

## شبیه‌سازی و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از روش CA Markov در دشت نجف‌آباد

روزا ابراهیمیان<sup>۱</sup>، علی اصغر آل شیخ<sup>۲\*</sup> و ابوالفضل مسعودیان<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد

علوم و تحقیقات، تهران

۲. استاد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳. استاد، دانشکده جغرافیا و علوم انسانی، دانشگاه اصفهان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۹/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۲/۰۲)

## چکیده

خشکسالی پدیده‌ای است که بین پارامترهای مؤثر در آن ارتباط خطی وجود ندارد. بنابراین، محققان برای بررسی آن به روش‌های غیرخطی مانند اتوماسیون سلولی نیاز دارند. این روش در تحقیقات مختص به پیش‌بینی خشکسالی کمتر استفاده شده است. این در حالی است که از روش اتوماسیون سلولی به‌علت داشتن ساختار ساده و زیادبودن قابلیت بصری می‌توان به‌عنوان روشی مناسب در پیش‌بینی خشکسالی استفاده کرد. این مطالعه با هدف مدل‌سازی خشکسالی برای سال ۲۰۲۰ با استفاده از اتوماسیون سلولی و تصاویر ماهواره‌ی لندست در دشت نجف‌آباد انجام شده است. ابتدا تصاویر سری زمانی تبخیر و تعرق برای سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ طبقه‌بندی و نقشه‌ی پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی در این سال‌ها تهیه شد. در گام بعدی، با بهره‌گیری از روش اتوماسیون سلولی وضعیت خشکسالی هر یک از طبقات در سال ۲۰۲۰ تخمین زده شد. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از شاخص کاپا ۰/۶۳ و توافق بین نقشه‌ی واقعی و پیش‌بینی شده  $(M(m))$ ، ۰/۸۵ است که بیان‌کننده‌ی مطلوب‌بودن معادله‌ی تخمین‌زده‌شده در این تحقیق است. از سوی دیگر، نقشه‌ی پراکندگی احتمال وقوع تغییرات در سال ۲۰۲۰ گویای آن است که اگر شرایط به همین صورت ادامه یابد و تغییری در نوع و الگوی کشت منطقه ایجاد نشود، تقریباً همه‌ی نواحی‌ای که در سال ۲۰۱۵ با خطر وقوع خشکسالی مواجه هستند، در سال ۲۰۲۰ با شدت بیشتر و به‌طور وسیع‌تری با وقوع خشکسالی روبه‌رو می‌شوند.

کلیدواژه‌گان: اتوماسیون سلولی، تبخیر و تعرق، خشکسالی، دشت نجف‌آباد، مارکوف.

## مقدمه

زندگی بشر در طول تاریخ همواره تحت تأثیر صدمات ناشی از مخاطرات طبیعی قرار داشته است. بروز این رخدادها از فعالیت‌ها و فرایندهای زمین‌شناختی، ژئومورفولوژیکی و فرایندهای اقلیمی ناشی می‌شود. شایان یادآوری است که مخاطرات ناشی از فرایندهای اقلیمی نسبت به سایر پدیده‌ها در طبیعت، سهم بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند. توفان‌های سهمگین، خشکسالی و سیل نمونه‌هایی از رخدادهای ناشی از فرایندهای اقلیمی‌اند. در این میان خشکسالی اهمیت ویژه‌ای دارد [۱]؛ زیرا پیامدهای پدیده خشکسالی از نظر فراوانی، شدت، مدت و تأثیرات اجتماعی در جامعه بیشتر از سایر بلایای طبیعی بوده است [۲]. خشکسالی پدیده‌ای نامرئی است و ماه‌ها طول می‌کشد تا خود را نشان دهد. این موضوع سبب می‌شود تا صدمات ناشی از این پدیده، بار مالی سنگینی را بر دوش دولت‌مردان وارد کند و سبب گسترش فقر در سطح کشور به‌ویژه مناطق روستایی شود، که در نتیجه افزایش مهاجرت روستاییان به شهرها را به‌همراه دارد. برای مثال، کل خسارت واردشده ناشی از خشکسالی طی سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۱ در کشور ۶/۲ میلیارد دلار برآورد شده است و ۳۷ میلیون نفر یعنی بیش از ۵۰ درصد مردم ایران تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته‌اند [۳]. بنابراین، بار مالی سنگین صدمات ناشی از وقوع خشکسالی و پیامدهای زیست‌محیطی آن اهمیت بررسی و پیش‌بینی این پدیده را دوچندان کرده است.

خشکسالی مانند هر پدیده دیگری به مدیریت نیاز دارد که به آن مدیریت خطرپذیری خشکسالی گفته می‌شود. در این مدیریت، محققان و برنامه‌ریزان بخش آب بر اساس شرایط موجود، میزان شدت و آسیب‌پذیری ناشی از خشکسالی را طی سال‌های آتی پیش‌بینی می‌کنند و با اجرای برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت از پیش تنظیم‌شده، خسارت‌های ناشی از خشکسالی را کاهش می‌دهند یا حتی جبران می‌کنند. در بحث پیش‌بینی و مدیریت خشکسالی استفاده از مدل‌های مبتنی بر روش‌های تصادفی و احتمالاتی سابقه‌ای طولانی دارند؛ اما در بسیاری از این تکنیک‌ها، روابط بین متغیرها خطی فرض شده است، در صورتی که بین پارامترهای مؤثر در پدیده خشکسالی ارتباط خطی وجود ندارد و در بیشتر مواقع پارامترهای مؤثر ارتباط معنادار کمی با یکدیگر دارند. به‌طوری که در یک مکان خاص ممکن است یکی از پارامترها به‌شدت تغییر کند؛ ولی سایر پارامترها در

