

## مدل سازی پراکندگی خشکسالی های ناشی از تغییر اقلیم در ایران با به کارگیری سیستم دینامیک

شهرامد علیزاده<sup>۱\*</sup>، حسین محمدی<sup>۲</sup>، پرویز کردوانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۲. استاد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استاد، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴)

### چکیده

تغییرات خشکسالی برای مدیریت بهینه بهره برداری از منابع آب به خوبی محسوس است. به همین دلیل، از گذشته های دور تحقیقات بسیار وسیعی درباره مدل سازی خشکسالی در دنیا و ایران انجام گرفته و با به کارگیری آن ها طرح های آبی و هیدرولیکی متعددی انجام گرفته است. یکی از اهداف مدل سازی سیستم های پویا بررسی سیاست های بالقوه مختلف برای بهبود عملکرد سیستم است. مدل سازی شاخص (شاخص بارش استاندارد شده) به عنوان شاخص وضعیت خشکسالی در ایستگاه های کشور با به کارگیری مدل شبکه عصبی شعاعی برای هر ایستگاه انجام گرفته است. متغیرهای مستقل شبکه عصبی، رطوبت نسبی، دما و کمبود اشیا هستند که با توجه به اثر آن ها روی بارش انتخاب شده اند. متغیر وابسته، شاخص SPI است. در کل دوره ۴۲ ساله با محاسبه SPI ۱۲ ماهه، ۳۴۸ نمره استاندارد، و با محاسبه SPI ۲۴ ماهه، ۳۳۶ نمره استاندارد برای هر ایستگاه به دست آمد. در همه ایستگاه ها، مقادیر (تبخیر و تعرق گیاه مرجع) از ماه ژانویه تا ژوئیه افزایش، سپس، تا ماه دسامبر کاهش یافت و در همه ایستگاه ها در ماه ژوئیه به حداکثر مقدار خود رسید. بیشترین مقادیر  $ET_0$  متوسط ماهانه در ایستگاه های آبادان و اهواز در ماه ژوئیه و به ترتیب، برابر با ۲۳۲/۱۸ و ۲۱۴/۱۶ میلی متر اتفاق افتاد.

### کلیدواژگان

تغییرات اقلیمی، سیستم دینامیک، مدل سازی خشکسالی،  $ET_0$ .

\* نویسنده مسئول، رایانامه: [takmod4160@yahoo.com](mailto:takmod4160@yahoo.com)

## مقدمه

ایران در منطقه‌ای از دنیا واقع شده که متوسط بارش سالانه آن کمتر از یک‌سوم متوسط بارش سالانه جهان است. علاوه بر کمبود بارش، توزیع زمانی و مکانی آن نیز بسیار نامناسب است. حتی پرباران‌ترین نقاط ایران، در فصل تابستان به آبیاری نیاز دارد. قسمت اعظم ایران خشک و کم‌آب است. در بسیاری از نقاط آب هست، ولی شور و غیر قابل استفاده است. در ایران نقاطی وجود دارد که نه آب سطحی جاری قابل استفاده دارد و نه آب زیرزمینی قابل مصرف، بسیاری از قنات‌ها به علل مختلف از جمله بر اثر حفر بی‌رویه چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق موتوری خشک شده، یا در حال نابودی است. از طرف دیگر، بر اثر بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی، یا بهتر بگوییم، غارت این ذخایر به‌وسیله چاه‌های موتوری، سطح آب زیرزمینی در بسیاری از نقاط به شدت پایین رفته است، به‌طوری که ادامه این وضع سبب تهی‌شدن ذخایر آب زیرزمینی و در نتیجه بروز مسائل و مشکلات بسیار خواهد شد (کردوانی، ۱۳۸۶، ج ۱، ص ۱).

تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب موضوعی جدی است که باعث دغدغه دست‌اندرکاران در سطوح ملی و بین‌المللی شده است. حتی اگر همین امروز انتشار گازهای گلخانه‌ای متوقف شود، آثار افزایش دما شامل خشکسالی‌ها و طغیان رودخانه‌ها برای چند دهه آینده ادامه خواهد یافت. تغییرات در بارش همراه با افزایش دما و کاهش پوشش برف بر کیفیت و کمیت آب تأثیر می‌گذارد. تغییر در اقلیم می‌تواند به تغییر در چرخه هیدرولوژیکی منجر شود و شرایط ویژه‌ای را در منابع آب منطقه‌ای ایجاد کند (Huang et al., 2014).

خشکسالی فاجعه‌ای طبیعی است که بر زندگی و سطح رفاه میلیون‌ها نفر از مردم در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. فقدان بارش بازده محصولات کشاورزی و دامی و به نوبه خود، در دسترس بودن غذا و درآمد افراد را کاهش می‌دهد. در کشورهای درحال توسعه، این آثار شدیدتر خواهد بود. همان‌طور که خشکسالی‌ها بیشتر تکرار می‌شوند، سازگاری با آثار آن، نگرانی اساسی برای کشورها و سیاست‌گذاران است (Lauren, 2013).

دینامیک سیستمی<sup>۱</sup> یک روش مدل‌سازی مبتنی بر تفکر سیستمی با تأکید بر قیدها، بازخوردها و تأخیرهاست که برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی رفتار مسائل پیچیده و ارزیابی پیامد سیاست‌گذاری‌ها به‌کار گرفته می‌شود. این رویکرد بر پایه نظریه پویایی غیرخطی، کنترل بازخوردی، و دیدگاه سیستمی است و امکان ساخت مدلی جهان واقعی، به‌منظور درک بهتر فرایندها را میسر می‌کند (Sterman, 2000).

خشکسالی هیدروژئولوژیکی از جمله مخاطرات طبیعی است که به دلیل متأثر شدن سامانه آب زیرزمینی از خشکسالی به وجود می‌آید. در این خشکسالی ابتدا مقدار تغذیه تنزل می‌یابد، سپس، افت تراز سطح ایستابی و در نهایت، کاهش یا توقف تخلیه ناشی از رودخانه‌ها و چشمه‌ها را به دنبال دارد (طایی سمیرمی و همکاران، ۱۳۹۱، ص ۱).

### بیان مسئله

پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم به‌ویژه در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای، طی سال‌های اخیر مشکلات بسیاری را به همراه داشته و بخش‌های مختلف ایران را تحت تأثیر قرار داده است. یکی از مهم‌ترین این پیامدها افزایش وقوع مخاطرات جوی- اقلیمی مانند سیل، خشکسالی، توفان گرد و غبار و غیره است. در این میان، سیل و خشکسالی بیشترین فراوانی وقوع در ایران را دارند (به دلیل موقعیت جغرافیایی و سیستم‌های سینوپتیکی تأثیرگذار در ایران). در سال‌های اخیر، وقوع خشکسالی سبب ایجاد چالش‌های بسیاری در بخش‌های مختلف، به‌ویژه منابع آب و کشاورزی شده است. از این رو، بررسی روند این بلاها طی سال‌های آتی برای برنامه‌ریزی صحیح در ایران لازم و ضروری به نظر می‌رسد (خزانه‌داری و همکاران، ۱۳۸۹، ص ۱).

