که یک پیشامد رو ندهد و روی نمی‌دهد. جدول ۲ نمونه‌ای از جدول توافقی  $2 \times 2$  را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نمونه‌ای از جدول توافقی  $2 \times 2$ .

Table 2. An example of  $2 \times 2$  contingency table.

		مشاهدات (Observation)	
		بله (Yes)	خیر (No)
پیش‌بینی (Predicted)	بله (Yes)	پیش‌بینی مثبت درست (Hit)	پیش‌بینی مثبت نادرست (False alarm)
	خیر (No)	پیش‌بینی منفی نادرست (Miss)	پیش‌بینی منفی درست (Correct rejection)

### نتایج و بحث

در این مطالعه، مقادیر شاخص منبع آب‌های زیرزمینی (GRI) در دشت بروجن برای ۱۳ چاه مشاهده‌ای منتخب محاسبه شد. شکل‌های ۲ تا ۵ به ترتیب سری زمانی شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه مربوط به پیرومتر شماره شش، برای نمونه ارائه شده است. در این شکل‌ها مقادیر شاخص GRI در مقابل تراز سطح آب زیرزمینی رسم شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود تغییرات شاخص GRI به مقدار زیادی وابسته به تغییرات تراز مشاهده‌ای می‌باشد. به طوری که شاخص GRI در مقیاس یک‌ماهه از تطابق بهتری با تراز آب زیرزمینی برخوردار است. تغییرات تراز مشاهده‌ای در دشت بروجن نیز تا حدودی منعکس‌کننده اثرات مدیریت بهره‌برداری اعمال شده در سال‌های قبل و همچنین تغییرات میزان بارش در منطقه است.

بر اساس شکل ۲، در نمودار سری زمانی شاخص GRI با مقیاس زمانی یک‌ماهه، در ابتدای دوره آماری (۱۳۶۴) تا اواخر ۱۳۷۸، بلندترین دوره ترسالی به وقوع پیوسته که بیش‌ترین مقدار شاخص در این دوره برابر ۱/۰۴ در آبان‌ماه ۱۳۷۲ است. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی نیز از اسفندماه ۱۳۸۷ شروع شده و تا انتهای دوره آماری (۱۳۹۴) ادامه یافته است. کم‌ترین مقدار شاخص در این دوره برابر ۲/۷۱- در اسفند ۱۳۹۴ است. در شکل ۳ که مربوط به شاخص GRI با مقیاس سه‌ماهه است، طولانی‌ترین دوره ترسالی از سال ۱۳۶۴ تا بهمن‌ماه ۱۳۷۸ رخ داده که بیش‌ترین مقدار شاخص GRI در این دوره برابر ۱/۰۱۶ در شهریور ۱۳۷۲ به وقوع پیوسته است. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی بر اساس GRI سه‌ماهه نیز از دی‌ماه

امتیاز مهارت  $SC^1$  به صورت نسبت پیش‌بینی‌های مثبت درست و پیش‌بینی‌های منفی نادرست نسبت به کل حالت‌های ممکن بیان می‌شود. دونالدسون و همکاران (۱۹۷۵) از شاخص موفقیت بحرانی  $CSI^2$ ، احتمال تشخیص  $POD^3$  و نسبت هشدار نادرست  $FAR^4$  به طور متداول برای صحت‌سنجی و ارزیابی پیش‌بینی استفاده می‌کردند، که مقادیر آن‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند (۷).

$$CSI = \frac{hits}{hits + misses + false\ alarms} \quad (6)$$

$$POD = \frac{hits}{hits + misses} \quad (7)$$

$$FAR = \frac{false\ alarms}{hits + false\ alarms} \quad (8)$$

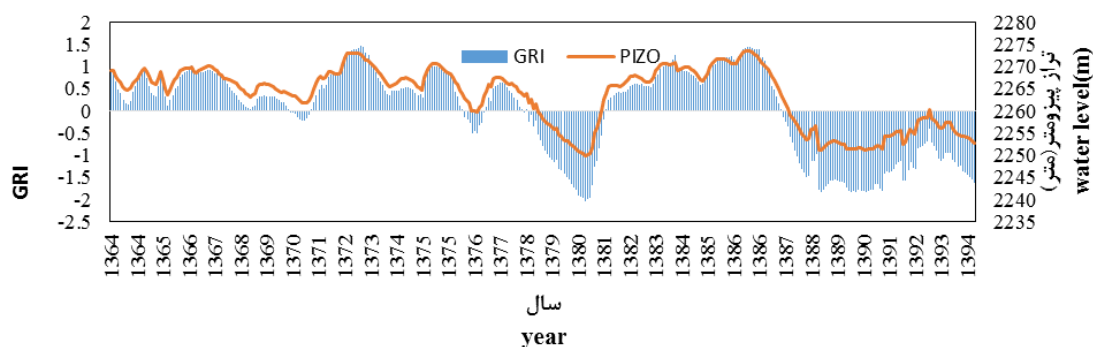
دامنه تغییرات هر یک از سه معیار بالا بین صفر و یک است. گاندین و مورفی (۱۹۹۲) نشان دادند که هرچه شاخص CSI و POD به یک نزدیک‌تر باشند و هرچه شاخص FAR به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر روش پیش‌بینی مورد بررسی است. مک‌کوی (۱۹۸۶) بیان داشت که شاخص CSI برای مقایسه مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌ها است (۱۲). پس از آن آریث و فرانک (۱۹۸۵) شاخص CSI را به عنوان معیاری برای انتخاب حد آستانه احتمالاتی معرفی نمود (۲). در این مطالعه، از شیوه جدول توافقی برای کمی کردن عملکرد مرتبه‌های مختلف مدل مارکف در پیش‌بینی شرایط رطوبتی دشت بروجن استفاده شد.