همان مکان ثابت باشند. بنابراین، روشی که به‌منظور بررسی و پیش‌بینی خشکسالی استفاده می‌شود باید با ویژگی‌های زمانی و مکانی خشکسالی سازگار باشد. بنابراین، مدل‌های مبتنی بر روش‌های تصادفی و احتمالاتی در مدل‌سازی پدیده‌های غیرخطی مانند خشکسالی موفق عمل نکرده‌اند. از این‌رو، در تحقیق حاضر برای ساختن مدل‌های پیش‌بینی معتبر، از روش‌های مدل‌کننده غیرخطی و چندمعیاره نظیر اتوماسیون سلولی (CA)<sup>۱</sup> استفاده شد که در دهه‌های اخیر به جمع مدل‌های پیش‌بینی افزوده شده‌اند [۴]. از مزایای این روش می‌توان به داشتن ویژگی فضایی، همسازي با سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، پویابودن، داشتن قابلیت بصری زیاد و سادگی اشاره کرد. با استفاده از این روش می‌توان برای خشکسالی قبل از اینکه به وقوع بپیوندد سناریوهای مختلفی را پیش‌بینی کرد تا بتوان از ضعف‌ها و قوت‌های تصمیم‌گیری‌ها آگاهی یافت [۵]. در این مقاله، ساختار مدل اتوماسیون سلولی، شناسایی و معرفی شده و کاربرد آن در حوزه برنامه‌ریزی خشکسالی ارائه می‌شود. بدین‌منظور اصول کار با CA و مزیت‌های این مدل در شبیه‌سازی تغییرات خشکسالی نشان داده می‌شود.

## پیشینه تحقیق

اهمیت بررسی وضعیت خشکسالی سبب انجام تحقیقات گسترده‌ای در زمینه پیش‌بینی خشکسالی شده است که در ادامه تعدادی از پژوهش‌های مرتبط بررسی می‌شود. جهانگیر آلام و همکارانش [۶] در منطقه‌ای در بنگلادش از شاخص SPI<sup>۲</sup> و مدل مارکوف در یک دوره ۴۰ ساله برای بررسی خشکسالی استفاده کردند. نتایج ایشان گویای آن است که در ماه‌های بارش باران موسمی بین خشکسالی هواشناسی با کشاورزی ارتباط معناداری وجود ندارد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد ارتباط معنادار زیادی بین نتایج خشکسالی کشاورزی ناشی از روش مارکوف و شاخص SPI وجود دارد. این در حالی است که در ماه‌های قبل از بارش موسمی این ارتباط بسیار ضعیف است. آویلز و همکارانش [۷] دو روش زنجیره مارکوف (MC)<sup>۳</sup> و شبکه بیضی (BN)<sup>۴</sup> در پیش‌بینی خشکسالی را مقایسه کردند.

1. Cellular Automata
2. Standardized Precipitation Index
3. Markov chain
4. Bayesian network

در مجموع، از آنجا که در بسیاری از تحقیقات انجام‌شده، تصاویر ماهواره‌ای و همچنین تبخیر و تعرق واقعی، که از پارامترهای مناسب برای نمایش رفتار خشکسالی و پیش‌بینی آن است، در نظر گرفته نمی‌شوند؛ در این پژوهش با استفاده از میزان تبخیر و تعرق واقعی که از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک دشت نجف‌آباد واقع در استان اصفهان به‌دست آمده و روش شبیه‌سازی جدید CA، وضعیت خشکسالی برای سال ۲۰۲۰ پیش‌بینی شد و در نهایت پیشنهادی برای کاهش خسارت‌های ناشی از خشکسالی در آن سال ارائه شد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه‌شده

دشت نجف‌آباد در استان اصفهان واقع است و به علت وجود یکی از شبکه‌های مدرن و داشتن منابع آب زیرزمینی و سطحی فراوان از جمله دشت‌های مهم استان اصفهان است که به‌تازگی وضعیت سفره آب زیرزمینی این دشت از حالت آزاد به ممنوعه تغییر یافته است که این امر اهمیت توجه به این دشت را دوچندان کرده است. بنابراین، در تحقیق حاضر دشت نجف‌آباد به‌طور نمونه انتخاب و مناطق مستعد خشکسالی در این دشت شناسایی شد.

