



پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از شاخص GRI و مدل زنجیره مارکوف

امیر خسروی دهکردی^۱، رسول میرعباسی نجف‌آبادی^{۲*}، حسین صمدی بروجنی^۳، احمدرضا قاسمی دستگردی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

* نویسنده مسئول: mirabbasi_r@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۷

چکیده

مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، از آمار ۳۲ چاه پیژومتری در دشت شهرکرد در دوره ۳۱ ساله (۹۴-۱۳۶۴) استفاده شد. سری زمانی شاخص GRI با مقیاس زمانی یک ماهه نشان داد که در ابتدای دوره آماری (۱۳۶۴) تا اواخر ۱۳۷۸، بلندترین دوره تر سالی به وقوع پیوسته که بیشترین مقدار شاخص برابر ۱/۸۳ در آبان ماه ۱۳۷۲ بوده است. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی نیز از مرداد ماه ۱۳۸۷ شروع شده و تا انتهای دوره آماری (۱۳۹۴) ادامه یافته است. برای پیش‌بینی مقادیر شاخص GRI در ماه‌های آتی در دشت شهرکرد از روش زنجیره مارکوف با مرتبه‌های اول، دوم و سوم استفاده گردید و عملکرد روش زنجیره مارکوف با روش جدول توافقی مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از تهیه جدول توافقی برای زنجیره مارکوف مرتبه اول، دوم و سوم، مقادیر آماره‌های CSI، POD و FAR محاسبه شد. نتایج نشان داد که روش زنجیره مارکوف در هر سه مرتبه از دقت خوبی در پیش‌بینی مقادیر شاخص GRI در یک، دو و سه ماه آینده برخوردار بوده است، لذا از آن می‌توان برای پیش‌بینی خشک‌سالی آب زیرزمینی دشت شهرکرد استفاده کرد. به طور کلی 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 شهرکرد، احتمال انتقال، خشک‌سالی آب زیرزمینی، زنجیره مارکوف، شاخص GRI.

مقدمه

کاهش بارندگی می‌باشد (داس سومانتا و همکاران، ۲۰۱۶). کمبود آب در دهه‌های اخیر در حال تبدیل شدن به یک تهدید جدی است که ممکن است اثرات زیست محیطی و اجتماعی-اقتصادی شدیدی به دنبال داشته باشد. افزایش دمای جهانی پیش‌بینی شده و تغییرات در توزیع منطقه‌ای و شدت بارش ممکن است فراوانی، شدت و مدت خشک‌سالی‌ها را تغییر دهد

یکی از اساسی‌ترین نیازهای بشر دسترس به آب بوده و کمبود آن می‌تواند موجب بروز بحران‌های جدی در زندگی انسان‌ها شود و به طور غیرمستقیم زندگی اجتماعی آن‌ها را نیز تحت تأثیر خود قرار دهد (ویله‌ها، ۱۹۸۵). کمبود آب را می‌توان به عنوان معلول خشک‌سالی بر شمرده که خود متأثر از

خشک سالی آب زیرزمینی، شاخص منبع آب زیرزمینی GRI^{11} می‌باشد. شاخص GRI توسط مندسینو و همکاران (۲۰۰۸) به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای مدل سازی، پایش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شد. مقادیر این شاخص تغییرات مکانی زیادی دارد و نسبت به خصوصیات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه نیز حساس می‌باشد. مهم‌ترین قابلیت این شاخص همبستگی بالای آن با متوسط رواناب در برخی از رودخانه‌های حوضه در پیش‌بینی خشک‌سالی‌های فصل تابستان می‌باشد (مندسینو و همکاران، ۲۰۰۸). حساسیت و متین‌فر (۱۳۹۵) تغییرات کمی آبخوان دشت الشتر را با استفاده از شاخص خشک‌سالی منبع آب زیرزمینی (GRI) مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که آبخوان الشتر دچار خشک‌سالی شدید می‌باشد، به طوری که مقدار شاخص GRI آن برابر با $-۲/۰۶$ بود و وضعیت چاه‌های تیمورسوری علیا، چناره، ده آقا، کلاه کج و میان والان از شرایط نزدیک به نرمال به شرایط خشک‌سالی شدید رسیده‌اند. خواستار و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی تأثیر خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت بروجن با استفاده از دو شاخص GRI و SPI پرداختند. نتایج نشان داد که این منطقه از سال ۱۳۸۶ دچار خشک‌سالی شدید هواشناسی و هیدرولوژیکی شده است و در سال‌های آتی روند خشک‌سالی آب زیرزمینی ادامه داشته و منطقه را با بحران تأمین آب روبرو خواهد کرد. یکی از مؤثرترین عواملی که در تهیه و تدوین طرح‌های مقابله با خشک‌سالی و همچنین مدیریت آن حائز اهمیت است، طراحی سیستم‌های پیش‌بینی خشک‌سالی است تا بتوان اثرات مخرب ناشی از آن را به حداقل رساند. تاکنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی شرایط رطوبتی توسط محققین مختلف توسعه داده شده است که از آن جمله می‌توان به روش زنجیره مارکوف^{۱۲}، مدل لوگ خطی، سری‌های زمانی، مدل‌های هوش مصنوعی و

(کاستو پائولو و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به موقعیت کشور ایران از جمله کشورهای است که در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع گردیده و در سال‌های اخیر با خشک‌سالی‌ها و کمبود آب شدید مواجه شده است. در چنین شرایطی کنترل کیفیت آب‌های موجود و برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری از این آب‌ها با توجه به طبقه کیفیت آن‌ها ضروری است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). خشک‌سالی‌ها را به انواع مختلفی شامل هواشناسی، هیدرولوژیکی، آب زیرزمینی، کشاورزی، اقتصادی-اجتماعی تقسیم کرده‌اند. مفهوم خشک‌سالی آب زیرزمینی یا GWD^{10} ، شرایط بحرانی آب‌های زیرزمینی را در طی یک خشک‌سالی هواشناسی طولانی مدت نشان می‌دهد که خود باعث غیرقابل دسترس شدن منابع آب‌های زیرزمینی و یا کاهش آن‌ها برای استفاده انسان می‌شود (ویلهاپت و همکاران، ۲۰۱۳). واژه خشک‌سالی آب زیرزمینی اولین بار توسط روتولیس (۱۹۸۷) ابداع شد و بعد از آن توسط کالو و همکاران (۱۹۹۷) به تفصیل شرح داده شد. آن‌ها چارچوب مفهومی برای نگارش جامع (انسانی و فیزیکی) آسیب‌پذیری خشک‌سالی آب زیرزمینی و تهیه نقشه خشک‌سالی در اتیوپی ارائه دادند (مک دونالد و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از شیوه‌های متداول برای ارزیابی شرایط رطوبتی، استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی است. تاکنون شاخص‌های بسیاری توسط محققان برای کمی کردن خشک‌سالی پیشنهاد شده است که از متغیرهای هیدرولوژیکی و هواشناسی مشتق شده‌اند. هر کدام از این شاخص‌ها دارای نقاط قوت و ضعف به خصوصی هستند. میسرا و سینگ (۲۰۱۰) مروری جامع از شاخص‌های مختلف خشک‌سالی به همراه نقاط قوت و محدودیت‌های آن‌ها ارائه دادند. تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه تحلیل و پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها در ایران و کشورهای دیگر توسط محققان انجام شده است که از مهم‌ترین این شاخص‌ها برای بررسی