- 1- Skill score
- 2- Critical Success Index
- 3- Probability of Detection
- 4- False Alarm Ratio

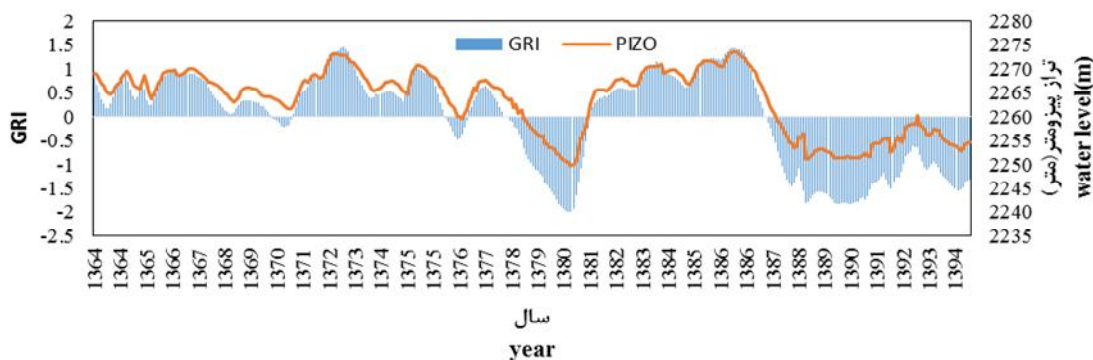


طول انجامیده و کمترین مقدار شاخص در این دوره برابر ۲/۲۶- در فروردین ماه ۱۳۹۴ بوده است. در شکل ۵ که مربوط به شاخص GRI با مقیاس ۱۲ ماهه است، طولانی‌ترین دوره ترسالی از سال ۱۳۶۴ تا شهریورماه ۱۳۷۸ و بیشترین مقدار شاخص برابر با ۰/۹۰ در اسفندماه ۱۳۷۱ می‌باشد. همچنین طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی از مردادماه ۱۳۸۷ تا انتهای دوره آماری است که کمترین مقدار شاخص معادل ۲/۲۵- در فروردین ماه ۱۳۹۴ رخ داده است.

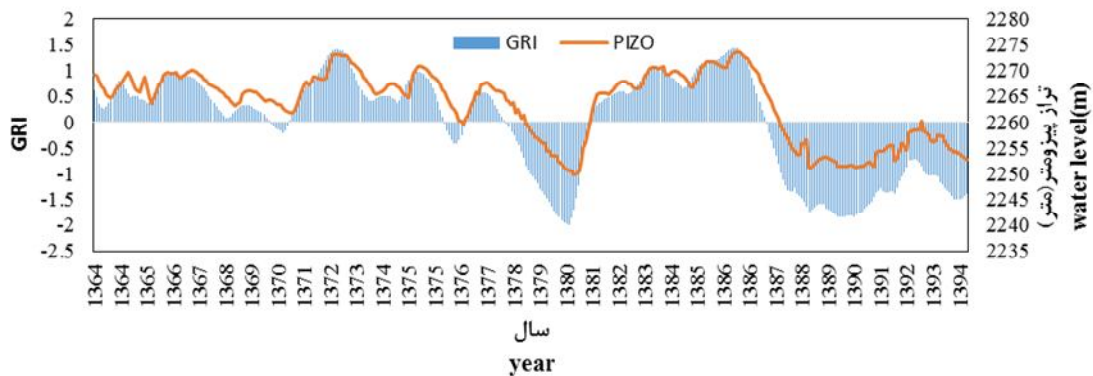
۱۳۸۷ تا انتهای دوره آماری بوده که کمترین مقدار شاخص در این دوره برابر با ۲/۵۱- در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۴ روی داده است. شکل ۴ مربوط به شاخص GRI با مقیاس زمانی شش‌ماهه است. طولانی‌ترین دوره ترسالی بر اساس شاخص GRI شش‌ماهه بین سال‌های ۱۳۶۴ تا بهمن‌ماه ۱۳۷۸ بوده که بیشترین مقدار آن معادل ۰/۹۳ در خردادماه ۱۳۷۲ به‌دست آمده است. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی بر اساس شاخص شش‌ماهه از آبان‌ماه ۱۳۸۷ تا انتهای دوره آماری به



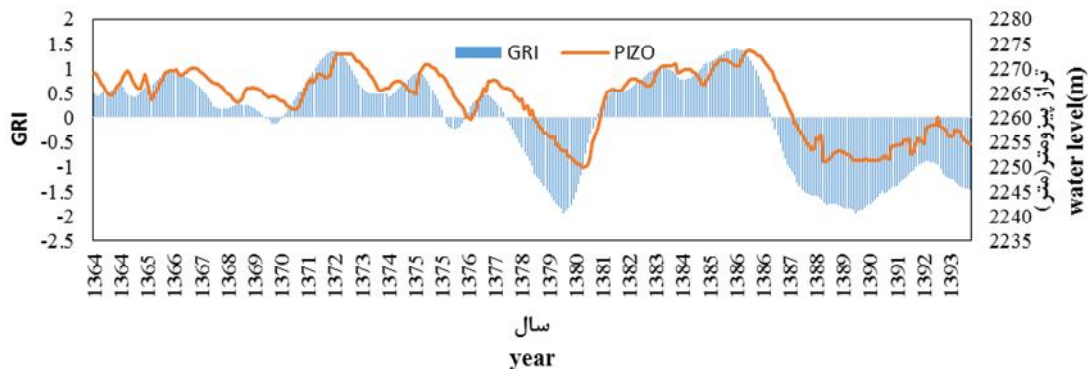
شکل ۲- تغییرات شاخص GRI در مقیاس زمانی یک‌ماهه در چاه مشاهده‌ای شماره شش در دوره زمانی ۹۴-۱۳۶۴.  
 Figure 2. Variation of GRI index at monthly time scale in piezometer No. 6 during 1985-2015.