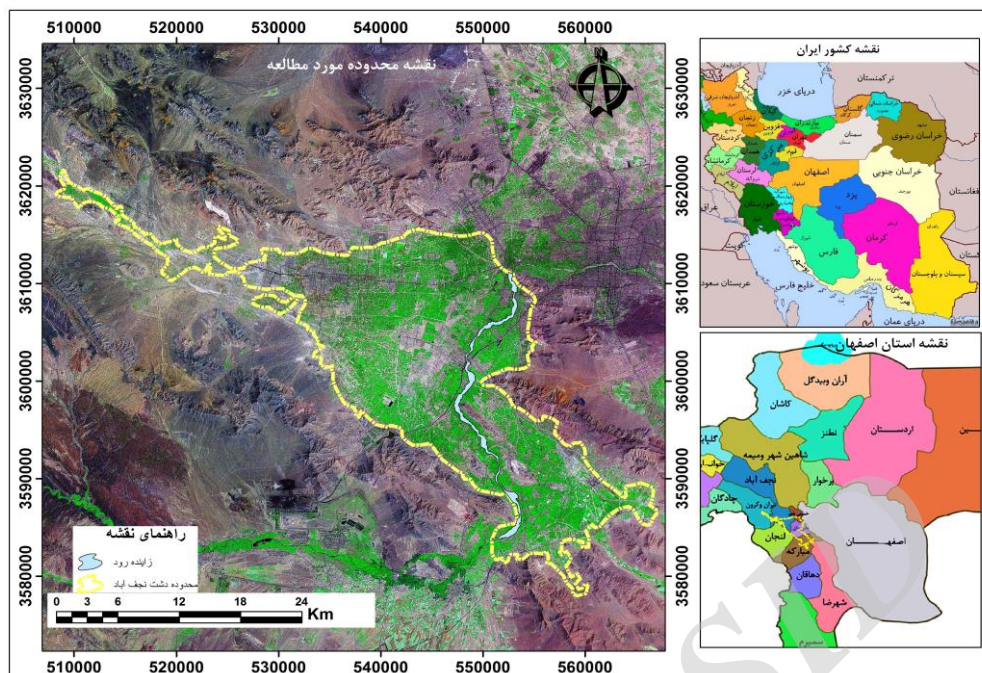
محدوده دشت نجف‌آباد بین مدارهای ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۴ دقیقه طول شرقی و مدارهای ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۹ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. اراضی زراعی واقع در دشت نجف‌آباد عبارت‌اند از اراضی تحت پوشش سیستم‌های آبیاری چپ نکوآباد، راست نکوآباد و اراضی واقع در شمال غربی دشت که تحت پوشش شبکه خمیران است. وسعت دشت نجف‌آباد و آبخوان آبرفتی مربوط به آن با کسر ارتفاعات برابر ۱۱۴۲/۶۷ کیلومترمربع است. در منطقه کشت دوفصلی به‌صورت زمستانه و تابستانه صورت می‌گیرد. منابع آبی این دشت شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی است. منابع آب سطحی این محدوده عبارت‌اند از رودخانه زاینده‌رود، شبکه آبیاری نکوآباد و منابع آب زیرزمینی نیز شامل تعداد ۷۳ قنات، یک چشمه، ۱۹۰۴ چاه عمیق و ۸۲۵۶ چاه نیمه‌عمیق است [۱۱]. شکل ۱ موقعیت محدوده دشت نجف‌آباد را نمایش می‌دهد. در این تصویر خط زردرنگ نشان‌دهنده محدوده این دشت است.

در این تحقیق از توابع رابطه‌ای برای حل شبکه بیضی و از توابع احتمال برای مدل‌سازی استفاده شد و داده‌های بارش ماهیانه و حجم آب در جریان رودخانه چولکو واقع در جنوب اکوادور برای ارزیابی عملکرد هر دو مدل به کار برده شد. نتایج ارزیابی گویای آن بود که مدل MC برای پیش‌بینی دوره‌های خشک و مرطوب مدل مناسب‌تری است؛ ولی برای دوره‌های بسیار خشک مدل مبتنی بر BN نتایج مطلوب‌تری را ارائه داده است. در کل، نتایج ارزیابی ماهانه نشان می‌دهد روش MC نسبت به روش BN نتایج مناسب‌تری را فراهم می‌آورد.

عدالت‌گستر و همکارانش [۸] با استفاده از آمار ایستگاه سینوپتیک شهرستان شیراز به ارائه مدل سری زمانی برای پیش‌بینی خشکسالی اقدام کردند. بدین‌منظور آمار سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۷ ایستگاه سینوپتیک شیراز را جمع‌آوری کردند و با استفاده از شاخص شدت خشکسالی بارش استاندارد شده، مدل سری زمانی را ارائه دادند. در نهایت، با بررسی مدل‌های مختلف، مدل بهینه انتخاب و با استفاده از آن پیش‌بینی خشکسالی برای سال ۱۳۸۹ در شهرستان شیراز انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد پدیده خشکسالی در شهرستان شیراز رفتار فصلی با دوره ۲۴ ماهه دارد.

حسن‌زاده و همکارانش [۹] الگوریتم ژنتیک و مدل ترکیبی شبکه عصبی-موجکی را تلفیق کردند و از آن در تحلیل شاخص بارندگی استاندارد شده، استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد به‌کارگیری روش تلفیقی پیشنهادی در مقایسه با تلفیق الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی، نتایج مطلوب‌تری را ارائه می‌دهد.

رستمی [۱۰] با استفاده از شاخص SPI شاخص خشکسالی استان را طی دوره مهرماه ۱۳۷۸ تا آذرماه ۱۳۸۸ محاسبه کرد. سپس با استفاده از شبکه‌های عصبی به پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت خشکسالی اقدام کرد. نتایج این پیش‌بینی‌ها با استفاده از دو شاخص خطا (RMSE) و شاخص دقت ( $R^2$ ) ارزیابی و تحلیل شد. نتایج در بخش پیش‌بینی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت بیان‌کننده آن بود که تعداد ورودی‌ها در دقت نتایج مؤثر است و نتایج مناسب‌تری نسبت به پیش‌بینی‌های بلندمدت تولید می‌کند. در بخش پایش هم تأکید نتایج بر وجود خشکسالی‌های ممتد و گاهی طولانی‌مدت خشکسالی است.



شکل ۱. موقعیت محدوده دشت نجف‌آباد

که داده‌های واقعی آن موجود است، محاسبه و سپس اعتبارسنجی شد. بعد از ارزیابی صحت روش، با استفاده از داده‌های سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ وضعیت خشکسالی (با مقایسه‌های هر یک از کلاسه‌ها در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵) با استفاده از روش زنجیره مارکوف و مدل اتوماسیون سلولی شبیه‌سازی و روند تغییرات هر یک از کلاسه‌ها برای سال ۲۰۲۰ پیش‌بینی شد.