12. Markov Chain

10. Groundwater Drought

11. Groundwater Resource Index

آبخوان مرودشت خرامه در استان فارس با استفاده از شاخص‌های *GRI* و *SWI* 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. به گونه‌ای که شدیدترین خشک‌سالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه بر اساس شاخص *GRI* در مهر ماه 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 تغییر مکان داده که هم‌زمان بر شدت آن نیز افزوده شده است. کرمی و شیرزاد (۱۳۹۵) به پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی استان سمنان با شاخص بارش استاندارد شده (*SPI*) و روش زنجیره مارکوف پرداختند که نتایج حاصل نشان داد شدیدترین خشک‌سالی در استان سمنان مربوط به ایستگاه شهرد در مقیاس زمانی شش ماهه بوده است و شدت خشک‌سالی در مناطق مرکزی استان بیشتر از سایر قسمت‌ها می‌باشد. بازپور و نادری (۱۳۹۶) به تحلیل احتمالاتی طبقات شدت خشک‌سالی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف 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. به نظر می‌رسد با افزایش پنجره زمانی *SPI*، تداوم ثبات خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های شدید افزایش می‌یابد. بررسی منابع نشان می‌دهد که اغلب مطالعات پیشین، از مدل زنجیره مارکوف مرتبه اول برای پیش‌بینی خشک‌سالی یک ماه بعد استفاده نموده‌اند. هدف از مطالعه حاضر، پایش خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی دشت شهرکرد با شاخص *GRI*، تهیه نقشه پهنه‌بندی آن و همچنین پیش‌بینی خشک‌سالی آب زیرزمینی تا سه ماه آینده به وسیله زنجیره مارکوف با مرتبه‌های اول، دوم و سوم و ارزیابی دقت این مدل در پیش‌بینی خشک‌سالی آب زیرزمینی می‌باشد.

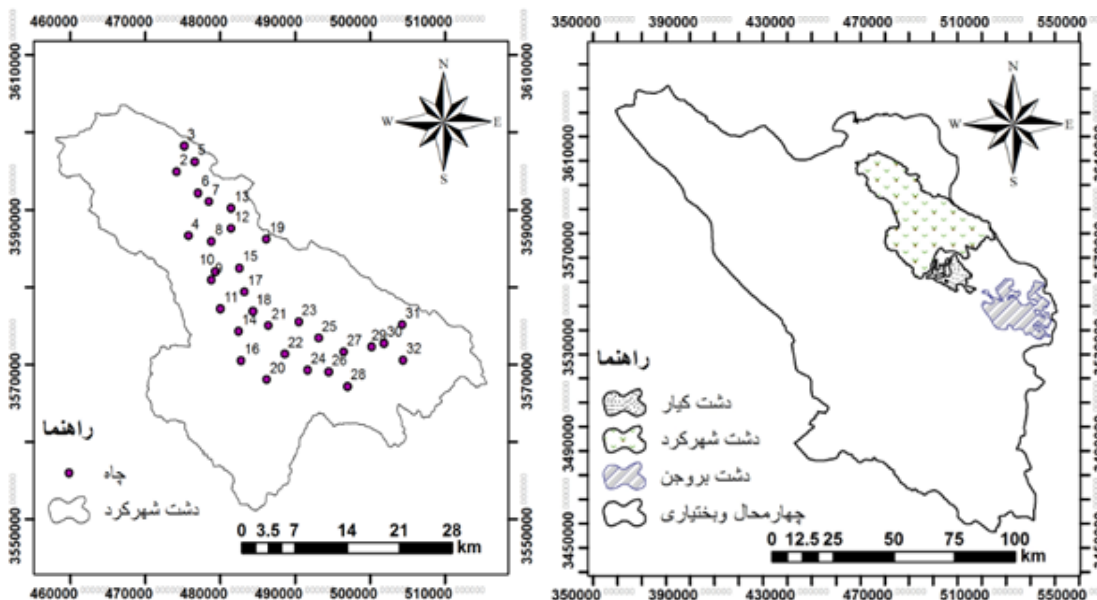
... اشاره نمود. مطالعات متعددی در زمینه کاربرد زنجیره مارکوف در مدل‌سازی احتمالاتی رخدادهای خشک‌سالی به انجام رسیده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. برای اولین بار مدل زنجیره مارکوف به منظور پیش‌بینی تعداد روزهای بارشی توسط گابریل و نیومن (۱۹۶۲) انجام شد. در سریلانکا با توجه به داده‌های بلند مدت سه ایستگاه و با استفاده از مدل زنجیره مارکوف پیش‌بینی وقوع بارندگی روزانه انجام شد و نتایج نشان داد که هر دو مرتبه اول و دوم زنجیره مارکوف با دقت $۷۲ \pm ۴\%$ قادر به پیش‌بینی است (پیاداسا و سونادارا، ۲۰۱۰). مدی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از شاخص بارش استاندارد (*SPI*) شده و زنجیره مارکوف به پیش‌بینی خشک‌سالی در ۷ منطقه الجزایر پرداختند. نتایج آن‌ها احتمال وقوع ترسالی در دو فصل زمستان و بهار را در حدود ۵۰ درصد نشان داد. موراد و همکاران (۲۰۱۵) روند وقوع خشک‌سالی در شمال الجزایر را بررسی کردند. در این مطالعه، از شاخص *SPI* و روش زنجیره مارکوف استفاده شد. نتایج نشان داد که احتمال وقوع کلاس خشک‌سالی شدید در آینده به طور قابل توجهی در حال افزایش است، به طوری که احتمال خشک‌سالی از مقدار $۰/۲۶۵$ در سال ۲۰۰۵ به مقدار احتمال پایدار $۰/۵۷۶$ در سال ۲۰۴۱ خواهد رسید. حنفی و همکاران (۱۳۹۰) به تحلیل خشک‌سالی استان تهران با استفاده از شاخص *SPI* و پیش‌بینی آن بر اساس مدل زنجیره مارکوف پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که فراوان‌ترین وقایع خشک‌سالی در تداوم‌های یک تا شش ماهه رخ می‌دهند. همچنین شدیدترین خشک‌سالی در تهران در سال ۱۹۹۵ با مقدار *SPI* بیش از ۳- بوده است. میرموسوی و زهره‌وندی (۱۳۹۲) احتمال رخداد بارش در استان همدان را با استفاده از داده‌های روزانه بارش هفت ایستگاه این استان و با کاربرد مدل مرتبه اول زنجیره مارکوف محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها از هفته ۱ تا ۲۱ و از هفته ۴۲ تا ۵۲ بیشترین احتمال وقوع بارش در طول سال وجود دارد. احمدی‌آخوومه و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

