

بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوی توزیع زمانی و مکانی خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o)

شهراد علیزاده*

دانشجوی دکتری جغرافیا (اقلیم‌شناسی) واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

حسین محمدی

استاد اقلیم‌شناسی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، تهران، ایران

پرویز کردوانی

استاد گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۲/۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۹

چکیده

عوامل متعددی در پیدایش خشکسالی مؤثرند، که تغییر و دخالت در آن‌ها به منظور جلوگیری از بروز و وقوع آن‌ها، از توان بشر خارج و غیرممکن است. روی همین اصل، امکان دارد که این شرایط در هر منطقه از سطح کره زمین در کشورهای غنی و فقیر، مرطوب و خشک، پیشرفته و در حال توسعه و غیره اتفاق افتد. در این پژوهش داده‌های هواشناسی جمع‌آوری شده از ۱۹ ایستگاه‌های هواشناسی در طی ۲۰۰۳-۱۹۶۱ ایران و با استفاده از یک شاخص مرکب (CI) از خشکسالی‌های هواشناسی به تجزیه و تحلیل ویژگی‌های زمانی و مکانی خشکسالی در ایران پرداخته شد. فرکانس وقوع، حوزه و شدت خشکسالی هواشناسی محاسبه و برای آشکار ساختن الگوهای وقوع زمانی و مکانی در بخش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند و سپس با رویکرد پویایی سیستم اقدام به شبیه‌سازی اثرات در جنبه‌های مختلف شد. مقادیر ET_o در همه ایستگاه‌ها در ماه ژولای به بیشترین مقدار خود رسیده است. همچنین در تمامی ایستگاه‌ها، مقادیر ET_o از ماه ژانویه تا ژولای افزایش و سپس تا ماه دسامبر کاهش یافته است. متوسط سالانه ET_o در ایران روندی صعودی با ۲/۹ میلی‌متر بر سال (mm/yr) در طول این دوره را نشان داد. بیشترین مقدار ET_o در سال ۱۹۷۰ (۱۳۰۹ mm/yr) و سپس در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۱ (۱۳۰۸ mm/yr) اتفاق افتاده است و کمترین مقدار آن در سال‌های ۱۹۷۹ (۸۹۳ mm/yr) و ۱۹۹۰ (۹۷۴ mm/yr) مشاهده گردید.

واژگان کلیدی: سیستم دینامیک، ET_o، خشکسالی، مدل‌سازی خشکسالی، روش IDW، تغییرات اقلیمی.

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 امکانی آن نیز بسیار نامناسب است. حتی پر باران‌ترین نقاط کشور ما، در فصل تابستان نیاز به آبیاری دارد. قسمت اعظم مملکت خشک و کم آب است. در بسیاری از نقاط آب هست ولی شور و غیرقابل 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 نیمه عمیق موتوری خشک شده و یا در حال نابودی است. از طرف دیگر بر اثر بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی و یا بهتر بگوییم غارت این ذخایر به‌وسیله چاه‌های موتوری، سطح آب زیرزمینی در بسیاری از نقاط به‌شدت پایین رفته است، به‌طوری‌که ادامه این وضع سبب تهی شدن ذخایر آب زیرزمینی و در نتیجه بروز مسائل و مشکلات بسیار خواهد شد (کردوانی، ۱۳۸۶، منابع و مسائل آب در ایران).

هیدرولوژی ست‌ها اغلب با مسائلی همچون پیش‌بینی^۱، تخمین بارش^۲، رواناب^۳، غلظت آلاینده، تراز سطح آب^۴ و تغییرات آبدی^۵ رودخانه‌ها روبه‌رو می‌باشند که در بیشتر این موارد محدودیت تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی، پیچیدگی، غیرخطی و ناشناخته بودن فرآیند موردبررسی، امکان انجام تحلیل‌های دقیق و مطمئن را مشکل می‌سازد. از این‌رو این گروه بایستی با توجه به عوامل طبیعی، اجتماعی و اقتصادی راه‌کارهای مناسب ارائه دهند تا در دوره‌های کوتاه و بلندمدت به رفع نیازهای آبی کشور از نقطه‌نظر کشاورزی، صنعتی، آشامیدنی و حفاظت منابع آب کمک نماید و این امر جز با شناخت دقیق پدیده‌های هیدرولوژیکی محقق نمی‌شود (مرید و همکاران، ۱۳۸۹).