#### مدل اتوماسیون سلولی

در سال‌های اخیر پژوهشگران مختلف نشان داده‌اند CA و زنجیره مارکوف ابزار مناسبی برای مدل‌سازی تغییرات شهری است و از آن در موضوعات گوناگونی از قبیل شبیه‌سازی ترافیک، تغییرات کاربری زمین، تغییرات پوشش زمین، رشد شهری و غیره استفاده کرده‌اند [۱۲]. در بیشتر تحقیقات انجام‌شده از این روش برای مباحث شهری استفاده شده است، ولی تحقیق حاضر سعی دارد که این روش را در پیش‌بینی و مدل‌سازی خشکسالی به کار برد که یکی از مشکلات روز کشور است. عناصر مدل CA به شرح زیر است:

۱. شبکه سلولی: فضایی که CA در آن وجود دارد شبکه نامیده می‌شود که در طول زمان تغییر می‌یابد [۱۳].

#### روش پژوهش

در تحقیق حاضر به منظور پهنه‌بندی و پیش‌بینی مناطق حساس در برابر خشکسالی، دشت نجف‌آباد به‌طور نمونه انتخاب و براساس تصاویر تبخیر و تعرق دو سال کم‌بارش (۲۰۰۸) و نرمال (۲۰۱۵) وضعیت خشکسالی در سال ۲۰۲۰ پیش‌بینی و پهنه‌بندی شد. برای دستیابی به این هدف، تصاویر تبخیر و تعرق واقعی سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ به محیط نرم‌افزار ادریسی منتقل شد. گام بعدی تعیین تعداد کلاس‌های مطالعه شده است. منطقه مد نظر از نظر احتمال وقوع خشکسالی در پنج کلاس (۱) بسیار کم، ۲) کم، ۳) متوسط، ۴) زیاد و ۵) بسیار زیاد طبقه‌بندی و فرض شد که نوع و مکان میزان تبخیر و تعرق (که قرار است به‌عنوان کلاس تعیین شوند) از قبل شناخته شده نیستند. بنابراین، از روش طبقه‌بندی نظارت‌نشده استفاده شد. مهم‌ترین روش طبقه‌بندی نظارت‌نشده روش ISO DATA است که در این تحقیق به‌منظور کلاسه‌بندی میزان تبخیر و تعرق یا به‌بیان دیگر تهیه نقشه‌های احتمال وقوع خشکسالی به کار برده شد. سپس، به‌منظور بررسی صحت و دقت روش به‌کاررفته برای پیش‌بینی خشکسالی در سال ۲۰۲۰ ابتدا با استفاده از تصاویر تبخیر و تعرق واقعی سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۰۸ و روش CA Markov میزان تبخیر و تعرق یا وضعیت خشکسالی در سال ۲۰۱۵

احتمال تغییر نشان می‌دهد با چه احتمالی هر کلاس خشکسالی، به کلاس دیگری در آینده تغییر خواهد یافت. در این روش ماتریس تغییرات هر ناحیه نشان می‌دهد تغییر تعداد پیکسل‌هایی از یک کلاس به کلاس دیگر در یک دوره مشخص به چه میزان خواهد بود. تصاویر احتمالی شرطی خروجی از این روش در طبقه‌بندی تصاویر با روش (MAXLIK) نیز استفاده می‌شود [۱۷].

#### ارزیابی دقت مدل‌ها

در این تحقیق به منظور ارزیابی کارایی مدل CA Markov و توانایی آن در پیش‌بینی دقیق ابتدا با استفاده از داده‌های سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۰۸ مقادیر سال ۲۰۱۵ با استفاده از روش CA Markov محاسبه شد. سپس مقادیر پیش‌بینی شده این روش در سال ۲۰۱۵ با مقادیر واقعی این سال مقایسه شد تا میزان صحت روش مشخص شود. بدین منظور نقشه واقعی و نقشه پیش‌بینی شده سال ۲۰۱۵ با یکدیگر از نظر تعداد سلول‌ها برای هر کلاس و همچنین، موقعیت مکانی سلول‌ها در دو تصویر مقایسه شدند و از شاخص کاپا که به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود برای تفسیر نتایج استفاده شد:

$$\text{kappa} (\kappa) = \frac{\text{proportion of observed agreement} - \text{proportion of chance agreement}}{1 - \text{proportion of chance agreement}} \quad (1)$$

نشان داده شده‌اند، احتمال کمتر و مناطق دارای پوشش گیاهی، احتمال بیشتری برای وقوع خشکسالی دارند. جدول ۱ بیان‌کننده مساحت هر یک از طبقات احتمال وقوع خشکسالی طی دو سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ است. در این جدول، ردیف‌های طبقات احتمال وقوع خشکسالی در سال ۲۰۰۸ و ستون‌های طبقات احتمال وقوع خشکسالی در سال ۲۰۱۵ را نشان می‌دهند. این جدول گویای مقدار تبدیل مساحت هر یک از گروه‌ها در سال ۲۰۰۸ به سایر گروه‌ها در سال ۲۰۱۵ است. برای نمونه در طبقه حساسیت کم برای وقوع خشکسالی در سال ۲۰۰۸ از کل مساحت این طبقه ۱۰۱۰/۴ هکتار آن در سال ۲۰۱۵ به طبقه احتمال کم تغییر یافته یا ۶۲۰/۵ هکتار احتمال وقوع زیاد برای خشکسالی در سال ۲۰۱۵ یافته است.

**۲. وضعیت سلول:** حالتی است که هر سلول در فرایند تکامل CA می‌تواند داشته باشد. سلول در مدل اولیه CA اغلب وضعیت بولین صفر و یک را دارد [۱۴].