هرچه زمان می‌گذرد، با گرم شدن هوای کره زمین، همچنین، خشکسالی‌ها، مسائل مناطق خشک مشکل‌تر و زندگی برای ساکنان این مناطق سخت‌تر می‌شود. برای کاهش آثار خشکی و

1. System dynamics

خشکسالی از منابع آب زیرزمینی زیادتر از حد برداشت شده که موجب پایین رفتن شدید سطح آب این منابع با ارزش زیرزمینی شده و در نتیجه آن مسائل متعددی به وجود آمده است. نه تنها برای جلوگیری از حادث شدن شرایط، بلکه بهتر شدن وضع زندگی ساکنان این مناطق و کشور، باید در درجه اول، عوامل به ظاهر نامساعد طبیعی این مناطق (خشک) مانند آفتاب سوزان، باد زیاد، زمین های شور (کویرها)، توده های عظیم ماسه ای به ابعاد و اشکال مختلف، آب های شور و گیاهان شور و قلیایی پسند و غیره را برای بهتر شدن زندگی به ویژه اشتغال و ایجاد مناطق و شهرک های صنعتی و جلب توریست را به کار گرفت (کردوانی، ۱۳۸۶، مقدمه ای بر چاپ هشتم).

رشد جمعیت و افزایش مصرف سرانه آب از یک سو و از طرف دیگر، تغییرات اقلیمی افق های جدیدی از طرح های عمران آبی را در آینده ای نه چندان دور پیش رو می گذارند. فائق آمدن بر بحران های آبی و کاهش آثار سوء آنها فقط با مدیریت و برنامه ریزی بهره برداری بهینه از منابع آب و با اتکا به دانش علمی روز عملی است. امروزه کامپیوتر و نرم افزارهای کامپیوتری به عنوان ابزاری قدرتمند به همه علوم در زمینه های مختلف کمک کرده، محاسبات طولانی و وقت گیر را در کمترین زمان و با دقت بسیار بالا انجام می دهد (Wang et al., 2011).

رویکرد بخشی نگری به مدیریت منابع آب در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران وجود دارد که باعث توسعه ناهماهنگ منابع شده است. به ویژه این مسئله در اقلیم های خشک و نیمه خشک که با محدودیت نسبی منابع آب مواجهند، بیشتر موجب ایجاد ناپایداری شده است. در ایران با میانگین بارندگی سالانه ۲۴۰ میلی متر در سال و تغییرات شدید زمانی و مکانی این بارندگی کم، و نیز ناپایداری های کوتاه مدت در اقلیم مناطق مختلف آن، پتانسیل بالایی برای برنامه ریزی و مدیریت جامع منابع آب وجود دارد (صفوی، ۱۳۸۵، ص ۱).

مدل ها همواره ابعاد ساده شده واقیعت اند. هدف از مدل سازی سیستم پویا به دست آوردن درک و دیدگاهی درباره روابط سیستم است تا بتوان خط مشی های ممکن برای بهبود سیستم را بررسی کرد. یکی از اهداف مدل سازی سیستم های پویا بررسی سیاست های بالقوه مختلف برای بهبود عملکرد

سیستم است. از بین این سیاست‌ها، سیاستی که بهترین نتایج را ارائه دهد، برای اجرا در سیستم انتخاب می‌شود (Shi & Gill, 2005).

### پیشینه و سوابق تحقیق

در زمینه موضوع تحقیق حاضر در ایران و با این عنوان تحقیقی در ایران انجام نگرفته است، اما به‌طور پراکنده مقاله‌ها و نوشته‌هایی در متون انگلیسی و فارسی تا اندازه‌ای مشابه وجود دارد که به آن‌ها اشاره می‌شود.

دانش‌کار آراسته (۱۳۸۶) روند تغییرات زمانی و مکانی بارش و دما در کشور را به کمک سنجش‌ازدور و شناسایی نواحی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی تحلیل کرد. نتایج تحقیق او نشان داد با توجه به تعامل اقلیم و محیط زیست، تغییرات اقلیمی آثار شایان توجه مثبت و منفی بر زیست‌بوم به‌خصوص زیست‌بوم‌های کشاورزی دارد. برای مدیریت بهتر منابع به‌خصوص منابع آب، ضرورت دارد وقوع تغییرات اقلیمی و میزان تأثیرگذاری آن بر زیست‌بوم کشاورزی شناسایی شود. سنجش‌ازدور امکان می‌دهد ضمن بررسی همزمان سطوح وسیع، با به‌کارگیری تصاویر متوالی یک چارچوب زمانی و مکانی مناسب برای بررسی رفتار هیدرولوژیکی زیست‌بوم‌ها به‌وجود آید.

حسین‌زاده و واعظ تهرانی (۱۳۸۸)، مدل‌سازی راندمان کاربرد شبکه‌های آبیاری را با به‌کارگیری روش تحلیل پویایی سیستم بررسی کردند. مدیریت منابع آب نیازمند تصمیم‌گیری آینده‌نگر و طراحی پروژه‌های عمرانی با رویکردی جامع است (حسین‌زاده و واعظ تهرانی، ۱۳۸۸، ص ۱). یکی از ابزارهای مدیریتی براساس این نگرش، علم پویایی سیستم است. از نقاط قوت این روش شبیه‌سازی می‌توان به افزایش سرعت توسعه مدل‌سازی، افزایش اعتماد به مدل در اثر مشارکت کاربر، امکان توسعه گروهی مدل، ارتباط مؤثر با نتایج، آسانی ایجاد تغییر در مدل و توانایی انجام‌دادن تحلیل حساسیت اشاره کرد. کاهش تلفات آب و افزایش راندمان آبیاری یکی از اصول اساسی در توسعه کشاورزی است.

واعظ تهرانی و همکاران (۱۳۸۹) توسعه یک مدل نوسازی شبکه‌های آبیاری با رویکرد

دینامیک سیستم‌ها را مطرح کردند. هدف از پژوهش آن‌ها معرفی روشی نو و مؤثر با توسعه مدلی برای نوسازی شبکه‌های آبیاری با رویکرد دینامیک سیستم‌ها بود. آن‌ها نشان دادند شناخت بهتر شبکه‌های آبیاری و آمایش سیاست‌های بهره‌برداری مورد نظر تحت سناریوهای متفاوت، و تعیین سیاست مناسب در تأمین نیازهای پایه و اساسی شبکه‌ها از مهم‌ترین اهداف ساخت مدل است. در این مدل شرایط مختلف برای نوسازی شبکه‌ها با افزایش کیفیت بازده، عدالت و پایداری که می‌تواند به افزایش تأمین آب و سطح زیرکشت منجر شود، آزمون شد (واعظ تهرانی و همکاران، ۱۳۸۹، ص ۱).