حوضه آبریز شهرکرد در شمال استان چهارمحال و بختیاری با وسعت ۱۲۴۴ کیلومتر مربع می‌باشد که ۵۵۱ کیلومتر از آن را دشت و مابقی را کوهستان تشکیل داده است. دشت شهرکرد بین عرض جغرافیایی شمالی ۳۲ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه و طول شرقی ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه قرار دارد. ارتفاع این دشت از سطح آزاد دریا بین حداقل ۱۹۹۶ متر و حداکثر ۳۲۶۰ متر می‌باشد. رودخانه اصلی آن رود جهان‌بین می‌باشد که پس از دریافت آب مازاد چشمه‌ها و قنوات در نواحی جنوبی به رودخانه کیار متصل می‌گردد. این دشت دارای ۴۱۷ حلقه چاه کشاورزی، ۵۹ حلقه چاه آب شرب، ۱۵۹ حلقه چاه آب صنعتی، ۷۹ رشته قنات، ۴۰ دهنه چشمه فعال و ۳۴ حلقه چاه مشاهده‌ای می‌باشد که برای این مطالعه از داده‌های

ماهانه سطح آب زیرزمینی ۳۲ پیژومتر با دوره آماری مشترک استفاده شد. پراکنش چاه‌های بهره‌برداری در دشت شهرکرد به گونه‌ای است که اکثر آن‌ها در نواحی شمالی و مرکزی قرار گرفته است و سالانه حدود ۳۳۰ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی دشت را تخلیه کرده و به مصارف گوناگون می‌رساند. درصد بسیار زیادی از آن (بیش از ۹۰ درصد) در بخش کشاورزی و در فصل زراعی استفاده می‌شود. بخشی از آب شرب شهرستان شهرکرد نیز از همین چاه‌ها تأمین می‌شود. دشت شهرکرد در سال‌های اخیر با خشک‌سالی‌های پی‌درپی و شدیدی مواجه بوده است که باعث خسارت به بخش‌های مختلف شده است. این خشک‌سالی‌ها باعث کاهش منابع آب سطحی و به تبع آن افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی شده است. موقعیت جغرافیایی دشت شهرکرد و پیژومترهای مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت شهرکرد و پیژومترهای مورد مطالعه.

روش کار

به منظور انجام این پژوهش ابتدا آمار ۳۲ حلقه چاه پیژومتری که از شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری تهیه شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. بعد از مرتب

سازی و بازسازی داده‌های مفقود، یک دوره آماری مشترک ۳۱ ساله (از سال ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)، برای بررسی خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی انتخاب شد. به منظور تشخیص و پایش خشک‌سالی آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی دشت شهرکرد از شاخص

شاخص GRI توسط مهندسین و همکاران (۲۰۰۸) به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای مدل سازی، پایش و پیش بینی وضعیت خشک سالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شد. مقدار شاخص GRI با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

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

که در آن، $GRI_{y,m}$ ارزش شاخص در ماه m از سال y ، $D_{y,m}$ ارزش سطح ایستابی در ماه m از سال y ، $\mu_{D,m}$ میانگین داده های سطح ایستابی ماه m برای D سال و $\sigma_{D,m}$ انحراف معیار داده های سطح ایستابی ماه m برای D سال می باشند. جدول ۱ کلاس های مختلف خشک سالی و ترسالی را با توجه به GRI نشان می دهد.

جدول ۱- طبقه بندی شدت شاخص GRI توسط مهندسین و همکاران (۲۰۰۸).

علامت	مقادیر GRI	کلاس	j
nd	$0 <$	بدون خشک سالی	۱
md	0 تا $-0/99$	خشک سالی ملایم	۲
od	-1 تا $-1/49$	خشک سالی متوسط	۳
sd	$-1/5$ تا $-1/99$	خشک سالی شدید	۴
ed	$-2 \geq$	خشک سالی بسیار شدید	۵

GRI استفاده گردید. مقادیر شاخص GRI در مقیاس یک، سه، شش و ۱۲ ماهه برای کل منطقه مورد مطالعه و برای هر کدام از چاه ها به صورت جداگانه محاسبه شد. سپس با استفاده از روش زنجیره مارکوف وضعیت رطوبتی برای اول، دوم و سوم ماه آینده به ترتیب با زنجیره مارکوف مرتبه اول، دوم و سوم انجام گرفت. در نهایت دقت هر روش بر اساس آماره های مستخرج از جدول توافقی مورد ارزیابی قرار گرفت و بهترین مرتبه زنجیره مارکوف تعیین گردید.

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

(sd)، خشک سالی متوسط (od)، خشک سالی ملایم (md) و ترسالی (nd) محاسبه گردید:

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

که در آن، i و j کلاس رطوبتی می باشند که از ۱ تا ۵ (به ترتیب معادل کلاس های nd ، md ، od ، sd و ed) تغییر می کنند؛ P_i^* احتمال تعادل کلاس رطوبتی مورد نظر، P_{ji} احتمال انتقال از کلاس رطوبتی j ام (به جز کلاس رطوبتی مورد نظر i ام)، به کلاس رطوبتی i ام می باشد. 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 ملایم به ماه خشک متوسط و N تعداد کل حالات انتقال ممکن از یک کلاس رطوبتی به کلاس رطوبتی دیگر می باشد. برای تعیین دوره های خشک و تر مورد انتظار در

مدل زنجیره مارکوف

تجزیه و تحلیل مارکوف یا زنجیره مارکوف مشابه ابزاری توصیفی است که هدف عمده اش پیش بینی رفتار آینده است. این روش تداعی کننده برنامه ریزی پویاست و حتی برای حل مسائل برنامه ریزی پویا آن را به کار می برند. روش مارکوف روشی تحلیلی است که این امکان را فراهم می آورد تا آینده را با به کار بردن حالت های احتمالی و ماتریس احتمالات انتقال پیش بینی نمود. در این مطالعه، بعد از محاسبه مقادیر شاخص GRI ، با استفاده از جدول (۱) وضعیت رطوبتی ایستگاه مورد نظر در هر ماه از هر سال و برای مقیاس های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه مشخص می شود و فراوانی نسبی آن برآورد می گردد. سپس ماتریس احتمال انتقال تشکیل می گردد. در مرحله بعد با استفاده از مقادیر احتمال انتقال شرطی، احتمال تعادل برای هر یک از حالت های خشک سالی بسیار شدید (ed)، خشک سالی شدید

که در آن، $E(Li)$ تداوم خشک‌سالی در آینده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه از زنجیره مارکوف مرتبه ۲ و ۳ نیز استفاده شده که به خاطر مشابه بودن فرمول‌ها از ارائه آن‌ها خودداری شد.