**۳. همسایگی:** همسایگی در بردارنده خود سلول و تعدادی سلول دیگر در شعاع خاصی از سلول آزمایش شده است. بر اثر روابط متقابل سلول آزمایش شده و همسایه آن و تحت تأثیر قوانین انتقال، سلول به وضعیت‌های مختلف تغییر پیدا می‌کند [۱۲].

**۴. زمان:** زمان در CA ناپوسته است. سلول‌ها از زمان T به T+1 به‌طور هم‌زمان تکامل می‌یابند [۱۵].

**۵. قوانین انتقال:** قوانین انتقال، به‌عنوان موتور اصلی تغییرات در مدل CA رفتار سلول‌ها را طی فرایند تکامل، در مراحل زمانی مختلف مشخص و وضعیت آینده سلول را تعریف می‌کند [۱۲].

#### زنجیره مارکوف

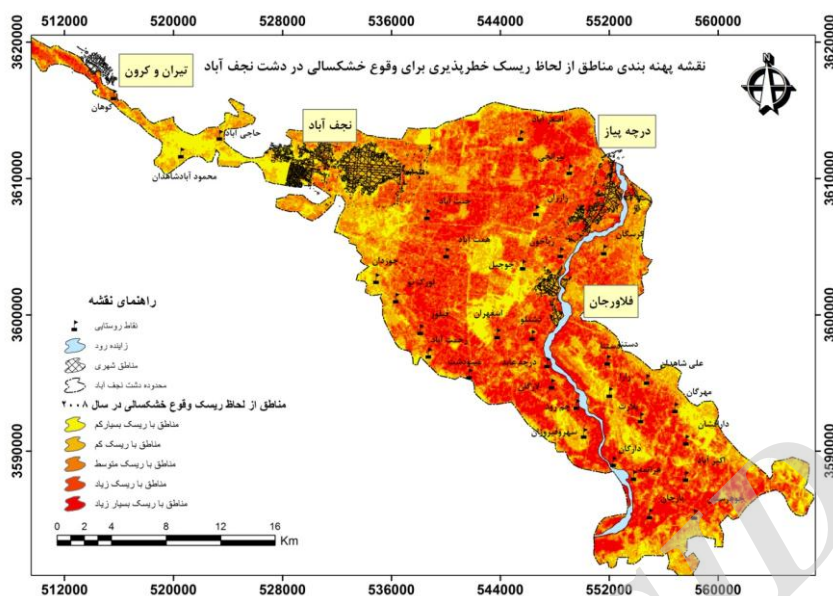
در روش زنجیره‌های مارکوف، تصاویر ماهواره‌ای تبخیر و تعرق بر اساس ماتریس احتمال تغییرات تجزیه و تحلیل می‌شوند. روش زنجیره‌های مارکوف، تصاویر پهنه‌بندی تبخیر و تعرق واقعی را تحلیل و یک خروجی به شکل ماتریس احتمالی تغییرات و یک تصویر خروجی از ماتریس احتمالی تغییرات سال افق را ارائه می‌دهد [۱۶]. ماتریس

#### یافته‌ها

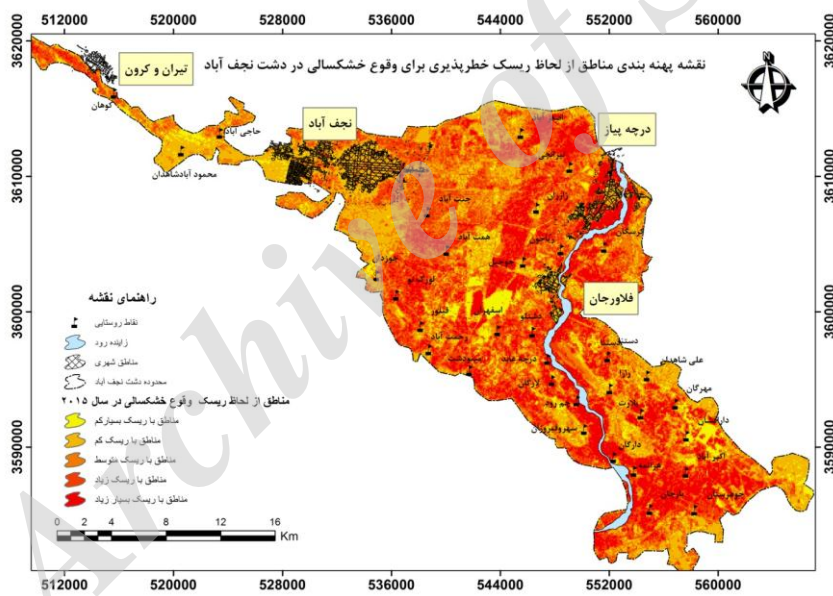
##### مدل‌سازی کلاس‌های خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵

برای دستیابی به مدل مناسب برای پیش‌بینی خشکسالی ابتدا باید نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر و تعرق سالیانه، طبقه‌بندی شوند. شکل‌های ۲ و ۳ نقشه پهنه‌بندی هر یک از طبقات را در محدوده نجف‌آباد نشان می‌دهد.