ناصری و همکاران (۱۳۹۰)، مدل‌سازی پویای سیستم در مدیریت بهره‌برداری آبخوان دشت تبریز را مد نظر قرار دادند. پیشگویی الگوی رفتاری تغییرات در سیستم‌های منابع آب، تحت تأثیر اعمال سیاست‌های بهره‌برداری می‌تواند بهره‌برداران این منابع را به منظور استفاده بهینه، با توجه به موقعیت‌های فصلی و اقلیمی و براساس اصل توسعه پایدار یاری کند (ناصری و همکاران، ۱۳۹۰، ص ۱).

علیچانی و بابایی (۱۳۹۲)، خشکسالی‌های کوتاه‌مدت ایران را تحلیل فضایی کردند. در این تحقیق پدیده خشکسالی در ایران با شاخص بارش استاندارد (SPI) در بازه‌های زمانی سه و شش ماهه بررسی و تجزیه و تحلیل شد و پس از محاسبه فراوانی نسبی خشکسالی‌ها در ۷۰ ایستگاه سینوپتیک در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۵ با به‌کارگیری روش درون‌یابی کریجینگ معمولی، نقشه‌های پهنه‌بندی آن‌ها در محیط ArcGIS تولید شد (علیچانی و بابایی، ۱۳۹۲، ص ۱).

لورنزو و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر خشکسالی و مدیریت آب در سیستم‌های مختلف آبیاری را ارزیابی کردند. این ارزیابی با به‌کارگیری شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص تبخیر و تعرق استاندارد بارش (SPEI) تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوایی و در دسترس بودن منابع آب با به‌کارگیری دو شاخص خشکسالی انجام گرفت، اگرچه بارش، نقش مهمی در توضیح تغییرات زمانی در پارامترهای مورد تجزیه و تحلیل دارد.

میشرا و سینگ (۲۰۱۱) موضوع وضعیت خشکسالی در سال‌های اخیر و تقاضای افزایش آب و عوامل تغییرات اقلیمی را که در میزان بارش تأثیر دارد، مطرح کردند. بررسی روش‌های مختلف

به‌کارگرفته شده برای مدل‌سازی خشکسالی را که شامل پیش‌بینی خشکسالی، مدل‌سازی براساس احتمال، فضا زمانی، تجزیه و تحلیل، به‌کارگیری مدل‌های جهانی آب‌وهوا برای حالات خشکسالی و سنجش آثار تغییر اقلیم در طول سه دهه گذشته بوده است، بررسی کردند.

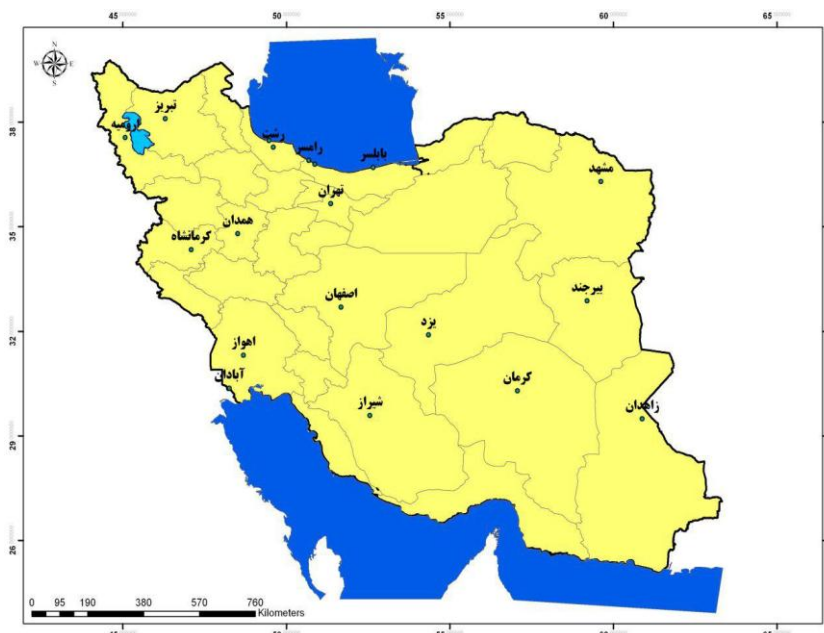
ژانگ و همکاران (۲۰۱۴)، توزیع مکانی و زمانی بارش در چین، در سال‌های ۲۰۱۲-۱۹۶۱ را بررسی کردند. آن‌ها توزیع مکانی و زمانی عواملی را که باعث بارش شدید براساس داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های هواشناسی می‌شود، تحلیل کردند. روند شاخص بارش از جنوب غربی به شمال شرقی رو به کاهش بود، که این ناشی از تفاوت‌های منطقه‌ای و تأثیر توپوگرافی بوده است. علاوه بر این، نتایج رابطه نشان داد بین بارش و تغییرات اقلیمی رابطه وجود دارد، و تغییرات اقلیمی در توزیع مکانی و زمانی خشکسالی تأثیر می‌گذارند.

مدل‌سازی دینامیک سیستم شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی وابسته به یکدیگر است که به‌منظور تشخیص اینکه چگونه هر یک از آن‌ها را تحت تأثیر هر یک از عوامل دیگر در طول زمان قرار می‌دهد، انجام می‌گیرد. در این مطالعه، برای اولین بار یک مدل پویایی سیستم برای تحلیل سناریوهای تغییرات اقلیمی با یکپارچه‌سازی دینامیک سیستم و تغییرات اقلیمی توسعه داده شده است.

سیستم دینامیک در رشته‌های مختلف برای مدل‌سازی به‌کار گرفته شده است، ولی در جغرافیا تا کنون این روش به‌کار گرفته نشده است. در این مقاله برای اولین بار این روش برای مدل‌سازی خشکسالی در ایران به‌کار گرفته شد.

### محدوده و قلمرو تحقیق

ایران یکی از کشورهای آسیای جنوب غرب (خاورمیانه) است و به‌طور تقریبی عرض جغرافیایی آن بین ۲۵ درجه تا ۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی آن نیز بین ۴۴ درجه تا ۶۴ درجه طول شرقی می‌باشد. وسعت ایران ۱۶۵۰۱۵۹ کیلومتر مربع است (جداری عیوضی، ۱۳۸۹، ص ۸). در شکل ۱ پراکندگی ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است که پوشش لازم در سطح کشور را دارند.