ارزیابی عملکرد مدل زنجیره مارکوف

به منظور صحت‌سنجی پیش‌بینی‌های آماری در علم هواشناسی، شیوه‌های امتیازدهی زیادی توسط محققان توسعه داده شده است (بتگه و همکاران، ۱۹۸۱؛ داسول و فلاک، ۱۹۸۹؛ ویلکس، ۱۹۹۵). یکی از این روش‌ها تبدیل فرم احتمالاتی به فرم بله/نه برای استفاده در جدول توافقی^{۱۳} (مقادیر صحیح و غلط می‌باشد) گاندین و مورفی، ۱۹۹۲). هر ستون از جدول توافقی، مقدار پیش‌بینی شده و هر سطر آن مقدار واقعی (مشاهده شده) را نشان می‌دهد. در هر جدول توافقی 2×2 چهار ترکیب از پیش‌بینی‌ها (بله یا نه) و مشاهدات (بله یا نه) وجود دارد که عبارت‌اند از:

- 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 یک پیشامد روی ندهد و روی نمی‌دهد. جدول ۲ نمونه‌ای از جدول توافقی 2×2 را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نمونه‌ای از جدول توافقی 2×2

		مشاهده شده	
		بله	خیر
پیش‌بینی	بله	پیش‌بینی مثبت درست (Hit)	پیش‌بینی مثبت نادرست (False alarm)
	خیر	پیش‌بینی منفی نادرست (Miss)	پیش‌بینی منفی درست (Correct negative)

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 روابط زیر به دست می‌آیند:

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

برای به دست 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، $E(i)$ 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) می‌باشد.

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:

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

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 پیزومتری می‌باشد. در این میان به نظر می‌رسد شاخص *GRI* در مقیاس شش ماهه از تطابق بهتری با تراز آب زیرزمینی برخوردار است. تغییرات تراز پیزومتری در دشت شهرکرد نیز تا حدودی منعکس کننده اثرات مدیریت بهره‌برداری اعمال شده در سال‌های قبل و همچنین تغییرات میزان بارش در منطقه می‌باشد.

بر اساس شکل ۲، در نمودار سری زمانی شاخص *GRI* با مقیاس زمانی یک ماهه، در ابتدای دوره آماری (۱۳۶۴) تا اواخر ۱۳۷۸، بلندترین دوره ترسالی به وقوع پیوسته که بیشترین مقدار شاخص برابر ۱/۸۳ در آبان ماه ۱۳۷۲ می‌باشد. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی نیز از مرداد ماه ۱۳۸۷ شروع شده و تا انتهای دوره آماری (۱۳۹۴) ادامه یافته است. کمترین مقدار شاخص در این دوره برابر ۲/۵- در مرداد ۱۳۹۴ می‌باشد. در شکل ۳ که مربوط به شاخص *GRI* با مقیاس سه ماهه می‌باشد، طولانی‌ترین دوره ترسالی از سال ۱۳۶۴ تا بهمن ماه ۱۳۷۸ رخ داده که بیشترین مقدار شاخص *GRI* در این دوره برابر ۱/۷۵ در شهریور ۱۳۷۲ به وقوع پیوسته است. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی بر اساس *GRI* سه ماهه نیز از مردادماه ۱۳۸۷ تا انتهای دوره آماری بوده که کمترین مقدار شاخص در این دوره برابر با ۲/۴۷- در دی ماه ۱۳۹۳ روی داده است. شکل ۴ مربوط به شاخص *GRI* با مقیاس زمانی شش ماهه است. طولانی‌ترین دوره ترسالی بر اساس شاخص *GRI* شش ماهه بین سال‌های ۱۳۶۴ تا آذرماه ۱۳۷۸ بوده که بیشترین مقدار آن معادل ۱/۷۳ در خردادماه ۱۳۷۲ به دست آمده است. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی بر اساس شاخص شش ماهه از اردیبهشت ماه ۱۳۸۷ تا انتهای دوره آماری به طول انجامیده و کمترین مقدار شاخص در این دوره برابر ۲/۴۳- در خرداد ماه ۱۳۹۳ بوده است. در شکل ۵ که مربوط به شاخص

امتیاز مهارت (SC^{14}) به صورت نسبت پیش‌بینی‌های مثبت درست و پیش‌بینی‌های منفی نادرست نسبت به کل حالت‌های ممکن بیان می‌شود. در این میان، شاخص موفقیت بحرانی (CSI^{15})، احتمال تشخیص (POD^{16}) و نسبت هشدار نادرست (FAR^{17}) بطور متداول برای صحت‌سنجی و ارزیابی پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرند که بصورت زیر محاسبه می‌شوند (دونالدسون و همکاران، ۱۹۷۵):

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

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

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

دامنه تغییرات هر یک از سه معیار بالا بین صفر و یک می‌باشد. هر چه شاخص *CSI* و *POD* به یک نزدیک‌تر باشند و هر چه شاخص *FAR* به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده عملکرد بهتر روش پیش‌بینی مورد بررسی است (گاندین و مورفی، ۱۹۹۲). در این میان، شاخص *CSI* برای مقایسه مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌ها (مک کوی، ۱۹۸۶) و همچنین به عنوان معیاری برای انتخاب حد آستانه احتمالاتی (آریت و فرانک، ۱۹۸۵) بکار رفته است. در این مطالعه، از شیوه جدول توافقی برای کمی کردن عملکرد مرتبه‌های مختلف مدل مارکوف در پیش‌بینی شرایط رطوبتی دشت شهرکرد استفاده شد.