مطابق شکل‌های ۲ و ۳ مناطق قرمز رنگ میزان احتمال زیادی برای وقوع خشکسالی دارند و هرچه از شدت رنگ کاسته می‌شود و به سمت رنگ نارنجی ادامه می‌یابد، شدت وقوع خشکسالی کم می‌شود. مطابق شکل‌های یادشده مناطق شهری‌ای که با رنگ نارنجی



شکل ۲. پهنه بندی طبقات خطرپذیری وقوع خشکسالی در سال ۲۰۰۸



شکل ۳. نقشه پهنه بندی طبقات خطرپذیری وقوع خشکسالی در سال ۲۰۱۵

جدول ۱. مقایسه مساحت مناطق حساس در برابر خشکسالی طی دو سال ۲۰۱۵ و ۲۰۰۸ براساس هکتار

اولویت بندی	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
بسیار کم	۱۵۴۴/۱۵	۱۰۱۰/۴	۴۰۵/۴	۳۰۷/۱	۱۳۹/۳
کم	۳۵۶۶/۸	۶۴۰۵/۲	۲۲۴۳/۹	۱۴۶۶/۴	۵۶۳/۸
متوسط	۷۷۴/۴	۴۷۹۸/۸	۴۴۷۴/۵	۳۵۷۱/۹	۱۴۲۲/۸
زیاد	۳۰۶/۷	۱۴۷۵/۱	۳۸۰۴/۵	۵۲۶۷/۴	۳۴۳۷
بسیار زیاد	۳۸۷/۸	۶۲۰/۵	۱۴۷۱/۳	۳۷۷۲/۹	۴۸۵۸/۹

خوبی وجود دارد و مدل توانایی زیادی در پیش‌بینی کلاس‌ها داشته است.

### شبیه‌سازی روند تغییرات میزان تبخیر و تعرق دشت نجف‌آباد

با استفاده از روش مدل زنجیره مارکوف و اتوماسیون سلولی (CA) روند تغییرات وقوع خشکسالی برای سال‌های آتی شبیه‌سازی و پیش‌بینی شد. بنابراین، سال ۲۰۲۰ به عنوان افق پیش‌بینی در این تحقیق انتخاب و با استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۰۸ وضعیت خشکسالی در سال ۲۰۲۰ محاسبه شد.

جدول ۳ نتایج پیش‌بینی روند تغییرات هر یک از کلاس‌ها را در محدوده دشت نجف‌آباد برای سال ۲۰۲۰ با استفاده از زنجیره‌های مارکوف نشان می‌دهد. در جدول ۳ ردیف‌ها، طبقات احتمال وقوع خشکسالی در سال ۲۰۱۵ و ستون‌ها طبقات احتمال وقوع خشکسالی در سال ۲۰۲۰ را نشان می‌دهند. براساس جدول ۳ بیشترین احتمال وقوع تغییر مربوط به نواحی است که در سال ۲۰۱۵ در دسته مناطق با خطرپذیری بسیار زیاد قرار گرفته‌اند؛ ولی در سال ۲۰۲۰ به مناطقی با خطرپذیری بسیار کم تبدیل شده‌اند. کمترین احتمال وقوع تغییر مربوط به تبدیل دسته مناطق با خطرپذیری بسیار کم به مناطق با خطرپذیری کم است.

جدول ۲. توافقی و عدم توافقی واقعی و پیش‌بینی شده در سال ۲۰۱۵

مقادیر	پارامترها
۰/۸۵	توافقی بین نقشه واقعی و پیش‌بینی شده $M(m)$
۰/۱۵	عدم توافقی $1 - ((M(m))$
۰/۲	توافقی ناشی از شانس $N(n)$
۰/۴۳	توافقی ناشی از کمیت
۰/۰۱۷	عدم توافقی ناشی از کمیت
۰/۲۲	توافقی مکان کلاس‌ها در دو نقشه واقعی و پیش‌بینی شده
۰/۱۲	و عدم توافقی مکان کلاس‌ها در دو نقشه واقعی و پیش‌بینی شده
۰/۶۳	شاخص کاپا

جدول ۳. درصد احتمال تغییر در گروه‌های احتمال وقوع خشکسالی دشت نجف‌آباد تا سال ۲۰۲۰ با استفاده از مدل زنجیره‌های مارکوف

اولویت‌بندی	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
بسیار کم	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۶	۰/۰۱۵۱	۰/۹۸۱۴
کم	۰/۰۲۱۸	۰/۰۶۱۴	۰/۳۵۳	۰/۵۰۲۷	۰/۰۶۱۱
متوسط	۰/۰۹	۰/۳۰۸۴	۰/۳۹۷۹	۰/۱۸۰۶	۰/۰۲۳۱
زیاد	۰/۲۴۴۴	۰/۴۳۸۸	۰/۲۲۶۶	۰/۰۷۷۳	۰/۰۱۲۸
بسیار زیاد	۰/۵۱۸۳	۰/۳۲۷۷	۰/۱۰۸۹	۰/۰۳۶۶	۰/۰۰۸۵

### تعیین اعتبار مدل‌سازی

#### محاسبه توافقی و عدم توافقی نقشه‌های واقعی و نقشه‌های به‌دست‌آمده از مدل‌سازی

در این مطالعه شاخص کاپا با مقایسه نقشه‌های واقعی و مدل‌سازی شده برای سال ۲۰۱۵ محاسبه شد. نتایج ارزیابی مدل در سال ۲۰۱۵ در جدول ۲ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۲، توافقی بین نقشه واقعی و پیش‌بینی شده  $(M(m))$  برابر ۰/۸۵ است. عدم توافقی بین دو نقشه نیز با توجه به رابطه  $1 - (M(m))$  برابر ۰/۱۵ است و توافقی ناشی از شانس  $N(n)$  که بدون داشتن هیچ اطلاعاتی از موقعیت و کمیت به دست می‌آید، برابر ۰/۲ است. توافقی ناشی از کمیت (تعداد سلول‌ها برای هر کلاس) در دو نقشه، برابر ۰/۴۳ است. عدم توافقی ناشی از کمیت نیز با توجه به فرمول  $[P(p)] - [P(m)]$  برابر ۰/۰۱۷ و همین‌طور توافقی و عدم توافقی مکانی کلاس‌ها در دو نقشه واقعی و پیش‌بینی شده به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۱۲ برآورد شده است. شاخص‌های کاپا که توانایی مدل در پیش‌بینی مکان پیکسل‌ها را نشان می‌دهد، برابر ۰/۶۳ است. با توجه به مقدار زیاد کاپا و بنابراین مقادیر زیاد توافقی کلی نتیجه گرفته می‌شود که بین دو نقشه پیش‌بینی شده با استفاده از روش CA Markov و مقدار واقعی سال ۲۰۱۵ توافقی

زیادی برای وقوع خشکسالی دارند که در نتیجه افت بیشتر سطح آب زیرزمینی را در پی خواهد داشت.