شکل ۳- تغییرات شاخص GRI در مقیاس زمانی سه‌ماهه در چاه مشاهده‌ای شماره شش در دوره زمانی ۹۴-۱۳۶۴.  
 Figure 3. Variation of GRI index at 3-months time scale in piezometer No. 6 during 1985-2015.



شکل ۴- تغییرات شاخص GRI در مقیاس زمانی شش‌ماهه در چاه مشاهده‌ای شماره شش در دوره زمانی ۹۴-۱۳۶۴.  
Figure 4. Variation of GRI index at 6-months time scale in piezometer No. 6 during 1985-2015.



شکل ۵- تغییرات شاخص GRI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در چاه مشاهده‌ای شماره شش در دوره زمانی ۹۴-۱۳۶۴.  
Figure 5. Variation of GRI index at 12-months time scale in piezometer No. 6 during 1985-2015.

منتهی به اسفندماه ۱۳۹۴ است، مشاهده می‌شود مناطق مرکزی و شمال‌غربی دشت، در این ماه دچار خشک‌سالی بسیار شدید بوده است و بیش‌تر قسمت‌های شمال، شمال‌شرقی و شرق دشت را خشک‌سالی شدید در بر گرفته است. همان‌گونه که در شکل ۶- ب که مربوط به GRI سه‌ماهه منتهی به اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۴ می‌باشد، مشاهده می‌شود، فقط کمی از منطقه شمال‌غربی دشت، در این ماه دچار خشک‌سالی بسیار شدید بوده است و همچنین قسمت‌های بیش‌تری از غرب و مرکز را خشک‌سالی شدید در بر گرفته است. در شکل ۶- ج که مربوط به GRI شش‌ماهه منتهی به فروردین‌ماه ۱۳۹۴ می‌باشد، مشاهده می‌شود، مقدار

در شکل ۶ تغییرات مکانی مقادیر شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه برای نمونه آورده شده است. پس از بررسی و مقایسه روش‌های درون‌یابی که شامل روش‌های درون‌یابی فاصله معکوس وزن‌دار<sup>۱</sup> IDW، روش تابع شعاعی RBF<sup>۲</sup>، درون‌یابی چندجمله‌ای محلی<sup>۳</sup> LPI، و زمین‌آمار کریجینگ<sup>۴</sup>، روش IDW از دقت بالاتری برخوردار بود، بنابراین این روش برای رسم نقشه‌ها در دشت بروجن مورد استفاده قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۶- الف که مربوط به GRI یک‌ماهه

- 1- Inverse Distance Weighting
- 2- Radial Basis Functions
- 3- Local Polynomial Interpolation
- 4- Kriging

خشک باشد با بیشترین احتمال ماه بعدی نیز خشک خواهد بود. همچنین با توجه به جدول ۳ می‌توان به این موضوع نیز اشاره کرد که احتمال انتقال از حالت تر به حالت تر ۹۸ درصد و احتمال انتقال از حالت خشک بسیار شدید به حالت خشک بسیار شدید ۱۰۰ درصد می‌باشد.

در مقیاس شش‌ماهه در دشت بروجن با توجه به جدول ۳ احتمال گذر از حالت تر به تر بیشتر از بقیه حالت‌ها و ۹۸ درصد است. احتمال گذر از حالت خشک ملایم به تر برابر یک درصد می‌باشد و بقیه حالت‌های خشک به تر صفر می‌باشد و احتمال گذر از حالت تر به خشک ملایم چهار درصد می‌باشد و بقیه حالت‌ها صفر می‌باشد. احتمال این‌که در این مقیاس بعد از یک حالت تر، حالت خشک متوسط، شدید و بسیار شدید فرا رسد، وجود ندارد و این بدین معنی است که حتماً بعد از یک ترسالی به احتمال زیاد (۹۸ درصد) یک حالت تر اتفاق خواهد افتاد.