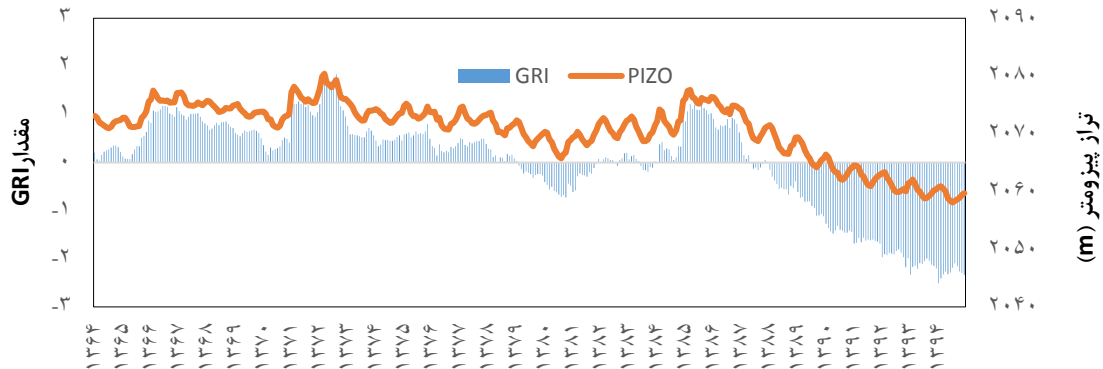
نتایج و بحث

در این مطالعه، مقادیر شاخص منبع آب‌های زیرزمینی (*GRI*) در دشت شهرکرد برای ۳۲ پیزومتر منتخب محاسبه شد. در شکل‌های ۲ تا ۵ به ترتیب سری زمانی شاخص *GRI* در مقیاس های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه مربوط به پیزومتر شماره ۱۰ برای نمونه ارائه شده است. در این شکل‌ها مقادیر شاخص

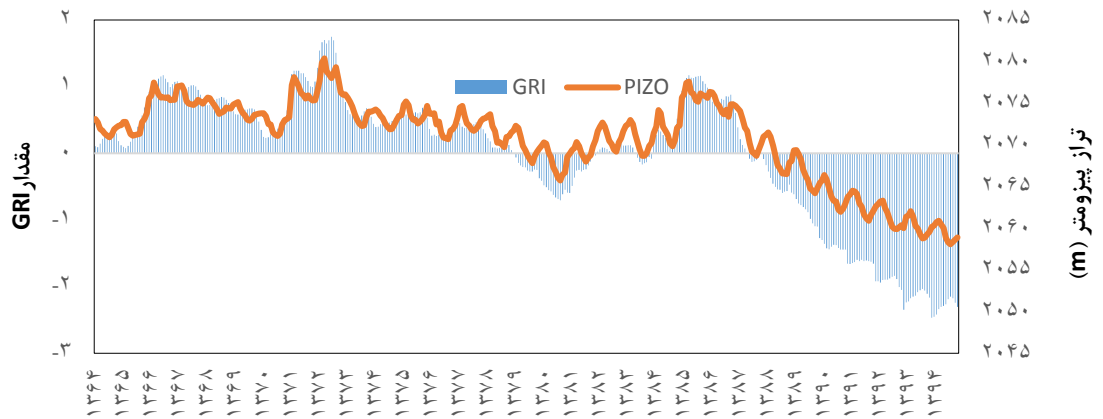
16. Probability of Detection
17. False Alarm Ratio

14. Skill Score
15. Critical Success Index

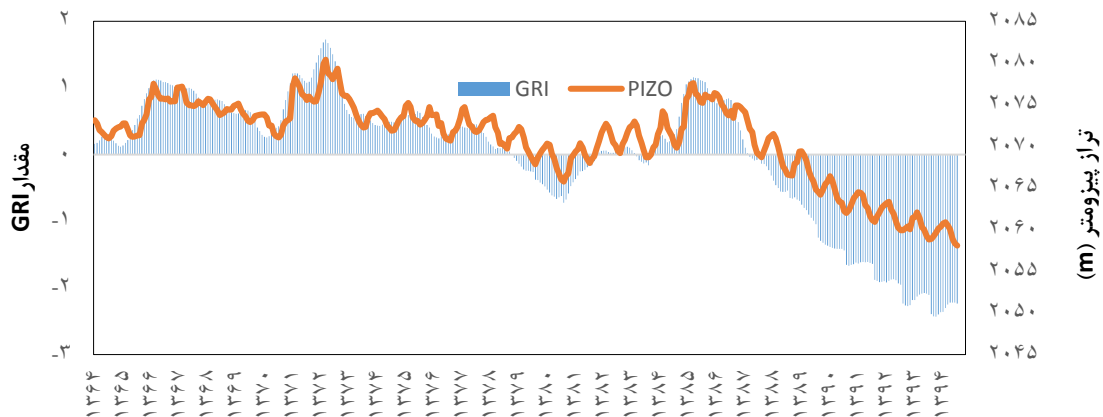
GRI با مقیاس ۱۲ ماهه است، طولانی‌ترین دوره ترسالی از سال ۱۳۶۴ تا مرداد ماه ۱۳۷۸ و بیشترین مقدار شاخص برابر با ۱/۵۰ کمترین مقدار آن معادل -۲/۴۱ در خردادماه ۱۳۹۳ رخ داده در اردیبهشت ماه ۱۳۷۱ می‌باشد. همچنین طولانی‌ترین دوره است.



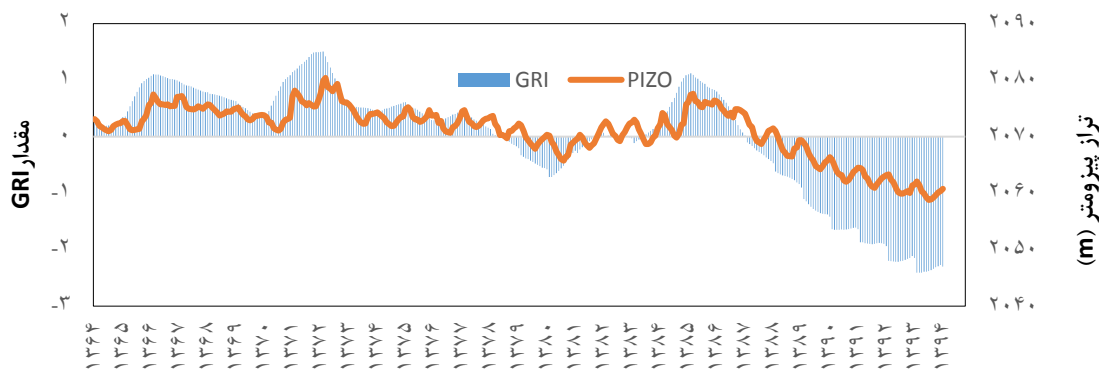
شکل ۲- تغییرات شاخص GRI در مقیاس زمانی ۱ ماهه در پیزومتر شماره ۱۰ در دوره زمانی ۹۴-۱۳۶۴.



شکل ۳- تغییرات شاخص GRI در مقیاس زمانی ۳ ماهه در پیزومتر شماره ۱۰ در دوره زمانی ۹۴-۱۳۶۴.



شکل ۴- تغییرات شاخص GRI در مقیاس زمانی ۶ ماهه در پیزومتر شماره ۱۰ در دوره زمانی ۹۴-۱۳۶۴.



شکل ۵- تغییرات شاخص GRI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در پیزومتر شماره ۱۰ در دوره زمانی ۹۴-۱۳۶۴.