**پیش‌بینی جهت حرکت خشکسالی در سال ۲۰۲۰**  
 براساس تجزیه و تحلیل و نتایج به‌دست‌آمده در مراحل قبل می‌توان جهت‌های حرکت خشکسالی برای سال‌های آتی را نیز پیش‌بینی کرد. همان‌طور که از شکل ۴ پیداست، باغ‌ها و اراضی کشاورزی در قسمت مرکزی دشت نجف‌آباد طی سال‌های آتی با خطر زیادی برای وقوع خشکسالی روبه‌رو هستند. در آینده این مناطق مستعد وقوع خشکسالی هستند. به‌بیان دیگر، جهت حرکت خشکسالی به سمت نواحی داخلی دشت است و در نواحی مرزی احتمال وقوع خشکسالی کاهش می‌یابد.

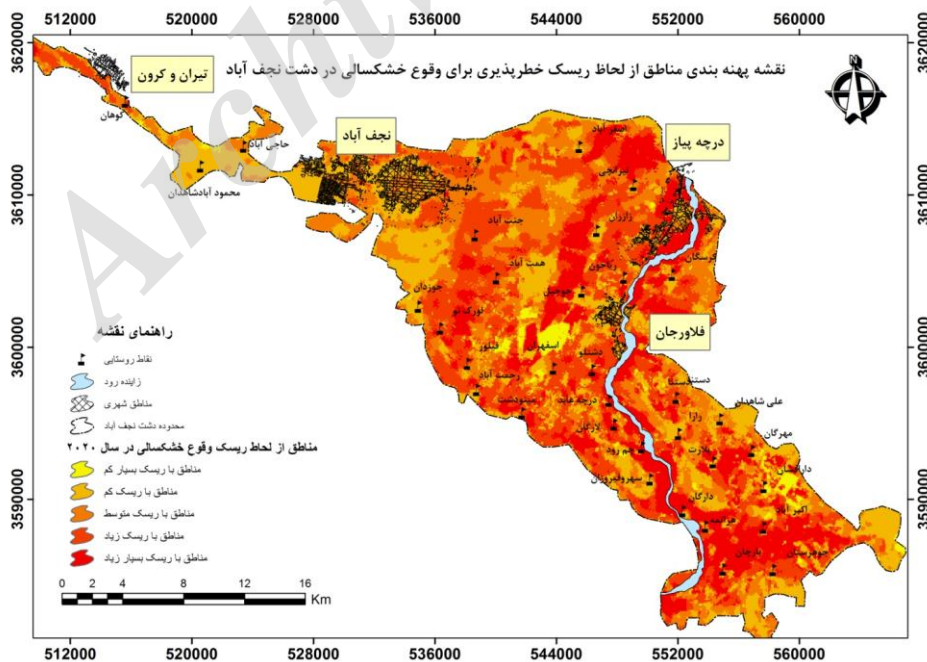
**پیش‌بینی روند تغییرات خشکسالی با استفاده از ترکیب روش زنجیره مارکوف و اتوماسیون سلولی**

در جدول ۴ مساحت پهنه‌بندی گروه‌های احتمال وقوع خشکسالی دشت نجف‌آباد برای سال ۲۰۲۰ ارائه شده است. مطابق این جدول بیشترین درصد از مساحت این دشت با احتمال زیاد و بسیار زیاد وقوع خشکسالی مواجه است و کمترین درصد از مساحت دشت با احتمال وقوع خشکسالی در حد متوسط روبه‌روست.

شکل ۴ هریک از طبقات میزان خطرپذیری خشکسالی را در سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. مطابق این شکل نیز اگر روند تبخیر و تعرق واقعی به این صورت ادامه یابد و نوع کشت منطقه تغییر نکند، بیشتر نواحی این دشت خطر

جدول ۴. مساحت پهنه‌بندی گروه‌های احتمال وقوع خشکسالی دشت نجف‌آباد برای سال ۲۰۲۰

اولویت‌بندی	مساحت برحسب هکتار	درصد
بسیار کم	۳۲۳۸/۵	۵/۶۳
کم	۱۴۰۸۱/۶۹	۲۴/۴۸
متوسط	۱۴۰۸۱/۶۹	۲۴/۴۸
زیاد	۱۴۳۲۸/۶	۲۴/۹۱
بسیار زیاد	۱۱۷۹۲/۸	۲۰/۵