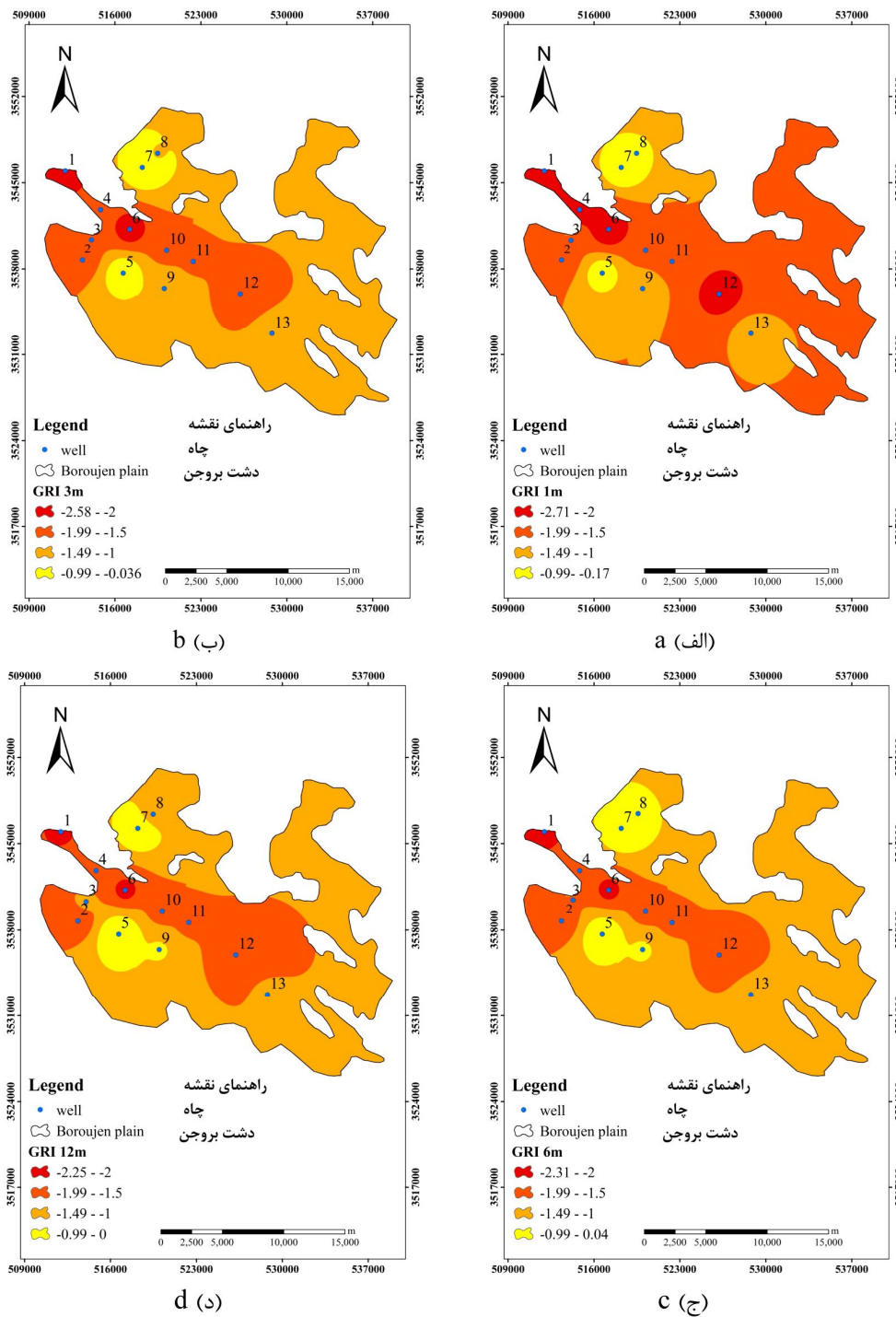
احتمال گذر از حالت خشک ملایم به خشک ملایم و همچنین خشک متوسط به خشک متوسط به‌ترتیب برابر ۹۲ و ۸۷ درصد می‌باشد، احتمال گذر از حالت خشک بسیار شدید به خشک بسیار شدید ۹۲ درصد است که اصطلاحاً از آن به‌عنوان تله خشک‌سالی یاد می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از احتمال انتقال در جدول ۳ برای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، می‌توان گفت که بعد از یک وضعیت تر، حالت تر و خشک‌سالی ضعیف اتفاق می‌افتد که احتمال گذر آن‌ها به‌ترتیب ۹۸ و یک درصد می‌باشد. و همچنین بعد از یک حالت خشک بسیار شدید، حالت خشک بسیار شدید و خشک شدید اتفاق خواهد افتاد. در این مقیاس نیز بیشترین احتمال انتقال در حالت گذر از تر به تر با مقدار ۹۸ درصد مشاهده می‌شود.

خیلی کمی از غرب دشت، در این ماه دچار خشک‌سالی بسیار شدید بوده است و نواحی غرب و مرکز خشک‌سالی شدید وسعت بیشتری را در بر گرفته است.

همان‌گونه که در شکل ۶- د که مربوط به GRI ۱۲ ماهه منتهی به فروردین‌ماه ۱۳۹۴ است، مشاهده می‌شود، قسمت ناچیزی از شمال‌غربی دشت، در این ماه دچار خشک‌سالی بسیار شدید بوده است و همچنین قسمت‌های بیش‌تری از غرب و مرکز را خشک‌سالی شدید در بر گرفته است. لازم به ذکر است که با افزایش مقیاس زمانی خشک‌سالی بسیار شدید کم‌تر می‌شود و خشک‌سالی شدید در قسمت‌های شمال و شمال‌شرقی و شرق دشت جای خود را به خشک‌سالی متوسط می‌دهد.

در جدول ۳ ماتریس احتمال انتقال دشت بروجن در مقیاس زمانی یک ماهه آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که احتمال انتقال از حالت ترسالی در ماه فعلی به حالت ترسالی در ماه بعدی بسیار بالاست و معادل ۹۸ درصد می‌باشد. در این دشت احتمال انتقال از چهار حالت خشک در ماه فعلی به حالت تر در ماه بعدی و همچنین از حالت تر در ماه فعلی به چهار حالت خشک در ماه بعدی ناچیز بوده و هر دو کم‌تر از شش درصد به‌دست آمده است. این نتایج نیز تداوم وضعیت رطوبتی دشت را تأیید می‌کند.