عوامل متعددی در پیدایش خشک‌سالی مؤثرند، که تغییر و دخالت در آن‌ها به‌منظور جلوگیری و وقوع آن‌ها، از توان بشر خارج و غیرممکن است. روی همین اصل، امکان دارد که این شرایط در هر منطقه از سطح کره زمین در کشورهای غنی و فقیر، مرطوب و خشک، پیشرفته و در حال توسعه و غیره اتفاق افتد، با این تفاوت که در کشورهای توسعه‌یافته، خشک‌سالی از لحاظ اقتصادی زیان‌ها و لطماتی را وارد می‌کند، در حالی که حیات را در کشورهای در حال توسعه نیافته مختل می‌سازد و سلامت آن‌ها را نیز تهدید می‌کند (کردوانی، ۱۳۸۶، خشک‌سالی و راه‌های مقابله با آن). از ویژگی‌های این مخاطره (خشک‌سالی)، رخداد مکرر و حرکت آرام آن در مناطق مختلف جهان است که آسیب‌های سنگینی را همراه خواهد داشت. بررسی‌های پژوهشگران دانشگاه کلمبیا (۲۰۰۱) نشان داد که کشورهای آسیای غربی و جنوب‌غربی تا سال ۲۰۰۱ برای سه سال پیاپی با کمبود بارندگی مواجه بوده‌اند. طی این سال‌ها، بیش از ۶۰ میلیون نفر از مردم کشورهای ایران، افغانستان، پاکستان، تاجیکستان، ازبکستان و ترکمنستان پیامدهای این خشک‌سالی ممتد را تجربه کردند. در این

1. Prediction
2. Rainfall Estimation
3. Runoff
4. Water Level
5. Discharge Fluctuations

کشورها، آثار این خشک‌سالی فراگیر بوده و آسیب‌های جبران ناپذیری به بخش‌های کشاورزی، صنعتی، اقتصادی و غیره آن‌ها وارد کرده است.

بحث خشک‌سالی مانند یک بحران، می‌تواند بعضی وقت‌ها برای مقاصد سیاسی با توانایی حکومت در محافظت مقاطع عمومی از دشمن محیط‌زیست، مفید باشد. روش‌های ضروری، بر روش‌های خیلی روشن مانند جیره‌بندی آب کمک مالی و غذایی متمرکز است. روش‌های طولانی مدت، اغلب برافزایش ذخیره آب برای مثال به‌وسیله ساختن مخازن و نگهداری بیشتر آب در مخازن و برآورد پیش‌بینی تقاضا توجه دارد. توجه خیلی کمی به بهبود کیفیت آب مصرفی و تقویت مدیریت تقاضا و همچنین عرضه آب‌شده است. از راه‌های مبنی بر تقاضا توسعه پایدار بیشتر در برابر کاهش آب، روش‌هایی نظیر استفاده مجدد آب در مناطق شهری، عملیات کاربری بهتر زمین‌های کشاورزی و افزایش انتخاب محصولات مقاوم در برابر خشک‌سالی است (محمدی ۱۳۹۱).

تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب موضوعی جدی است که باعث دغدغه خاطر مجریان برنامه در سطح ملی و بین‌المللی شده است. حتی اگر همین امروز انتشار گازهای گلخانه‌ای متوقف شود، افزایش دما تأثیرات وابسته 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 منجر به تغییر در چرخه هیدرولوژیکی شده و شرایط ویژه‌ای را در منابع آب منطقه‌ای ایجاد نماید. تغییرات اقلیمی مبحث پیچیده‌ای است که به‌سادگی نمی‌توان آن را تعریف کرد، وقوع پدیده‌هایی از قبیل افزایش یا کاهش ناگهانی دما، بارندگی و غیره طی یک یا چند سال را می‌توان دلیلی بر تغییر اقلیم آن منطقه دانست. این رویدادها ناشی از تغییرات آب و هوایی در چند دهه بوده است که از مشخصه خاص این پدیده رفتار پیچیده و چند مؤلفه‌ای آن است که تحت تأثیر اجزاء مختلفی از این سامانه قرار می‌گیرد (Huang et al., 2014).

خشک‌سالی یک فاجعه طبیعی است که بر زندگی و سطح رفاه میلیون‌ها نفر از مردم در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. فقدان بارش بازده محصول‌های کشاورزی و دامی و به‌نوبه 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 آن‌یک نگرانی اساسی برای کشور و سیاست‌گذاران است (Lauren, 2013).