شکل ۱. نقشه ایستگاه‌های به‌کار گرفته‌شده (مأخذ: مطالعات نگارندگان)

### داده‌های تحقیق

داده‌های ۱۹ ایستگاه که داده‌های کافی در دوره ۲۰۰۳-۱۹۶۱ را داشتند، برای تحلیل انتخاب شد. داده‌های جمع‌آوری شده شامل مقادیر روزانه شش متغیر هواشناسی دمای بیشینه برحسب درجه سانتی‌گراد ( $T_{max}$ )، دمای کمینه برحسب درجه سانتی‌گراد ( $T_{min}$ )، رطوبت نسبی حداکثر برحسب درصد ( $RH_{max}$ )، رطوبت نسبی حداقل برحسب درصد ( $RH_{min}$ )، سرعت باد برحسب نات، و ساعات آفتابی برحسب ساعت که برای برآورد  $ET_0$  با روش PM به‌کار گرفته شدند.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	درصد داده‌های ناقص	نوع اقلیم بر مبنای دمارتن
آبادان	۴۸° ۱۵' E	۳۰° ۲۲' N	۶٫۶	۱۸٫۰۹	خشک
اهواز	۴۸° ۴۰' E	۳۱° ۲۰' N	۲۲٫۵	۲٫۴۳	خشک



ادامه جدول ۱. مشخصات ایستگاه های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	درصد داده های ناقص	نوع اقلیم بر مبنای دمارتن
اصفهان	۵۱° ۴۰' E	۳۲° ۳۷' N	۱۵۵۰٫۴۰	۱٫۷۰	خشک
بیرجند	۵۹° ۱۲' E	۳۲° ۵۲' N	۱۴۹۱	۱٫۷۶	خشک
تهران	۵۱° ۱۹' E	۳۵° ۴۱' N	۱۱۹۰٫۸	۱٫۵۵	خشک
زاهدان	۶۰° ۵۳' E	۲۹° ۲۸' N	۱۳۷۰	۲٫۳۹	خشک
کرمان	۵۶° ۵۸' E	۳۰° ۱۵' N	۱۷۵۳٫۸۰	۱٫۵۲	خشک
یزد	۵۴° ۱۷' E	۳۱° ۵۴' N	۱۲۳۷٫۲	۱٫۵۷	خشک
ارومیه	۴۵° ۵۰' E	۳۷° ۳۲' N	۱۳۱۵٫۹	۲٫۱۷	نیمه خشک
تبریز	۴۶° ۱۷' E	۳۸° ۵۰' N	۱۳۶۱	۱٫۲۶	نیمه خشک
خرم آباد	۴۸° ۱۷' E	۳۳° ۲۶' N	۱۱۴۷٫۸	۰٫۸۸	نیمه خشک
شیراز	۵۲° ۳۶' E	۲۹° ۳۲' N	۱۴۸۴٫۰۰	۰٫۳۷	نیمه خشک
کرمانشاه	۴۷° ۹' E	۳۴° ۲۱' N	۱۳۱۸٫۶	۲٫۰۵	نیمه خشک
مشهد	۵۹° ۳۸' E	۳۶° ۱۶' N	۹۹۹٫۲	۱٫۲۴	نیمه خشک
همدان	۴۸° ۳۲' E	۳۴° ۵۲' N	۱۷۴۱٫۵۰	۰٫۲۲	نیمه خشک
بایلسر	۵۲° ۳۹' E	۳۶° ۴۳' N	-۲۱	۱٫۶۲	مرطوب
انزلی	۴۹° ۲۸' E	۳۷° ۲۸' N	-۲۶٫۲	۱٫۸۱	بسیار مرطوب
رامسر	۵۰° ۴۰' E	۳۶° ۵۴' N	-۲۰	۲٫۴۹	بسیار مرطوب
رشت	۴۹° ۳۶' E	۳۷° ۱۵' N	-۶٫۹	۱٫۱۷	بسیار مرطوب

### روش شناسی تحقیق

در این تحقیق یک مدل دینامیک سیستم برای ارزیابی تأثیر سیاست سازگاری مواجهه با خشکسالی بر جمعیت انسانی و امرار معاش رفاه در منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شد. نتایج مدل های هیدرولوژیکی را به عنوان ورودی فرض کردیم و با به کارگیری آن و عامل در دسترس بودن آب، سیستم های دیگر ساخته شد و سپس وابستگی های متقابل شناخته شده را با استفاده از ادبیات داده های تحقیق اساس کار طراحی شد. در این تحقیق به منظور گردآوری داده ها روش مطالعات

کتابخانه‌ای، و مطالعه مقالات و پژوهش‌های محققان دیگر به کار گرفته شد و یک پایگاه داده از اطلاعات برای توسعه مدل‌های مبتنی بر سیستم دینامیک تهیه شد. همچنین، اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی برای تحلیل خشکسالی به کار گرفته شد. اطلاعات مورد نیاز از جامعه آماری مورد بررسی گردآوری شد و با روش‌های آماری مناسب مانند جداول فراوانی مطلق و نسبی، نمودارهای جعبه‌ای و آزمون‌های آماری مناسب ارتباط هر یک از متغیرهای مستقل مورد بررسی با متغیر وابسته تعیین شد. روش نمونه‌گیری در این تحقیق، نمونه‌گیری تصادفی بود. برای پردازش اطلاعات نرم‌افزارهای SPSS و EXCEL به کار گرفته شد و نتایج به صورت جدول و نمودار با تحلیل‌های مربوطه ارائه شد و تحلیل‌های روند زمانی و مکانی نیز در محیط GIS انجام گرفت.

#### توزیع مکانی تبخیر و تعرق (ET<sub>o</sub>) متوسط سالانه و ماهانه

اصطلاح (ET<sub>o</sub>) که ابتدا توسط پنمن<sup>۱</sup> و سپس، پرویت<sup>۲</sup> و همکاران هنگام تهیه دستورالعمل معروف به FAO-24 برای تخمین نیاز آبی گیاهان به کار گرفته شده به این شرح تعریف شده است: «تبخیر و تعرق از یک سطح فرضی پوشیده‌شده کامل از چمن کوتاه به ارتفاع ۸ تا ۱۰ سانتی‌متر که وسعت آن بسیار زیاد باشد و بدون آنکه دارای آفات یا بیماری باشد، در وضعیتی که در محدودیت آبی از نظر مصرف قرار نداشته باشد، فعالانه رشد داشته باشد» (علیزاده، ۱۳۸۶، ص ۲۴۷).

شاخص بارش استاندارد شده<sup>۳</sup>، شاخصی است که براساس احتمال وقوع بارش برای هر دوره زمانی محاسبه می‌شود. SPI (شاخص بارش استاندارد شده) را می‌توان برای دوره‌های زمانی مختلف محاسبه کرد. این شاخص می‌تواند وقوع خشکسالی را پیش‌بینی کند و در ارزیابی شدت خشکسالی کمک کند. طبقه‌های مختلف خشکسالی براساس مقادیر مختلف SPI در جدول ۲ نشان داده شده است.