نتایج به‌دست آمده از ماتریس احتمال انتقال دشت بروجن در مقیاس زمانی سه ماهه بیانگر این است که احتمال گذر از وضعیت تر به وضعیت خشکی و همچنین احتمال گذر از وضعیت خشکی به وضعیت تر تقریباً برابر صفر بوده و می‌توان با درصد اطمینان بالا به عدم وجود چنین انتقالی اشاره کرد (جدول ۳). در این مقیاس زمانی اگر وضعیت ماه حاضر در حالت



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی شاخص GRI در مقیاس زمانی الف) یک ماهه منتهی به اسفندماه ۱۳۹۴، ب) سه ماهه منتهی به اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۴، ج) شش‌ماهه منتهی به فروردین ۱۳۹۴ و د) ۱۲ ماهه منتهی به فروردین ۱۳۹۴.

Figure 6. Delineation map of GRI index at a) monthly time scale ended to March 2015, b) 3-months time scale ended to May 2015, c) 6-months time scale ended to April 2015 and d) 12-months time scale ended to April 2015.

جدول ۳- ماتریس ضریب انتقال زنجیره مارکف مرتبه اول برای شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه دشت بروجن (۹۴-۱۳۶۴).

**Table 3. Matix of transition probability of first order Marcov chain for GRI index at 1, 3, 6 and 12 months time scales in Boroujen plain (1985-2015).**

	nd	md	od	sd	ed	مقیاس (Scale)
nd	0.98	0.016	0.00	0.00	0.00	۱ ماهه (1-month)
md	0.06	0.87	0.064	0.00	0.00	
od	0.00	0.083	0.75	0.17	0.00	
sd	0.00	0.00	0.08	0.74	0.18	
ed	0.00	0.00	0.00	0.40	0.60	
nd	0.98	0.01	0.00	0.00	0.00	۳ ماهه (3-months)
md	0.04	0.92	0.042	0.00	0.00	
od	0.00	0.04	0.87	0.09	0.00	
sd	0.00	0.00	0.02	0.86	0.11	
ed	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	
nd	0.98	0.01	0.00	0.00	0.00	۶ ماهه (6-months)
md	0.04	0.92	0.04	0.00	0.00	
od	0.00	0.04	0.87	0.09	0.00	
sd	0.00	0.00	0.03	0.92	0.05	
ed	0.00	0.00	0.00	0.08	0.92	
nd	0.98	0.01	0.00	0.00	0.00	۱۲ ماهه (12-months)
md	0.04	0.92	0.04	0.00	0.00	
od	0.00	0.05	0.89	0.05	0.00	
sd	0.00	0.00	0.00	0.93	0.07	
ed	0.00	0.00	0.00	0.13	0.87	

تمام مقیاس‌ها می‌باشد که در همه مقیاس‌های زمانی بیش‌ترین مقدار می‌باشد.

اگر ماتریس احتمال انتقال بی‌نهایت بار در خود ضرب شود، ماتریسی حاصل می‌شود که مقادیر تمامی سطرهای آن برابر می‌باشد. به این ماتریس، ماتریس احتمال تعادل یا ماتریس ایستا گفته می‌شود. در واقع احتمال انتقال از همه حالت‌ها به یک حالت خاص است. به کمک این احتمالات تعادلی، وضعیت آتی در درازمدت پیش‌بینی می‌شود.

به‌طورکلی در دشت بروجن برای شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی بررسی شده، گذر از حالت خشک‌سالی بسیار شدید به خشک‌سالی بسیار شدید بالا بوده به‌طوری‌که از مقدار احتمال ۶۰ درصد برای مقیاس یک‌ماهه تا مقدار احتمال ۱۰۰ درصد برای مقیاس سه‌ماهه افزایش یافته است. همچنین می‌توان یک مقدار ثابت برای وضعیت گذر از حالت تر به تر مشاهده کرد که این مقدار احتمال ۹۸ درصد برای

جدول ۴ مقادیر احتمال تعادل دشت بروجن برای شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴ برای حالت خشک ملایم با افزایش مقیاس زمانی شاخص، مقدار احتمال تعادل تا مقیاس شش‌ماهه افزایش و در مقیاس ۱۲ ماهه کاهش می‌یابد.

احتمال وقوع طبقه‌های رطوبتی مختلف در دشت بروجن در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، بیش‌ترین احتمال رویداد برای شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه به‌ترتیب مربوط به حالت خشک‌سالی شدید، خشک‌سالی شدید، خشک‌سالی ملایم و خشک‌سالی ملایم می‌باشد.

جدول ۴- ماتریس احتمال تعادل برای شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه دشت بروجن (۹۴-۱۳۶۴).

**Table 4. Equilibrium probability matrix for GRI index at 1, 3, 6 and 12 months time scales in Boroujen plain (1985-2015).**

nd	md	od	sd	ed	مقیاس (Scale)
0.6658	0.1267	0.0647	0.1024	0.0404	۱ ماهه (1-month)
0.6612	0.1301	0.0623	0.1192	0.0271	۳ ماهه (3-months)
0.6583	0.1393	0.0628	0.1038	0.0355	۶ ماهه (6-months)
0.6667	0.1220	0.0732	0.1220	0.0163	۱۲ ماه (12-months)

جدول ۵- احتمال رویداد دوره‌های رطوبتی مورد انتظار به‌وسیله زنجیره مارکف مرتبه اول در دشت بروجن.

**Table 5. Probability of occurring expected wetnes periods by first order Markov chain model in Boroujen plain.**

nd	md	od	sd	ed	مقیاس (Scale)
0.0081	0.0162	0.0162	0.0259	0.0189	۱ ماهه (1-month)
0.0054	0.0108	0.0081	0.0153	0.0136	۳ ماهه (3-months)
0.0055	0.0109	0.0082	0.0080	0.0055	۶ ماهه (6-months)
0.0056	0.0111	0.0056	0.0080	0.0083	۱۲ ماه (12-months)

میانگین تداوم رطوبتی متعلق به حالت تر با مقدار ۸۲ ماه و کم‌ترین مقدار آن نیز متعلق به حالت‌های خشک خیلی شدید با مقدار دو ماه می‌باشد. در مقیاس ۱۲ ماهه بیش‌ترین میانگین تداوم رطوبتی را حالت تر با مقدار ۱۱۹ ماه به خود اختصاص داده است.