پویایی سیستم‌ها یک روش مدل‌سازی مبتنی بر تفکر سیستمی با تأکید بر قیدها و بازخوردها و تأخیرهاست که برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی رفتار مسائل پیچیده و ارزیابی پیامد سیاست‌گذاری‌ها استفاده می‌شود. این رویکرد بر پایه تئوری پویایی غیرخطی، کنترل بازخوردی، و دیدگاه سیستمی است و امکان ساخت مدلی جهان واقعی، به‌منظور درک بهتر فرآیندها، را میسر می‌سازد (Sterman, 2000).

اهمیت و ضرورت انجام پژوهش

در سال‌های اخیر، وقوع خشک‌سالی سبب ایجاد چالش‌های بسیاری در بخش‌های مختلف، به‌ویژه منابع آب و کشاورزی شده است. از این‌رو بررسی روند این بلیه طی سال‌های آتی جهت برنامه‌ریزی صحیح در کشور امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد (خزانه‌داری و همکاران، ۱۳۸۹).

رشد جمعیت و افزایش مصرف سرانه آب از یک‌سو و از طرف دیگر تغییرات اقلیمی افق‌های جدیدی از طرح‌های عمران آبی را در آینده‌ای نه‌چندان دور پیشرو می‌گذارد. فائق آمدن بر بحران‌های آبی و کاهش آثار سوء آن‌ها تنها با مدیریت و برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه از منابع آب و با اتکا به دانش علمی روز عملی است. هرچه زمان می‌گذرد، با گرم شدن هوای کره زمین و همچنین خشک‌سالی‌ها، مسائل مناطق خشک مشکل‌تر و زندگی برای ساکنان این مناطق سخت‌تر می‌شود. برای کاهش آثار خشکی و خشک‌سالی از منابع آب زیرزمینی زیادتر از حد، برداشت‌شده که موجب پایین رفتن شدید سطح آب این منابع با ارزش زیرزمینی گردید و در نتیجه‌ی آن مسائل متعددی به وجود آمده است. نه‌تنها برای جلوگیری از حادثه شدن شرایط بلکه بهتر شدن وضع زندگی ساکنان این مناطق و کشور باید در درجه اول، از عوامل به ظاهر نامساعد طبیعی این مناطق (خشک) مانند آفتاب سوزان، باد زیاد، زمین‌های شور (کوبرها)، توده‌های عظیم ماسه‌ای به ابعاد و شکل‌های مختلف، آب‌های شور و گیاهان شور و قلیایی پسند و غیره باید در جهت بهتر شدن زندگی به‌ویژه اشتغال و ایجاد مناطق و شهرک‌های صنعتی و جلب توریست استفاده کرد (کردوانی، ۱۳۹۰).

پیشینه پژوهش

هرچند در زمینه این موضوع در ایران با این عنوان کاری صورت نگرفته است، اما به‌صورت پراکنده مقاله و نوشته‌هایی در متون انگلیسی و فارسی تا اندازه‌ای مشابه وجود دارد که به آن‌ها اشاره می‌شود.

تکنیک پویایی سیستم بر ای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۵۰ به‌وسیله یک گروه از پژوهشگران به رهبری فورستر در دانشگاه فنی ماساچوست^{۲۴} توسعه داده شد. بر ای اولین بار فورستر مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک روش تصمیم‌گیری بلندمدت در مسائل پویای مدیریت صنعتی از پویایی سیستم استفاده کرد. بعد از آن پویایی سیستم برای مسائل تدوین استراتژی و خط‌مشی‌گذاری در کسب‌وکارهای مختلف به کار گرفته شد. شواهدی بر این موضوع وجود دارد که پویایی سیستم می‌تواند به درک و فهم محیط‌های پیچیده کمک کند (Spector et al., 2001). یکی از اهداف مدل‌سازی سیستم‌های پویا بررسی سیاست‌های 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 and Gill, 2005).

²⁴. MIT

علیجانی و بابایی (۱۳۸۸)، تحلیل فضایی خشک‌سالی‌های کوتاه‌مدت ایران را انجام دادند. در این پژوهش پدیده خشک‌سالی در ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) در بازه‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت و پس از محاسبه فراوانی نسبی خشک‌سالی‌ها در ۷۰ ایستگاه سینوپتیک در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۵ با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ معمولی نقشه‌های پهنه‌بندی آن‌ها در محیط ArcGIS تولید شد. نتایج پژوهش نشان داد که در قسمت‌های شمال غرب، شمال و شمال شرق کشور خشک‌سالی‌ها بسیار شدید است در صورتی که در مناطق مرکز، جنوب و جنوب شرق خشک‌سالی‌ها متوسط و ملایم می‌باشد. به‌طور کلی در بازه‌های کوتاه‌مدت که به‌طور عمده بر روی وضعیت خاک اثر می‌گذارد تمرکز خشک‌سالی‌ها در نیمه شمالی کشور بیشتر بوده است. به‌عبارت‌دیگر اقلیم بارشی کشور در نیمه شمالی متغیرتر از نیمه جنوبی است.