1. penman

2. Pruitt

3. Standardized Precipitation Index (SPI)

جدول ۲. طبقه‌های مختلف خشکسالی براساس مقادیر مختلف SPI

مقادیر SPI	طبقه خشکسالی	مقادیر SPI	طبقه خشکسالی
-۱٫۵ تا -۱٫۹۹	خشکسالی شدید	۰ تا -۰٫۹۹	خشکسالی ملایم
۲- و کمتر	خشکسالی بسیار شدید	-۱٫۴۹ تا -	خشکسالی متوسط

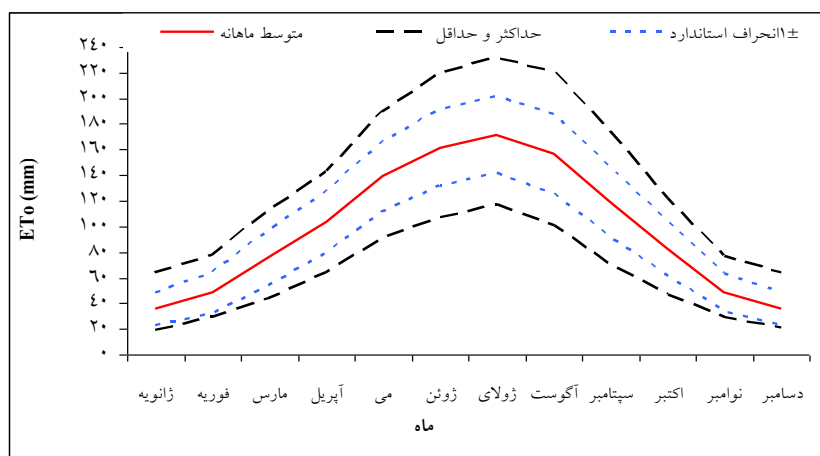
### مدل‌سازی شاخص SPI در ایستگاه‌های کشور

در این بخش، مدل‌سازی شاخص SPI به‌عنوان شاخص وضعیت خشکسالی در ایستگاه‌های کشور با مدل شبکه عصبی شعاعی برای هر ایستگاه انجام گرفته است. متغیرهای مستقل شبکه عصبی، رطوبت نسبی، دما و کمبود اشیا می‌باشند که با توجه به اثر آن‌ها روی بارش انتخاب شده‌اند. متغیر وابسته شاخص SPI است. در نتیجه، تلاش شده است با این سه متغیر مستقل، مدلی از نوع شبکه عصبی شعاعی برای پیش‌بینی خشکسالی در ایستگاه‌ها طراحی شود. شبکه‌های عصبی شعاعی با توجه به اینکه جزء الگوریتم‌های هوشمند محسوب می‌شوند و از توابع غیرخطی استفاده می‌کنند، در مدل‌سازی پدیده‌هایی که رفتار غیرخطی دارند، عملکرد بهتری دارند. در نتیجه، انتظار می‌رود در مدل‌سازی پدیده‌های پویا یعنی پدیده‌هایی که رفتار آن‌ها در طول زمان تغییر می‌کند، عملکرد بهتری داشته باشند. بنابراین، می‌توان برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی رفتارهای غیرخطی این مدل‌ها را به‌کار گرفت. مدل به‌کار گرفته شده برای همه ایستگاه‌ها مدلی با یک لایه پنهان است، اما تعداد نورون‌ها برای ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. برای انتخاب تعداد نورون‌ها روش آزمون و خطا اجرا شد، یعنی برای هر ایستگاه تعداد زیادی مدل با تعداد نورون‌های متفاوت ساخته شد و در نهایت، شبکه‌ای که عملکرد مناسبی از خود نشان داد به‌عنوان مدل مناسب انتخاب شد.

لایه ورودی نیز برای همه شبکه‌ها چهار نورون دارد. این نورون‌ها پذیرنده متغیرهای رطوبت نسبی، دما و کمبود اشیا به‌عنوان متغیر مستقل، و شاخص SPI به‌عنوان متغیر وابسته است. در لایه خروجی متغیری که به‌دست خواهد آمد، پیش‌بینی شبکه عصبی برای شاخص SPI خواهد بود. برای بررسی دقت در عملکرد شبکه هنگام مدل‌سازی، ضریب تشخیص، میانگین مربعات خطا و ریشه دوم میانگین مربعات خطا به‌کار گرفته شده است.

## یافته‌ها و بحث

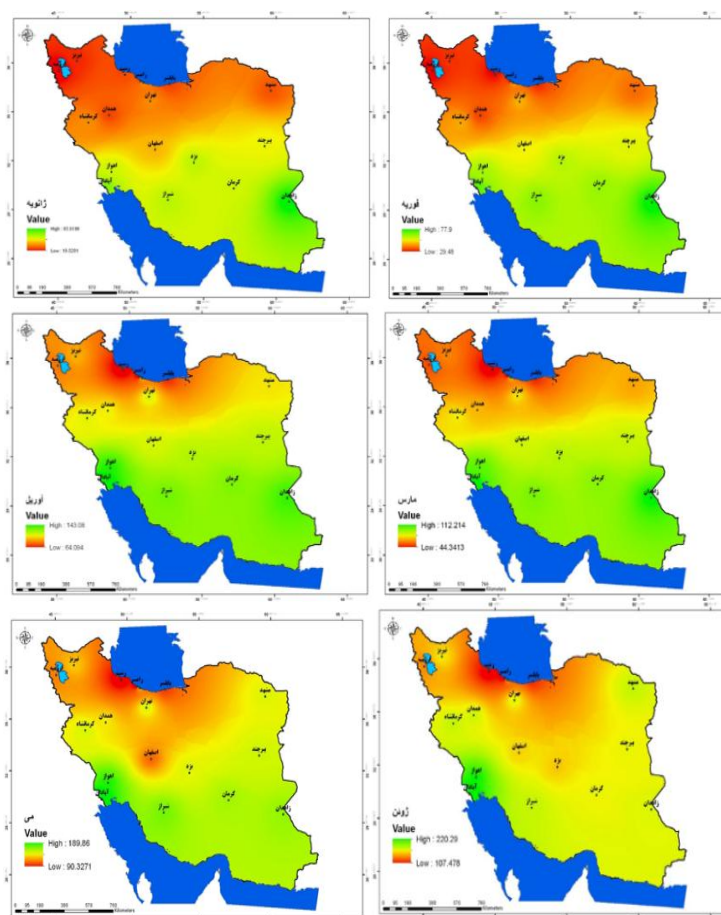
مقادیر  $ET_0$  در همه ایستگاه‌ها در ژولای به بیشترین مقدار خود رسیده است. همچنین، در همه ایستگاه‌ها، مقادیر  $ET_0$  از ژانویه تا ژولای افزایش و سپس، تا ماه دسامبر کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، مقادیر  $ET_0$  از آوریل تا سپتامبر بیشتر از ۹۰ میلی‌متر است و در ماه ژولای به بیشترین مقدار خود رسیده است. ماه‌های ژانویه و دسامبر مقدار  $ET_0$  کمتر از ۴۰ میلی‌متر دارند. در ماه‌های مربوط به فصل رشد، یعنی فصل‌های بهار و تابستان حدود ۷۲٫۳ درصد از  $ET_0$  سالانه اتفاق می‌افتد و فقط ۲۷٫۷ درصد  $ET_0$  در ماه‌های سرد سال اتفاق می‌افتد.