شکل ۴. پهنه‌بندی طبقات خطرپذیری وقوع خشکسالی در سال ۲۰۲۰



- (DC) in Khorasan Razavi Province. Journal of human settlements planning. 2015;3(7):27. [Persian]
- [2]. Fathi merj A, Heidarian A. Evaluation of meteorological drought, agricultural and hydrological using GIS in Khozestan province. Iran-Watershed Management Science & Engineering. 2010;7(23):19-32. [Persian]
- [3]. Samadi H, Ebrahimi A. Drought and surface water and groundwater resources. Drought Impacts and its Mitigation Approaches. First ed. Sahrekord University: Soroosh; 2010.p. 115. [Persian]
- [4]. Niknam H, Ajdari moghadam M, Khosravi M. Neuro-fuzzy model patterns and telecommunications to predict drought Case Study: Zahedan. 4<sup>th</sup> international congress of the Islamic World Geographers. Zahedan. 2010. [Persian]
- [5]. Reza zade R, Mir Ahmadi M. Cellular Automation is a new method for simulation of urban growth. Journal of Technology of Education. 2008;4(6):47-55. [Persian]
- [6]. Alam J, Rahman M, Sadaat A. Monitoring Meteorological and Agricultural Drought dynamics in Barind Region Bangladesh using Standard Precipitation Index and Markov Chain Model. Journal of Geomatics and Geosciences. 2013;3(3):511-524.
- [7]. Avilés A, Célleri R, Solera A, Paredes J. Probabilistic Forecasting of Drought events using Markov Chain- and Bayesian Network-Based Models: A Case Study of an Andean Regulated River Basin. Journal of water. 2016;8(37): 1.
- [8]. Edalat Gostar M, Farzadian M, Amiri N. Stochastic models for prediction of drought in the county of Shiraz. National Conference on management of Water Crisis. Marvdasht. 2008. [Persian]
- [9]. Hasan Zade E, Abdi Kordani A, Fakheri fard A. Prediction of drought using genetic algorithms and neural network model. Journal of water and wastewater. 2009;23(3):48-59. [Persian]
- [10]. Rostami A, Razmkhah H, Fatahi M. Monitoring and development of artificial neural network model to predict drought using SPI index case study: Kohgiluyeh and Boyer. Faculty of Agriculture, Islamic Azad University of Shiraz. 2011:1. [Persian]
- [11]. Darzi F, Safavi H, Mamanposh A. Modeling of return flow from Nekooabad network to Najaf Abad basin. Second Conference on Water Resources of Iran. Isfahan. 2006. [Persian]

## بحث و نتیجه‌گیری

از آنجا که پارامتر تبخیر و تعرق (نیاز آبی گیاه) از بهترین فاکتورهای نمایش رفتار خشکسالی است، در این تحقیق برای نمایش وضعیت خشکسالی در سال‌های آتی (سال ۲۰۲۰) به‌عنوان پارامتری مؤثر در بررسی رفتار این رخداد طبیعی استفاده شد و به‌واسطه آن مناطق حساس در برابر خشکسالی شناسایی و خشکسالی برای سال‌های آتی با استفاده از روش ترکیبی مارکوف و CA پیش‌بینی شد. بدین‌منظور ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۰۸ نقشه پهنه‌بندی گروه‌های خشکسالی در سال ۲۰۱۵ محاسبه شد که داده‌های آن موجود است. سپس مقادیر پیش‌بینی‌شده این روش در سال ۲۰۱۵ با مقادیر واقعی این سال مقایسه و میزان صحت روش مشخص شد. نتایج گویای آن است که توافق بین نقشه واقعی و پیش‌بینی‌شده ۰/۸۵ است که این موضوع بیان‌کننده زیادبودن دقت این روش در پیش‌بینی وضعیت خشکسالی است. سپس با استفاده از روش CA Markov وضعیت خشکسالی در سال ۲۰۲۰ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد اگر شرایط به همین صورت ادامه یابد، تقریباً همه مناطق که در سال ۲۰۱۵ از خشکسالی رنج می‌برند، در سال ۲۰۲۰ با شدت بیشتری با خطر وقوع خشکسالی روبه‌رو خواهند بود. شایان یادآوری است که از شدت خشکسالی در نواحی شمال، شرق، نواحی مرزی جنوب شرقی و قسمت‌های از نواحی غربی و مرکزی محدوده مطالعه‌شده کاسته و در برخی نواحی دیگر بر شدت خشکسالی افزوده شده است و به‌طور کلی تمرکز خشکسالی بیشتر مربوط به نواحی مرکزی دشت است. با توجه به وضعیت خشکسالی در سال ۲۰۲۰ باید با اعمال تمهیدات مناسب میزان خسارت‌های ناشی از خشکسالی را تا حد ممکن کاهش داد. از آن جمله می‌توان به آمادگی برای بسط و توسعه رویکردهای مدیریت تقاضا و مصرف به جای گزینش اقدامات مدیریت عرضه و تأمین و همچنین اطلاع‌رسانی موضوع و به‌کارگیری رویکردهای مدیریت ریسک اشاره کرد.

## منابع

- [1]. Askarizade M, Behniafar A, Zabol Abasi F, Malbosi Sh. Regionalization of drought with index percentage of normal (PN) and deciles

- [12]. Phedge N, Muralikrishna I V, Chalapatirao K V. Study of cellular Automata Models for urban growth. www. GIS Development.net.
- [13]. OSullivan D. Exploring spatial process dynamics using irregular Cellular Automaton models. Journal of Geographical Analysis. 2001;33(1):1-18.
- [14]. White R, Engelen G. High resolution integrated modeling of the spatial Dynamics of urban and regional systems, Computers, environment and urban System. 2000;24:383-400.
- [15]. OSullivan D, Torrens P. Cellular models of urban systems. In: Bandini S, Worsch T, editor. Theory and Practical Issues on Cellular Automata. First ed. London: Springer; 2001.p. 108-116.
- [16]. Ahadnejad M, Rabet A. Evaluation and forecast of Haman impacts based on land use changes using multi temporal satellite imagery and GIS: a case study on Zanjan. Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2009;37(4):659-669.
- [17]. Hadavi F. Evaluation of physical development of the Zanjan city for optimized planning using GIS techniques. 1<sup>th</sup> National conference and exhibition Geomatics and conference of International Remote sensing. Tehran. 2011. [Persian]

Archive of SID