علیجانی و همکاران (۱۳۹۰)، بررسی تغییرات کمینه‌ها و بیشینه‌های سالانه دما در ایران را انجام دادند. در این پژوهش با استفاده از آزمون آماری - گرافیکی من - کندال که یکی از روش‌های پیشنهادی سازمان هواشناسی جهانی برای تحلیل سری‌های زمانی است، روند تغییرات میانگین دمای حداقل و حداکثر سالانه در ایران بررسی می‌شود. برای بررسی این روند و دستیابی به یک الگوی مناسب در این زمینه، داده‌های مربوط به دو متغیر فوق برای ۴۴ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در یک دوره آماری ۴۰ ساله (۲۰۰۸-۱۹۶۹) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که بیشتر گستره ایران، هم شاهد تغییرات در میانگین دماهای حداکثر و هم حداقل بوده است؛ اگرچه این تغییرات در گستره ایران به یک شکل و اندازه نبوده است. ۲۸ ایستگاه در گستره ایران زمین که در غرب، شمال غرب، جنوب غرب، شمال شرق و مرکز ایران بوده‌اند، دارای تغییرات افزایشی در میانگین دماهای حداکثر بوده‌اند که همگی این افزایش‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بوده‌اند. از میان ایستگاه‌های باقیمانده، دو ایستگاه چابهار و تربت‌حیدریه دارای روند کاهشی بوده‌اند و در بقیه ایستگاه‌ها تغییراتی مشاهده نشده است. نوع تغییرات رخ داده نیز همگی از نوع تغییرات ناگهانی و بیشتر در دهه سوم (۱۹۹۸-۱۹۸۹) به وقوع پیوسته است. از ۳۳ ایستگاهی که افزایش در میانگین دماهای حداقل در آن‌ها مشاهده گردیده است، ۱۹ مورد دارای تغییراتی از نوع روند و بقیه از نوع تغییرات ناگهانی بوده است. این تغییرات افزایشی به‌جز در قسمت‌های کوچکی از غرب، جنوب غرب، جنوب و یک ایستگاه در شرق ایران در دیگر قسمت‌های ایران مشاهده گردیده است. دو ایستگاه فسا و شهرکرد نیز دارای روند کاهشی در دماهای حداقل بوده‌اند و در بقیه ایستگاه‌های باقیمانده روندی مشاهده نشده است. از لحاظ زمانی هم بیشترین تغییرات رخ داده در دهه سوم رخ داده است. میانگین حسابی آماره‌های آزمون من - کندال برای دماهای حداکثر ۰/۲۴ و برای میانگین دماهای حداقل ۰/۴ به دست آمد که حاکی از دو برابر بودن تغییرات در میانگین دماهای حداقل در مقایسه با میانگین دماهای حداکثر است.

علیجانی و همکاران (۱۳۹۱)، بررسی روند تغییرات بارش‌های سالانه و فصلی ایران با استفاده از روش نا پارامتری را انجام داده‌اند. یکی از روش‌هایی که می‌توان به کمک آن سیر تحولات بارندگی را در گذشته و حال بررسی کرد، آنالیز

روند سری‌های زمانی در مقیاس‌های مختلف زمانی است. هدف اصلی در این پژوهش بررسی روند سری‌های زمانی بارش در مقیاس‌های فصلی و سالانه ایران زمین با استفاده از روش ناپارامتری برآورد کننده شیب نسبی است. برای بررسی این روند و در جهت دستیابی به یک الگوی مناسب در این زمینه، داده‌های مربوط به بارش ماهانه ۴۴ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک برای یک دوره آماری ۳۳ ساله (۲۰۰۸-۱۹۷۶) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. بر اساس این روش مشاهده گردید که هیچ‌گونه روند معناداری در سطح احتمالاتی ۰/۰۵ در جمع بارش‌های فصل بهار ایران مشاهده نگردیده است و در فصل پاییز نیز تنها ایستگاه سنندج دارای روند کاهشی معنادار بوده است. در فصل تابستان نیز در سه ایستگاه نوزه همدان، سقز و زنجان شاهد روند افزایشی معناداری در سطح احتمالاتی ۰/۰۵ بودند؛ اما بارش فصل زمستان نسبت به دیگر فصول شاهد بیشترین تغییرات در روند بوده است به طوری که ۵ ایستگاه گرگان، کرمان، خوی، سنندج و زنجان در این فصل روند کاهشی معناداری را در سطح احتمالاتی ۰/۰۵ داشته‌اند. روند بارش سالانه نیز حاکی از روند کاهشی معنادار در سطح احتمالاتی ۰/۰۵ درصد در ۱۱ ایستگاه از مجموع ۴۴ ایستگاه مورد مطالعه است. تجمع ایستگاه‌های دارای روند کاهشی در غرب، شمال غرب و شرق ایران می‌تواند نشانه‌هایی از تغییر شرایط بارشی در این قسمت از ایران باشد. از این رو توجه خاص به تغییرات رخ داده در غرب و شمال غرب ایران می‌تواند حائز اهمیت باشد.