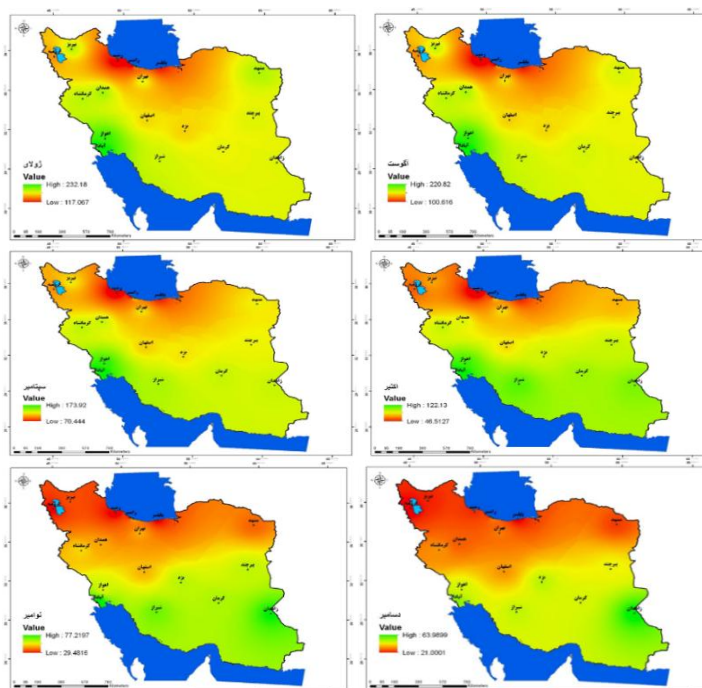
شکل ۲. مقادیر  $ET_0$  ماهانه (۱۹۶۱-۲۰۰۳)

در شکل ۳ توزیع مکانی میانگین  $ET_0$  ماهانه در دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۳ با روش IDW برای ایران ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییر رنگ از ژانویه تا ژولای به سمت افزایش  $ET_0$  و از ژولای تا دسامبر دوباره به سمت رنگ آبی برمی‌گردد که نشان‌دهنده کاهش  $ET_0$  است. بیشترین میزان تبخیر در ژولای با دامنه‌ای از ۱۱۷ تا ۲۳۲ میلی‌متر است. در این ماه بیشترین میزان  $ET_0$  در قسمت‌های شمال شرقی و غربی ایران، و کمترین آن در قسمت‌های شمالی افتاده

است. به‌طور کلی، در این نقشه‌ها، هر چه از سمت شرق و جنوب کشور به سمت مرکز و شمال پیش رویم، میزان  $ET_0$  کاهش می‌یابد. در ماه‌های زمستانی یعنی ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر کمترین میزان  $ET_0$  اتفاق افتاده است و در این ماه‌ها،  $ET_0$  روند همگن‌تری را نسبت به سایر ماه‌ها دارد. همچنین، بیشترین میزان  $ET_0$  در ماه‌های تابستانی یعنی می، ژوئن، ژولای و اگوست داده است. در همه ماه‌ها، بیشترین میزان  $ET_0$  مربوط به قسمت‌های جنوب شرقی و جنوبی و کمترین آن مربوط به قسمت‌های شمالی و مرکزی ایران است.

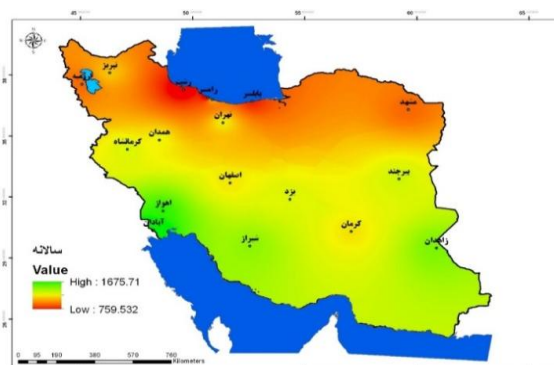


شکل ۲. توزیع مکانی  $ET_0$  سالانه (میلی‌متر) در ایران براساس روش ID



ادامه شکل ۲. توزیع مکانی ET سالانه (میلی‌متر) در ایران براساس روش IDW

با روش میانگین‌گیری، از نقشه‌های ماهانه تولیدشده با روش IDW در نرم‌افزار ArcGIS نقشه توزیع مکانی شیب خط رگرسیونی سالانه در ایران ترسیم شد.



شکل ۴. توزیع مکانی شیب خط رگرسیونی سالانه (میلی‌متر) در ایران براساس روش IDW

## تحلیل شاخص SPI

در کل دوره ۴۲ ساله، با محاسبه SPI ۱۲ ماهه، ۳۴۸ نمره استاندارد، و با محاسبه SPI ۲۴ ماهه، ۳۳۶ نمره استاندارد برای هر ایستگاه به دست آمده است. جدول های ۳ و ۴ حداقل و حداکثر این نمره های استاندارد را نشان می دهد.

جدول ۳. فراوانی ایستگاه های دارای نمره های خشکسالی های بازه ۱۲ ماهه در طول دوره مطالعه

طبقه های SPI	فراوانی		نسبی		جمع
	مطلق	نسبی	مطلق	نسبی	
خشکسالی بسیار شدید	۰	۰	۲۷	۷٫۸	۳۴۸
خشکسالی شدید	۳	۰٫۹	۲۸	۱۰٫۹	۳۴۸
خشکسالی متوسط	۵	۱٫۴	۵۷	۱۶٫۴	۳۴۸
خشکسالی ضعیف	۷۲	۲۰٫۷	۱۴۵	۴۱٫۷	۳۴۸

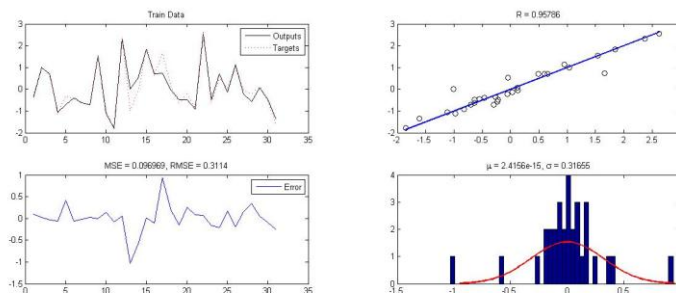
جدول ۴. فراوانی ایستگاه های دارای نمره های خشکسالی های بازه ۲۴ ماهه در طول دوره مطالعه