جداول توافقی برای مدل مارکف مرتبه اول، دوم و سوم برای شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه برای دشت بروجن در جدول ۷ آورده شده است. همچنین ماتریس عملکرد متناظر POD، CSI و FAR در جدول ۸ درج شده است.

دوره‌های خشک و تر در این دشت دارای تداوم مختلف می‌باشد. برخی از این دوره‌ها کوتاه و برخی بلندمدت می‌باشند که این موضوع به‌طور ویژه برای برنامه‌ریزی‌های منابع آب و کشاورزی دارای اهمیت می‌باشد. از این‌رو پیش‌بینی میانگین تداوم خشک‌سالی و ترسالی می‌تواند اطلاعات مفیدی در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب قرار دهد.

جدول ۶ میانگین تداوم دوره‌های خشک و تر به‌وسیله زنجیره مارکف مرتبه اول را برای دشت بروجن در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. بر اساس این جدول در مقیاس یک‌ماهه بیش‌ترین

جدول ۶- میانگین تداوم دوره‌های رطوبتی مورد انتظار در دشت بروجن.

Table 6. Average of expected wetness periods duration in Boroujen plain.

nd	md	od	sd	ed	مقیاس (Scale)
82	8	4	4	2	۱ ماهه (1-month)
122	12	8	8	2	۳ ماهه (3-months)
121	13	8	13	7	۶ ماهه (6-months)
119	12	10	14	5	۱۲ ماه (12-months)

بروجن در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه و برای مدل مارکف مرتبه اول به ترتیب برابر ۰/۴۲، ۰/۵۰، ۰ و ۰ می‌باشد که نشان‌دهنده آنست که در مقیاس یک و سه‌ماهه کم‌تر از ۵۰ درصد از خشک‌سالی‌های پیش‌بینی‌شده، اتفاق نیفتاده‌اند، در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه نشان‌دهنده آن است که تمام خشک‌سالی‌های پیش‌بینی‌شده، اتفاق افتاده‌اند. برای دشت بروجن در مقیاس‌های زمانی یک، سه و شش‌ماهه و برای مدل مارکف مرتبه دوم مقدار FAR به ترتیب برابر ۰/۵۵، ۰/۶۷ و ۰ می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که در مقیاس یک و سه‌ماهه کم‌تر از ۶۸ درصد از خشک‌سالی‌های پیش‌بینی‌شده، اتفاق نیفتاده‌اند و در مقیاس شش‌ماهه نشان‌دهنده آن است که تمام خشک‌سالی‌های پیش‌بینی‌شده، اتفاق افتاده‌اند. مقدار FAR برای دشت بروجن در مقیاس‌های زمانی یک، سه و شش‌ماهه و برای مدل مارکف مرتبه سوم به ترتیب برابر ۰/۶۰، ۰/۶۲ و ۰ می‌باشد. که نشان‌دهنده آن است که در مقیاس یک و سه‌ماهه کم‌تر از ۶۲ درصد از خشک‌سالی‌های پیش‌بینی‌شده، اتفاق نیفتاده‌اند. مقدار FAR در مقیاس شش‌ماهه نشان‌دهنده آن است که تمام خشک‌سالی‌های پیش‌بینی‌شده، اتفاق افتاده‌اند. قابل ذکر است که در این مطالعه یک سال آخر دوره مورد بررسی پیش‌بینی‌شده است، بنابراین مقدار شاخص‌های CSI، POD و FAR برای شاخص GRI دوازده‌ماهه برای مدل مارکف مرتبه دوم و سوم محاسبه نشد (جدول‌های ۷ و ۸).

همان‌گونه که در جدول ۸ مشخص است. مقدار CSI برای دشت بروجن در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه و برای مدل مارکف مرتبه اول به ترتیب برابر ۰/۵۸، ۰/۵۰، ۱ و ۱ می‌باشد که نشانگر مهارت متوسط روش پیشنهادی در پیش‌بینی شرایط رطوبتی در مقیاس یک و سه‌ماهه می‌باشد، همچنین نشانگر مهارت خوب روش پیشنهادی در پیش‌بینی شرایط رطوبتی در مقیاس شش و ۱۲ ماهه می‌باشد. این مقادیر برای دشت بروجن در مقیاس‌های زمانی یک، سه و شش‌ماهه و برای مدل مارکف مرتبه دوم به ترتیب برابر ۰/۴۵، ۰/۳۳ و ۱ می‌باشد که نشانگر مهارت متوسط روش پیشنهادی در مقیاس یک و سه‌ماهه پیش‌بینی شرایط رطوبتی می‌باشد، همچنین نشانگر مهارت خوب روش پیشنهادی در مقیاس شش‌ماهه پیش‌بینی شرایط رطوبتی می‌باشد. مقدار CSI برای دشت بروجن در مقیاس‌های زمانی یک، سه و شش‌ماهه و برای مدل مارکف مرتبه سوم به ترتیب برابر ۰/۴۰، ۰/۳۸ و ۱ می‌باشد که نشانگر مهارت متوسط روش پیشنهادی در مقیاس یک و سه‌ماهه پیش‌بینی شرایط رطوبتی می‌باشد، همچنین نشانگر مهارت خوب روش پیشنهادی در مقیاس شش‌ماهه پیش‌بینی شرایط رطوبتی می‌باشد. مقادیر POD برای دشت بروجن در تمام مقیاس‌های زمانی برای مدل مارکف مرتبه اول، دوم و سوم برابر یک می‌باشد که نشانگر آن است که ۱۰۰ درصد رویدادهای مشاهداتی به‌طور صحیح توسط روش پیشنهادی پیش‌بینی شده‌اند. مقدار FAR برای دشت

جدول ۷- جدول توافقی پیش‌بینی‌ها با زنجیره مارکف مرتبه اول، دوم و سوم و شاخص GRI.