شکل ۶-د که مربوط به GRI با مقیاس زمانی ۱۲ ماهه منتهی به خرداد ماه ۱۳۹۳ می‌باشد، مشاهده می‌شود، به جز مناطق مرکزی و جنوب غربی دشت، مابقی مناطق در این ماه دچار خشک سالی بسیار شدید بوده است و همچنین قسمت‌های بیشتری از جنوب غربی را خشک سالی شدید در بر گرفته است. در جدول ۳ ماتریس احتمال انتقال دشت شهرکرد 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 پنج درصد به دست آمده است. این نتایج نیز تداوم وضعیت رطوبتی دشت را تأیید می‌کند.

نتایج به دست آمده از ماتریس احتمال انتقال دشت شهرکرد در مقیاس زمانی سه ماهه حاکی از 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 گذری اشاره کرد (جدول ۳). در این مقیاس زمانی اگر وضعیت ماه حاضر در حالت خشک باشد با بیشترین احتمال ماه بعدی نیز خشک

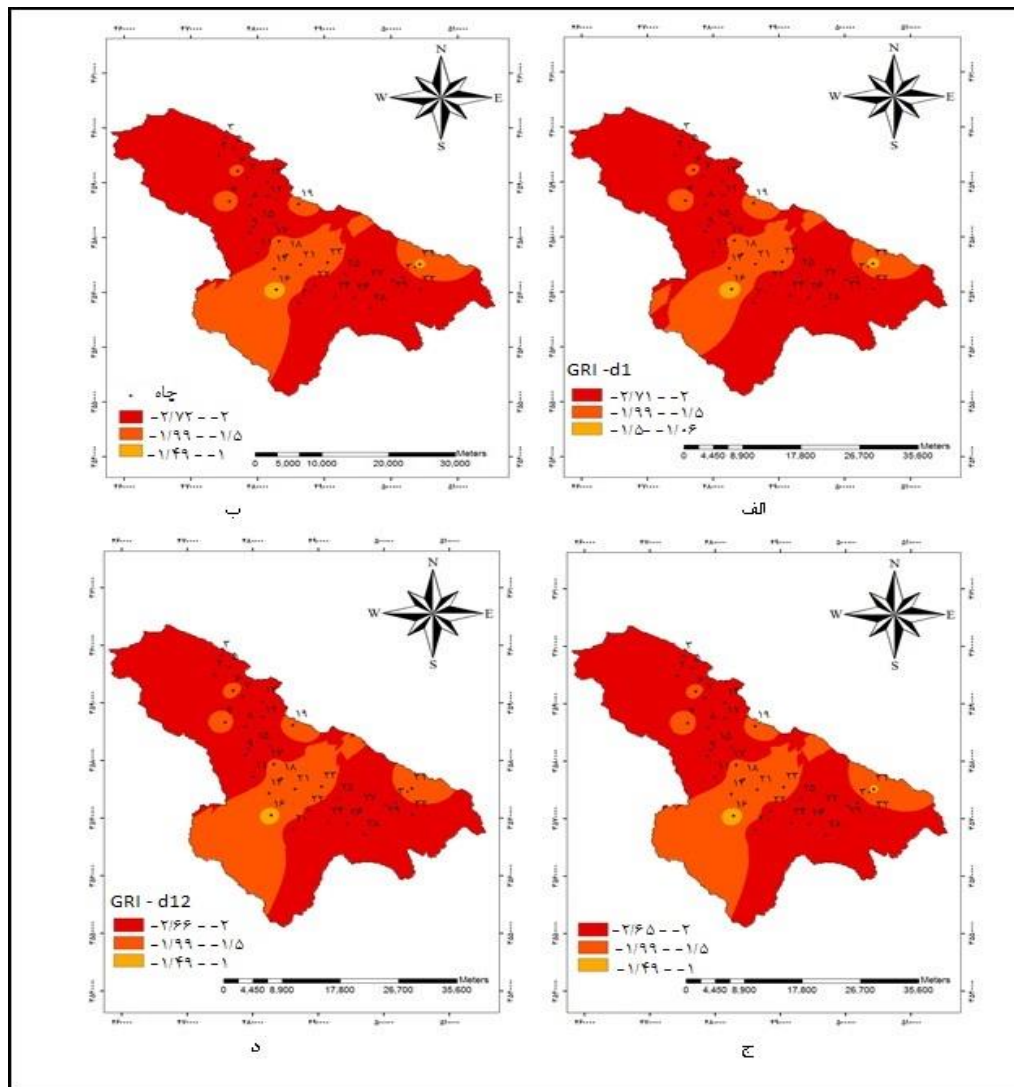
در شکل ۶ تغییرات مکانی مقادیر شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه برای نمونه آورده شده است. پس از بررسی و مقایسه روش‌های درون‌یابی که شامل روش‌های درون‌یابی فاصله معکوس وزن‌دار (IDW^{18})، روش تابع شعاعی (RBF^{19})، درون‌یابی چندجمله‌ای محلی (LPI^{20}) و زمین آمار کریجینگ و کو-کریجینگ^{۲۱}، روش IDW از دقت بالاتری برخوردار بود، لذا این روش برای رسم نقشه‌های پهنه‌بندی در دشت شهرکرد مورد استفاده قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۶-الف که مربوط به GRI یک ماهه منتهی به مرداد ماه ۱۳۹۴ می‌باشد، مشاهده می‌شود، به جز مناطق مرکزی و جنوب غربی دشت، مابقی مناطق در این ماه دچار خشک سالی بسیار شدید بوده است. همان‌گونه که در شکل ۶-ب که مربوط به GRI سه ماهه منتهی به دی ماه ۱۳۹۳ می‌باشد، مشاهده می‌شود، به جز مناطق مرکزی و جنوب غربی دشت، مابقی مناطق در این ماه دچار خشک سالی بسیار شدید بوده است و همچنین قسمت‌های بیشتری از جنوب غربی را خشک سالی شدید در بر گرفته است. در شکل ۶-ج که مربوط به GRI شش ماهه منتهی به خرداد ماه ۱۳۹۳ می‌باشد، مشاهده می‌شود، به جز مناطق مرکزی و جنوب غربی دشت، مابقی مناطق در این ماه دچار خشک سالی بسیار شدید بوده است و نواحی جنوب شرقی خشک سالی شدید وسعت بیشتری را در بر گرفته است. همان‌گونه که در

20. Local Polynomial Interpolation
21. Kriging & Cokriging

18. Inverse Distance Weighting
19. Radial Basis Functions

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 تر سالی به احتمال زیاد (۹۹ درصد) یک حالت تر اتفاق خواهد افتاد. احتمال گذر از حالت خشک ملایم به خشک ملایم و همچنین خشک متوسط به خشک متوسط برابر ۹۶ درصد می‌باشد، احتمال گذر از حالت خشک بسیار شدید به خشک بسیار شدید بیشتر از بقیه حالت‌ها و ۱۰۰ درصد است که اصطلاحاً از آن به عنوان تله خشک سالی یاد می‌شود. همچنین احتمال گذر از حالت تر به تر ۹۹ درصد می‌باشد.