طبقه های SPI	فراوانی		نسبی		جمع
	مطلق	نسبی	مطلق	نسبی	
خشکسالی بسیار شدید	۰	۰	۲۳	۶٫۸	۳۳۶
خشکسالی شدید	۳	۰٫۹	۳۷	۱۱	۳۳۶
خشکسالی متوسط	۹	۲٫۷	۵۴	۱۶٫۱	۳۳۶
خشکسالی ضعیف	۵۹	۱۷٫۶	۱۳۹	۴۱٫۴	۳۳۶

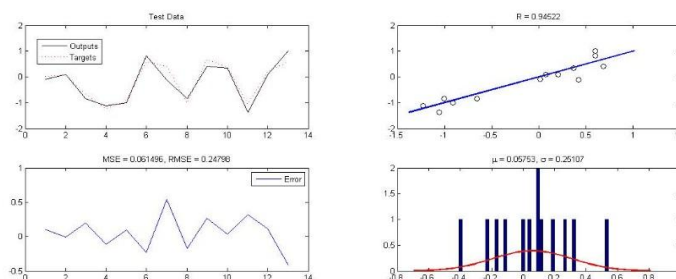
بر اساس جدول ۳ در بازه ۱۲ ماهه، فقط سه ایستگاه خشکسالی بسیار شدید نداشته و دو ایستگاه بیش از ۲۰ مرتبه خشکسالی بسیار شدید را تجربه کرده است. در این بازه دامنه خشکسالی های بسیار شدید بین صفر تا ۲۷ است. همه ایستگاه ها خشکسالی های شدید داشته اند که دامنه آن بین ۳ تا ۳۸ است. بر اساس جدول ۴، در بازه ۲۴ ماهه، ایستگاه قم بیش از ۲۰ مرتبه خشکسالی بسیار شدید داشته است و هفت ایستگاه خشکسالی بسیار شدید را تجربه نکرده اند. دامنه خشکسالی های بسیار شدید بین صفر تا ۲۳ است. همه ایستگاه ها خشکسالی های شدید را تجربه کرده اند که دامنه آن بین ۳ تا ۳۷ است. حداکثر فراوانی خشکسالی های متوسط تا ۵۵ مورد مشاهده شده است. خشکسالی های ضعیف فراوان ترند و تا ۱۴۰ مورد رخ داده است، البته این خشکسالی ها را می توان جزء شرایط طبیعی فرض کرد، چون شدت کمتری دارند.

### مدل‌سازی شاخص خشکسالی در ایستگاه بندر انزلی

مدل‌سازی شاخص خشکسالی برای ۱۹ ایستگاه مورد مطالعه انجام گرفت. برای نمونه، نتایج آموزش شبکه عصبی برای ایستگاه بندر انزلی در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار ضریب تشخیص ۹۵ درصد و مقدار میانگین خطا ۰/۱ است. در نتیجه، عملکرد شبکه هنگام آموزش خوب بوده است. در زمان پیش‌بینی که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است، نیز ۹۵ درصد از تغییرات خشکسالی را در ایستگاه بندر انزلی به‌وسیله مدل توجیه شده است و مقدار میانگین خطا نیز همان ۰/۱ بوده است. در نتیجه، مدل‌های شبکه عصبی شعاعی می‌توانند عملکرد بسیار مناسبی برای پیش‌بینی خشکسالی‌های ایستگاه بندر انزلی داشته باشند.



شکل ۶. نتایج آموزش شبکه عصبی شعاعی در ایستگاه بندر انزلی



شکل ۷. نتایج پیش‌بینی خشکسالی با شبکه عصبی شعاعی در ایستگاه بندر انزلی

### نتیجه‌گیری آثار تغییرات اقلیمی بر الگوی توزیع زمانی و مکانی خشکسالی در ایران

تبخیر- تعرق مرجع ( $ET_0$ ) از مهم‌ترین مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژی ناحیه خشک برای



فرمول‌بندی یک برنامه‌ریزی آبیاری مؤثر، آماده‌کردن داده‌های ورودی برای مدل‌های هیدرولوژیکی مطالعات تعادل آب، و فهم تأثیر تغییرات اقلیمی گذشته بر فرایندهای هیدرولوژیکی است. از این رو، اطلاع درباره خصوصیات زمانی و مکانی روندهای  $ET_0$  نقش حیاتی را در مطالعات هیدرولوژیکی و اکولوژیکی بازی می‌کند. در مطالعه حاضر روند تغییرات زمانی و مکانی ماهانه و سالانه  $ET_0$  محاسبه شده به وسیله معادله فائو-پنمن - مانتیث (FAO56-PM) در دوره ۲۰۰۳-۱۹۶۱ بررسی شد. همچنین، تغییرات ناگهانی  $ET_0$  ایستگاه‌ها و کل ایران و دوره‌های موجود در  $ET_0$  بررسی شد. بدین منظور آمار و اطلاعات ۱۹ ایستگاه سینوپتیک ثبت شده در سازمان هواشناسی کشور به‌کار گرفته شد که نتایج زیر از آن استخراج شد.

- در همه ایستگاه‌ها، مقادیر  $ET_0$  از ماه ژانویه تا ژوئیه افزایش و سپس، تا ماه دسامبر کاهش یافت و در همه ایستگاه‌ها در ماه ژوئیه به حداکثر مقدار خود رسید. بیشترین مقادیر  $ET_0$  متوسط ماهانه در ایستگاه‌های آبادان و اهواز در ماه ژوئیه و به ترتیب، برابر با ۲۳۲/۱۸ و ۲۱۴/۱۶ میلی‌متر اتفاق افتاد که در طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزء اقلیم‌های خشک قرار گرفت. در همه ایستگاه‌ها کمترین مقادیر  $ET_0$  در ماه‌های ژانویه و دسامبر اتفاق افتاد و از بین همه ایستگاه‌ها، ارومیه کمترین مقدار  $ET_0$  ماهانه و برابر با ۱۹/۰۲ میلی‌متر در ماه ژانویه را داشت. متوسط سالانه کل  $ET_0$  ایران در دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۳ حدود ۱۱۵۴ میلی‌متر بود که روندی صعودی برابر با ۲/۹ میلی‌متر در سال در طول این دوره نشان داد. براساس نمودار تجمعی بی‌ترتیب  $ET_0$  سالانه، شش فاز (سه فاز صعودی و سه فاز نزولی) متفاوت در  $ET_0$  سالانه تشخیص داده شد که روند  $ET_0$  سالانه در طول سال‌های ۱۹۶۱-۱۹۶۳، ۱۹۷۵-۱۹۸۱ و ۱۹۸۷-۱۹۹۳ نزولی و در سال‌های ۱۹۶۵-۱۹۷۵، ۱۹۸۱-۱۹۸۷ و ۲۰۰۳-۱۹۹۳ صعودی بود.