Table 7. Contingent table of predictions by First, second and third Marcov chain model and GRI index.

		مشاهده شده (Observed)				
		بله (Yes)		خیر (No)		
		GRI-1	GRI-3	GRI-1	GRI-3	مرتبه زنجیره مارکف
		GRI-6	GRI-12	GRI-6	GRI-12	(Order of Marcov chain)
پیش‌بینی شده (Predicted)	(Yes) بله	7	5	5	5	مرتبه ۱ (First order)
		7	1	0	0	
		0	0	0	0	
		0	0	0	0	
	(No) خیر	5	3	6	6	مرتبه ۲ (Second order)
		6	-	0	-	
		0	0	0	0	
		0	-	0	-	
	(Yes) بله	4	3	6	5	مرتبه ۳ (Third order)
		5	-	0	-	
		0	0	0	0	
		0	-	0	-	
(No) خیر	0	0	0	0		
	0	-	0	-		

جدول ۸- مقادیر CSI، POD و FAR محاسبه شده از اعداد جدول ۷.

Table 8. The calculated values of CSI, POD and FAR from values presented in Table 7.

		مرتبه ۱ (First order)		مرتبه ۲ (Second order)		مرتبه ۳ (Third order)	
		GRI1	GRI3	GRI1	GRI3	GRI1	GRI3
		GRI6	GRI12	GRI6	GRI12	GRI6	GRI12
CSI		0.58	0.50	0.45	0.33	0.40	0.38
		1	1	1	-	1	-
POD		1	1	1	1	1	1
		1	1	1	-	1	-
Far		0.42	0.50	0.55	0.67	0.60	0.62
		0	0	0	-	0	-



مقیاس زمانی ۱ ماهه، بر اساس شاخص GRI، در اسفند ۱۳۹۴ رخ داده است. بر اساس نتایج دو آزمون AIC و BIC زنجیره مارکف مرتبه یک، بهترین مرتبه برای پیش‌بینی خشک‌سالی می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج حاصل از روش جدول توافقی برای مرتبه‌های ۱، ۲ و ۳ در دشت بروجن نشان داد که هرچه مرتبه مارکف کم‌تر باشد پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر است. نقشه پهنه‌بندی شاخص GRI در دشت بروجن نشان می‌دهد که در دوره مورد بررسی، بخش‌های میانی دشت اغلب با خشک‌سالی شدید مواجه شده است.

### نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر شاخص خشک‌سالی GRI برای پایش شرایط رطوبتی دشت ممنوعه بروجن مورد استفاده قرار گرفت. همچنین وضعیت خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی این دشت در آینده با روش زنجیره مارکف پیش‌بینی شد. نتایج حاصل از بررسی شاخص GRI نشان داد که خشک‌سالی آب زیرزمینی در دشت بروجن در سال ۱۳۸۷ آغاز شده است. همچنین هرچه مقیاس زمانی شاخص افزایش یابد، تداوم خشک‌سالی افزایش و شدت آن کاهش می‌یابد. به‌گونه‌ای که شدیدترین خشک‌سالی در

### منابع

- Ahmad-Akhoormeh, M., Nouhegara Soleimani Motlagh, M., and Vatai-Semirimi, M. 2015. Investigation of Groundwater Drought by Using SWI and GRI Indices in Marvdasht Kharameh Fars province Aquifer. The Iranian Society of Irrigation and Water Engineering. 21: 118-105. (In Persian)
- Arritt, R.W., and Frank, W.M. 1985. Experiments in probability of precipitation amount forecasting using model output statistics. Monthly Weather Review. 113: 1837-1851.
- Baziyarpoor, H., and Nadi, M. 2017. Probabilistic analysis of drought severity classes by using Markov chain model in different climates of Iran. The Second National Iranian Conference on Hydrology. 20 July. Shahrekord University. Shahrekord. (In Persian)
- Bettge, A.G., Baumhefne, D.P., and Chervin, R.M. 1981. On the verification of seasonal climate forecasts. Bulletin of the American Meteorological Society. 62: 1654-1665.
- Das, S., Choudhury, R.M., Gandhi, S., and Josh, V. 2016. Application of earth observation data and Standardized Precipitation Index based approach for meteorological drought monitoring, assessment and prediction over Kutch, Gujarat, India. Inter. J. Environ. Geoinf. 3: 2. 24-37.
- Doswell, C.A., III and Flueck, J.A. 1989. Forecasting and verifying in a field research project: DOPLIGHT 87. Weather and Forecasting. 4: 97-109.
- Donaldson, R., Dyer, R., and Krauss, M. 1975. An objective evaluator of techniques for predicting severe weather events. Preprints, Ninth Conf. on Severe Local Storms. American Meteorological Society, Norman. OK. Pp: 321-326.
- Gabriel, K.R., and Neumann, J. 1962. A Markov chain model for daily rain fall occurrence at Tel Aviv. Quar. J. Meteorol. Soc. 88: 90-95.
- Gandin, L.S., and Murphy, A.H. 1992. Equitable skill scores for categorical forecasts. Mon. Wea. Rev. 120: 361-370.
- Kostopoulou, E., Bianrakopoulos, C., Krapsiti, D., and Karali, A. 2017. Temporal and Spatial Trends of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece Using Observations and Output from Regional Climate Models. Perspectives on Atmospheric Sciences. Springer International Publishing. Pp: 475-481.
- MacDonald, A., Calow, M.R.C., MacDonald, D.M.J., Darling, W.G., and Dochartaigh, Ó. 2009. What impact will climate change have on rural water supplies in Africa. Hydrol. Sci. J. 54: 4. 691-703.