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 شش ماهه در دشت شهرکرد با توجه به جدول ۳ احتمال گذر از حالت خشک بسیار شدید به خشک بسیار شدید بیشتر از بقیه حالت‌ها و ۱۰۰ درصد است. احتمال گذر از حالت خشک ضعیف به تر برابر یک درصد می‌باشد و بقیه حالت‌های خشک به تر صفر می‌باشد و احتمال گذر از حالت تر به خشک ضعیف سه درصد می‌باشد و بقیه حالت‌ها صفر



شکل ۶- الف) نقشه پهنه‌بندی شاخص *GRI* در مقیاس زمانی الف) یک ماهه منتهی به مرداد ماه ۱۳۹۴، ب) سه ماهه منتهی به دی ماه ۱۳۹۳، ج) شش ماهه منتهی به خرداد ۱۳۹۳ و د) ۱۲ ماهه منتهی به خرداد ۱۳۹۳.

افزایش می‌یابد. 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 آبی در درازمدت پیش‌بینی می‌شود. جدول ۴ مقادیر احتمال تعادل دشت شهرکرد 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 افزایش می‌یابد. احتمال وقوع طبقه‌های رطوبتی مختلف در دشت شهرکرد در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، بیشترین احتمال رویداد برای شاخص *GRI* در تمام مقیاس‌های زمانی مورد بررسی مربوط به حالت خشک‌سالی ضعیف می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست 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 به ترتیب ۹۹ و سه درصد می‌باشد. و همچنین بعد از یک حالت خشک بسیار شدید، حالت خشک بسیار شدید اتفاق خواهد افتاد. در این مقیاس نیز بیشترین احتمال انتقال در حالت گذر از خشک بسیار شدید به خشک بسیار شدید با مقدار ۱۰۰ درصد مشاهده می‌شود. به طور کلی در دشت شهرکرد برای شاخص *GRI* در مقیاس‌های زمانی ارزیابی شده، گذر از حالت خشک‌سالی بسیار شدید به خشک‌سالی بسیار شدید بالا بوده به طوری که از مقدار احتمال ۹۱ درصد برای مقیاس یک ماهه، تا مقدار احتمال ۱۰۰ درصد برای مقیاس ۱۲ ماهه افزایش یافته است. این بدان معنی است که هر چه مقیاس زمانی بیشتر شود احتمال ماندگاری در یک طبقه خاص رطوبتی

جدول ۳- ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکوف مرتبه اول برای شاخص *GRI* در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه دشت شهرکرد (۹۴-۱۳۶۴).

	<i>nd</i>	<i>md</i>	<i>od</i>	<i>sd</i>	<i>ed</i>	مقیاس
<i>nd</i>	۰/۹۸	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱ ماهه
<i>md</i>	۰/۰۶	۰/۹۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	
<i>od</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۴	۰/۰۶	۰/۰۰	
<i>sd</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۸	۰/۱۳	
<i>ed</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۹۱	
<i>nd</i>	۰/۹۸	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳ ماهه
<i>md</i>	۰/۰۶	۰/۹۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	
<i>od</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۳	۰/۰۷	۰/۰۰	
<i>sd</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۵	۰/۰۵	
<i>ed</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	
<i>nd</i>	۰/۹۹	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۶ ماهه
<i>md</i>	۰/۰۳	۰/۹۶	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	
<i>od</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۲	۰/۰۸	۰/۰۰	
<i>sd</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۶	۰/۰۴	
<i>ed</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	
<i>nd</i>	۰/۹۹	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۲ ماهه
<i>md</i>	۰/۰۳	۰/۹۶	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	
<i>od</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۲	۰/۰۸	۰/۰۰	
<i>sd</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۶	۰/۰۴	
<i>ed</i>	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	

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

مقیاس	<i>ed</i>	<i>sd</i>	<i>od</i>	<i>md</i>	<i>nd</i>
۱ ماهه	۰/۰۶۲۰	۰/۰۶۴۷	۰/۰۴۳۱	۰/۱۸۶۰	۰/۶۴۴۲
۳ ماهه	۰/۰۶۷۸	۰/۰۵۹۶	۰/۰۴۰۷	۰/۱۹۲۴	۰/۶۳۹۶
۶ ماهه	۰/۰۶۲۸	۰/۰۶۵۶	۰/۰۳۵۵	۰/۱۹۶۷	۰/۶۳۹۳
۱۲ ماهه	۰/۰۶۳۹	۰/۰۶۶۷	۰/۰۳۳۳	۰/۱۹۷۲	۰/۶۳۸۹

جدول ۵- احتمال رویداد دوره‌های رطوبتی مورد انتظار به وسیله زنجیره مارکوف مرتبه اول در دشت شهرکرد.

مقیاس	<i>ed</i>	<i>sd</i>	<i>od</i>	<i>md</i>	<i>nd</i>
۱ ماهه	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۰۸
۳ ماهه	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۷	۰/۰۱۳۶	۰/۰۱۰۸
۶ ماهه	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۵۵
۱۲ ماهه	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۵۶

است. همچنین ماتریس عملکرد متناظر *CSI*، *POD* و *FAR* در جدول ۸ درج شده است.

همان‌گونه که در جدول ۸ مشخص است مقدار *CSI* برای دشت شهرکرد در تمام مقیاس‌های زمانی و برای مدل مارکوف مرتبه اول، دوم و سوم برابر یک می‌باشد که نشانگر عملکرد مناسب روش پیشنهادی در پیش‌بینی شرایط رطوبتی می‌باشد. مقادیر *POD* برای دشت شهرکرد در تمام مقیاس‌های زمانی برای مدل مارکوف مرتبه اول، دوم و سوم برابر یک می‌باشد که بیان‌گر آن است که ۱۰۰ درصد رویدادهای مشاهداتی بطور صحیح توسط روش پیشنهادی پیش‌بینی شده‌اند. همچنین مقدار *FAR* مدل مارکوف مرتبه اول، دوم و سوم برای دشت شهرکرد در تمام مقیاس‌های زمانی برابر صفر می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که تمام خشک‌سالی‌های پیش‌بینی شده، اتفاق افتاده‌اند. قابل ذکر است که در این مطالعه یک سال آخر دوره مورد بررسی بیش‌بینی شده است، لذا مقدار شاخص‌های *CSI*، *POD* و *FAR* برای شاخص *GRI* ۱۲ ماهه برای مدل مارکوف مرتبه دوم و سوم محاسبه نشد (جداول ۷ و ۸).