- براساس نقشه توزیع مکانی متوسط ماهانه  $ET_0$ ، بیشترین میزان تبخیر در ماه ژوئیه با دامنه‌ای از ۱۱۷ تا ۲۳۲ میلی‌متر بود. در این ماه بیشترین میزان  $ET_0$  در قسمت‌های شرقی و جنوبی ایران و کمترین آن در قسمت‌های شمالی اتفاق افتاد. در ماه‌های زمستانی یعنی ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر، کمترین میزان  $ET_0$  اتفاق افتاد و در این ماه‌ها،  $ET_0$  روند

همگن تری را نسبت به سایر ماه‌ها داشت. براساس نقشه توزیع مکانی  $ET_0$  سالانه، مقادیر  $ET_0$  در این نقشه دامنه‌ای از ۷۵۹٫۵۳ تا ۱۶۷۵٫۷۱ میلی‌متر در سال دارند که کمترین میزان آن در قسمت‌های شمالی و بیشترین مقدار، در قسمت‌های جنوب، جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی اتفاق افتاده است.

### پیشنهادها

با توجه به تجزیه و تحلیل‌های انجام گرفته در این مقاله، پیشنهادهای زیر مطرح می‌شود:

۱. راه‌اندازی و توسعه سیستم‌های هشداردهنده و پیش‌آگاهی وقوع خشکسالی و ایجاد شبکه‌های جمع‌آوری آمار و اطلاعات، برای آگاهی مدیران، برنامه‌ریزان و بهره‌برداران تا هشدارهای لازم در مواقع ضروری به مناطق منتشر شود.
۲. با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران و تأثیر توده پرفشار جنب حاره بر اقلیم ایران، باید برای مقابله با خشکسالی، سطح دانش و فناوری کشور در این زمینه بالا رود و دانشجویان و محققان پیرامون روش‌های نوین و ابتکاری در زمینه آب، با حساسیت و تمرکز بیشتری کار کنند و برای رفع بحران، کارگروه‌های تخصصی تشکیل شود.
۳. با توجه به گسترش خشکسالی در ایران و مدیریت نادرست علمی در مصرف آب (شهری، صنعتی، کشاورزی و غیره) اگر مانند بعضی از کشورهای دنیا، با به‌کارگیری افراد کارشناس به‌عنوان پلیس آب، می‌توان مردم را نسبت به عمق فاجعه خشکسالی آگاه کرد. با مراجعه این افراد به در منازل، راه‌های مصرف بهینه آب و راه‌های جلوگیری از هدررفتن آن، همچنین، آموزش‌های لازم به کشاورزان در به‌کارگیری روش‌های نوین آبیاری را آموزش داد.
۴. در کنار این اقدامات باید عملیات آبخیزداری، احداث سدهای کوچک و بزرگ، برای مهار رواناب‌ها، مدیریت فاضلاب‌ها و پساب‌ها، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز، حفاظت از عرصه‌های طبیعی، گنجانیدن واحدهای درسی پیرامون مدیریت منابع آب در برنامه درسی دانش‌آموزان را نیز انجام داد.

## منابع و مأخذ

۱. جداری عیوضی، جمشید (۱۳۸۹). ژئومرفولوژی ایران. تهران: انتشارات دانشگاه پیام نور.
۲. حسین‌زاد، زینب، و واعظ‌تهرانی، مهسا (۱۳۸۸). مدل‌سازی راندمان کاربرد شبکه‌های آبیاری با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم. دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، دانشگاه شهید باهنر.
۳. خزانهداری، لیلی، کوهی، منصوره، زابل عباسی، فاطمه، قندهاری، شهزاد، و ملبوس، شراره (۱۳۸۹). بررسی روند خشکسالی در ایران طی ۳۰ سال آینده (۲۰۳۹-۲۰۱۰). مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، دی‌ماه ۱۳۸۹، تهران.
۴. دانش‌کار آراسته، پیمان (۱۳۸۶). تحلیل روند تغییرات زمانی و مکانی بارش و دما در کشور به کمک سنجش‌ازدور و شناسایی نواحی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب، تهران، کمیته ملی آبیاری و زهکشی.
۵. صفوی، حمیدرضا (۱۳۸۵). هیدرولوژی مهندسی. چاپ اول، تهران: انتشارات ارکان.
۶. طایی سمیرمی، مجید، فاتحی مرج، احمد، و میرنیا، سیدخلاق (۱۳۹۱). بررسی اثرات تغذیه مصنوعی بر توزیع زمانی و مکانی خشکسالی‌های هیدروژئولوژیک با استفاده از شاخص حالت پیزومتریک (مطالعه موردی: دشت گربایگان، استان فارس). تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۸، شماره ۱ (پیاپی ۲۳)، ۸۹-۸۶.
۷. علیجانی، بهلول، و بابایی، فینی‌ام‌السلمه (۱۳۹۲). تحلیل فضایی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۵، شماره ۳، صفحات ۱-۱۲.
۸. علیزاده، امین (۱۳۸۶). اصول هیدرولوژی کاربردی. مشهد، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
۹. کردوانی، پرویز (۱۳۸۶). منابع و مسائل آب در ایران. جلد اول، چاپ هشتم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
۱۰. کردوانی، پرویز (۱۳۹۰). مناطق خشک. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

۱۱. ناصری، حمیدرضا، آدینه‌وند، روح‌اله، و صلوی‌تبار، عبدالرحیم (۱۳۹۰). مدل‌سازی پویای سیستم در مدیریت بهره‌برداری آبخوان دشت تبریز. *سی‌امین گردهمایی علوم زمین*، تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۱۲. واعظ‌تهرانی، مهسا، منعم، محمدجواد، و باقری، علی (۱۳۸۹). توسعه یک مدل نوسازی شبکه‌های آبیاری با رویکرد دینامیک سیستم‌ها - مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین. *نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران*، تهران، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

13. Ashok, K., Mishra, V. & Singh, P. (2011). Drought modeling – A review. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 157–175.
14. Gies, L. (2013). *Drought policy development and assessment in East Africa using hydrologic and system dynamics modeling*. Master thesis in civil engineering, Purdue University.
15. Huang, Q. X., He, C. Y., Liu, Z.F., & Shi, P.J. (2014). Modeling the impacts of drying trend scenarios on land systems in northern China using an integrated SD and CA model. *Science China Earth Sciences*, 57(4), 839-854.
16. Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., & Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*. 386(1–4), 13–26.
17. Shi, T., & Gill, R. (2005). Developing effective policies for the sustainable development of ecological agriculture in China: the case study of Jinshan County with a systems dynamics model. *Ecological Economics*, 53, 223-246.
18. Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics – systems thinking and modeling for a complex world*, JDJD Sterman - 2000 - sidalc.net.
19. Wang, H., Li, X., Qiao, Y., & Li, Y. (2011). Development and application of a simulation model for changes in land-use patterns under drought scenarios. *Computers & Geosciences*, 37(7), 831-843.
20. Zhang, K., Pan, Sh., Cao, L., Wang, Y., Zhao, Y., & Zhang, W. (2014). Spatial distribution and temporal trends in recipitation extremes over the Hengduan Mountains region, China, from 1961 to 2012. Available online 16 May 2014, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040618214002742>.