12. McCoy, M.C. 1986. Severe-storm-forecast results from the PROFS 1983 forecast experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 67: 155-164.
13. Mendicino, G.A., and Senatore, P. 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Hydrol. J.* 357: 282-302.
14. Meddi, H., Meddi, M., and Assani, A. 2014. Study of drought in seven Algerian plains, *Arabi. J. Sci. Engin.* 39: 339-359.
15. Mishra, A.K., and Singh, V.P. 2010. A review of drought concepts. *J. Hydrol.* 391: 202-216.
16. Mourad, L., Brucker, J.M., Mourad, L., Soltane, A., and Mounir, S. 2015. Analysis of drought areas in Northern Algeria using Markov chains. *J. Sci. Syst.* 124: 1. 61-70.
17. Piyadasa, P.M., and Sonnadara, D.U.J. 2010. Analysis of wet and dry behavior of weather through Markov models, *Proceedings of the Technical Sessions*. Pp: 25-32.
18. Villholth, K.G., Tottrup, C., Stendel, M., and Maherry, A. 2013. Integrated mapping of groundwater drought risk in the Southern African Development Community (SADC) region. *Hydrogeol. J.* 21: 4. 863-885.
19. Wilhite, D.A., and Glantz, M.H. 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definition. *Water International*. 10: 111-120.
20. Wilks, D.S. 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*. Academic Press. 467p.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(2), 2019*

*<http://jwsc.gau.ac.ir>*

*DOI: 10.22069/jwsc.2019.15085.3048*

## **Monitoring and Forecasting of Groundwater Drought Using Groundwater Resource Index (GRI) and First to Third- Order Markov Chain Models (Case study: Boroujen Plain)**

**A. Khosravi Dehkordi<sup>1</sup>, \*R. Mirabbasi Najafabadi<sup>2</sup>, H. Samadi Boroujeni<sup>2</sup> and A.R. Ghasemi Dastgerdi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Shahrekord University, <sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Shahrekord University, <sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Shahrekord University

Received: 06.19.2018; Accepted: 01.14.2019

### **Abstract**

**Background and Objectives:** Management of water resources, especially groundwater, is important in arid and semi-arid regions. One of the important issues in optimum water resources management is the prediction of drought conditions. Groundwater is considered as the main resources of water supply for agriculture, industry and drinking uses in Boroujen plain. Therefore, it is important to investigate the drought condition of groundwater resources in the planning and sustainable management of these resources. So far, various methods have been developed and used by researchers to predict various types of droughts. One of these methods is the prediction of wetness conditions by the Markov chain. In most of the previous studies in the field of drought prediction, the Markov chain of first and second orders have been used. In this study, groundwater droughts in Boroujen Plain during the years 1985 to 2015 are assessed and the wetness conditions of this plain are predicted using the third order Markov chain model.

**Materials and Methods:** In order to assess the groundwater droughts in the Boroujen Plain, the GRI index values were calculated on the time scales of 1, 3, 6 and 12 months. For this purpose, the data of groundwater levels of 13 piezometric wells in Boroujen plain during a 31 year period (1985-2015) were used. In order to predict the GRI index values in Broujen plain for the next months, the first, second and third- order Markov chain models were used and the performance of these models was evaluated based on contingency table method. After forming the contingency table from the results of first, second and third- order Markov chain models, the values of CSI, POD and FAR statistics were calculated. The CSI values for Broujen plain in the time scales of 1, 3, 6 and 12 months for the first order Markov chain model were calculated equal to 0.58, 0.50, 1.0 and 1.0, respectively. The CSI values for the second order Markov chain model in the time scales of 1, 3 and 6 months were obtained equal to 0.45, 0.33 and 1.0 and for third order Markov chain model equal to 0.40, 0.38 and 1.0, respectively, which indicate the medium skill of the developed method in the prediction of wetness conditions at 1 and 3 months time scales and good skill at 6 months' time scale. In addition, the delineation maps of GRI index were drawn by selecting the most suitable interpolation method.

**Results:** The delineation map of GRI in the Broujen Plain shows that the middle parts of the plain often experienced severe droughts. Comparing the performance of different orders of Markov chain in predicting the wetness conditions of Boroujen plain based on CSI, POD and FAR statistics showed that first order Markov chain method presented more accurate results

---

\* Corresponding Author; Email: [mirabbasi\\_r@yahoo.com](mailto:mirabbasi_r@yahoo.com)

than other models in predicting GRI values in all time scales. Therefore, it can be used to predict the groundwater drought in Boroujen Plain.

**Conclusion:** The results of the GRI survey for Boroujen plain showed that during the period under study, the drought spell of groundwater began in 2008. In general, the severe droughts that have occurred in recent years due to reduced atmospheric precipitation, along with the overexploitation of groundwater have caused the severe decline in groundwater levels, which leads to degradation of groundwater quality and land subsidence in the Boroujen plain.

**Keywords:** Broujen aquifer, Drought prediction, GRI index, Groundwater drought, Markov chain