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

مقیاس	<i>ed</i>	<i>sd</i>	<i>od</i>	<i>md</i>	<i>nd</i>
۱ ماهه	۸	۸	۱۶	۱۴	۶۰
۳ ماهه	۲۵	۲۲	۱۵	۱۴	۵۹
۶ ماهه	۲۳	۲۴	۱۳	۲۴	۱۱۷
۱۲ ماهه	۲۳	۲۴	۱۲	۲۴	۱۱۵

بررسی‌ها نشان می‌دهد که دوره‌های خشک و تر در این دشت دارای تداوم مختلف می‌باشد. برخی از این دوره‌ها کوتاه و برخی بلندمدت می‌باشند که این موضوع به طور ویژه برای برنامه ریزی‌های منابع آب و کشاورزی دارای اهمیت می‌باشد. از این‌رو پیش‌بینی میانگین تداوم خشک‌سالی و ترسالی می‌تواند اطلاعات مفیدی در اختیار مدیران و برنامه ریزان منابع آب قرار دهد. جدول ۶ میانگین تداوم دوره‌های خشک و تر به‌وسیله زنجیره مارکوف مرتبه اول را برای دشت شهرکرد در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد.

بر اساس این جدول در مقیاس یک ماهه بیشترین میانگین تداوم رطوبتی متعلق به حالت تر با مقدار ۶۰ ماه و کمترین مقدار آن نیز متعلق به حالت‌های خشک خیلی شدید و شدید با مقدار هشت ماه می‌باشد. در مقیاس ۱۲ ماهه بیشترین میانگین تداوم رطوبتی را حالت تر با مقدار ۱۱۵ ماه به خود اختصاص داده است. جداول توافقی برای مدل مارکوف مرتبه اول، دوم و سوم برای شاخص *GRI* در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ برای دشت شهرکرد در جدول ۷ آورده شده

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

مشاهده شده							
	بله		خیر		مرتبه زنجیره مارکوف		
	<i>GRI-1</i>	<i>GRI-3</i>	<i>GRI-1</i>	<i>GRI-3</i>			
	<i>GRI-6</i>	<i>GRI-12</i>	<i>GRI-6</i>	<i>GRI-12</i>			
پیش‌بینی شده	بله	۱۲	۱۰	۰	۰	مرتبه ۱	
		۷	۱	۰	۰		
	خیر	۰	۰	۰	۰		
		۱۱	۹	۰	۰		مرتبه ۲
	بله	۶	-	۰	-		
		خیر	۰	۰	۰		
بله	۱۰		۸	۰	۰	مرتبه ۳	
	۵	-	۰	-			
خیر	۰	۰	۰	۰			
	۰	-	۰	-			

جدول ۸- مقادیر *CSI*، *POD* و *FAR* محاسبه شده بر اساس اعداد جدول ۷.

	زنجیره مارکوف مرتبه ۱		زنجیره مارکوف مرتبه ۲		زنجیره مارکوف مرتبه ۳	
	<i>GRI1</i>	<i>GRI3</i>	<i>GRI1</i>	<i>GRI3</i>	<i>GRI1</i>	<i>GRI3</i>
	<i>GRI6</i>	<i>GRI12</i>	<i>GRI6</i>	<i>GRI12</i>	<i>GRI6</i>	<i>GRI12</i>
<i>CSI</i>	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	۱	۱	۱	-	۱	-
<i>POD</i>	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	۱	۱	۱	-	۱	-
<i>Far</i>	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	-	۰	-

منابع

حسنوند، ز.، متین‌فر، ح.، ۱۳۹۵. بررسی روند تغییرات کمی آبخوان دشت الشتر با استفاده از شاخص خشک‌سالی منابع آب زیرزمینی *GRI*. دومین کنگره سراسری در مسیر توسعه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۲۲ اردیبهشت، دانشگاه فرهنگیان استان گلستان، گرگان.

حسینی، ز.، میرعباسی نجف‌آبادی، ر.، قاسمی، ا. ر.، ۱۳۹۷. پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت خانمیرزا با استفاده از روش تصمیم‌گیری درختی. مجله هیدروژئولوژی، جلد ۳، شماره ۱، ۹۹-۱۱۰.

احمد آخورمه، م.، نوحه‌گرا، سلیمانی مطلق. م.، وطایی سمیرمی. م.، ۱۳۹۴. بررسی خشک‌سالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های *GRI* و *SWI* در آبخوان محدوده مطالعاتی مرودشت خرامه استان فارس. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، شماره ۲۱، صفحات ۱۰۵ تا ۱۱۸.

بازیارپور، ه.، نادى، م.، ۱۳۹۶. تحلیل احتمالاتی طبقات شدت خشک‌سالی با استفاده از مدل زنجیر مارکوف در اقلیم‌های مختلف ایران. دومین کنفرانس ملی هیدروژئولوژی ایران، ۲۰-۲۱ تیرماه، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد.

- Arritt, R.W., Frank, W.M., 1985. *Experiments in probability of precipitation amount forecasting using model output statistics. Journal of Monthly Weather Review.* 113: 1837-1851.
- Bettge, A.G., Baumhefner, D.P., 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., Joshi, V., 2016. *Application of Earth Observation Data and Standardized Precipitation Index Based Approach for Meteorological Drought Monitoring, Assessment and Prediction Over Kutch Gujarat, India. International Journal of Environment and Geoinformatics.* 3(2):24-37.
- Doswell, C.A., III, Flueck, J.A., 1989. *Forecasting and verifying in a field research project: DOPLIGHT 87. Journal of Weather and Forecasting.* 4(2): 97-109.
- Donaldson, R., Dyer, R., Krauss, M., 1975. *Objective evaluator of techniques for predicting severe weather events. In Bulletin of the American Meteorological.* 56:755-755.
- حنفی، ع.، خوش اخلاق، ف.، و سلطانی، م.، ۱۳۹۰. تحلیل خشک‌سالی‌های استان تهران با استفاده از شاخص SPI و پیش‌بینی آن بر اساس مدل زنجیره مارکوف. جغرافیا و پایداری نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)، جلد ۲، شماره ۳، ۱۰۰-۸۷.
- خواستاربروجنی، م.، ناصری، م.، قاسمی، م.، ۱۳۹۶. بررسی تأثیر خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت بروجن. دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، ۲۰-۲۱ تیرماه، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد.
- کریمی، ص.، شیرزاد، م.، ۱۳۹۵. پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی استان سمنان با روش زنجیره مارکوف و GIS. دومین کنگره سراسری در مسیر توسعه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۲۲ اردیبهشت، دانشگاه فرهنگیان استان گلستان، گرگان.
- میرموسوی، س.، زهره‌وندی، ح.، ۱۳۹۲. تحلیل جهت استان همدان بررسی احتمال توانر هفته‌های خشک و مرطوب. فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی، جلد ۱۳، ص ۱۴۹-۱۶۷.