کریمی و همکاران (۱۳۹۲)، برخی از روش‌های تعیین الگوی توزیع زمانی بارش جهت برآورد سیلاب را انجام دادند. تغییرات شدت بارندگی در طول زمان پیشروی رگبار، تأثیر به سزایی در شکل هیدروگراف و زمان وقوع دبی پیک سیلاب‌های ناشی از بارش دارد. یکی از ورودی‌های مهم مدل‌های شبیه‌سازی سیلاب‌های ناشی از بارندگی در حوضه‌های شهری، الگوی توزیع زمانی بارش است که در بخش شبیه‌سازی بارش رواناب کاربرد داشته و ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در مجاری آب روی - شهری اعم از روباز و زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. روش‌های متعددی برای تعیین الگوی توزیع زمانی بارش ارائه شده است. در این پژوهش از روش‌های ین وچاو، شیکاگو و بلوک‌های ساختگی استفاده شد. به دلیل درصد زیاد سطوح نفوذ ناپذیر و کوچک بودن حوضه شهری بابلسر، رگبار طرح ۲ ساعته با دوره بازگشت ۱ سال مورد بررسی قرار گرفت. ۹۲۳ رگبار پیوسته از نمودارهای بارندگی بین سال‌های ۳۱۱ تا ۳۳۱ استخراج گردید. رگبارها به ۵ دسته کوچک‌تر از ۱ ساعت، ۱ تا ۲ ساعت، ۱۲ تا ۱۸ ساعت، ۱۸ تا ۲۴ ساعت و بزرگ‌تر از ۲۴ ساعت تفکیک شدند. دسته منحنی‌های شدت مدت فراوانی با استفاده از داده‌های بارندگی ثبت شده محاسبه و ترسیم شدند. زمان اوج‌گیری رگبار در روش ین وچاو محاسبه گردید و از آن به‌جای ضریب پیشروی رگبار (I) در روش شیکاگو استفاده شد. در روش بلوک‌های ساختگی نیز برای تعیین مرکز زمانی رگبار استفاده شد. نتیجه پژوهش حاضر بر این نکته تأکید می‌کند که در صورت وجود داده‌های بارندگی مناسب، روش ین وچاو می‌تواند به‌عنوان روشی مطمئن جهت تعیین زمان وقوع اوج‌گیری رگبار در یک ایستگاه یا منطقه مورد استفاده قرار گیرد. (Mishra and Singh, 2011)، موضوع وضعیت خشک‌سالی در سال‌های اخیر و تقاضای افزایش آب و عوامل تغییرات اقلیمی که در میزان بارش تأثیر دارد را عنوان کردند. بررسی روش‌های مختلف مورد استفاده برای مدل‌سازی خشک‌سالی که شامل پیش‌بینی خشک‌سالی،

مدل سازی بر اساس احتمال، فضا زمانی، تجزیه و تحلیل، استفاده از مدل های جهانی آب و هوا برای وضعیت های خشک سالی و سنجش آثار تغییر اقلیم در طول سه دهه گذشته بوده است را مورد بررسی قرار دادند. (Li et al, 2013)، اکوسیستم های مناطق خشک به ویژه به تنش های محیطی حساس هستند، با استفاده از AEM، به تازگی مدل فرایند فضایی صریح و روشن برای اکوسیستم های مناطق خشک، توسعه یافته است. هدف، بررسی اثرات تغییرات زیست محیطی بر خشک سالی است. در نتیجه آن ها با استفاده از مدل سازی سیستم دینامیکی نشان دادند که بین تغییرات اقلیمی و خشک سالی رابطه دو طرفه ای برقرار است. (Zhang et al, 2014)، توزیع مکانی و زمانی بارش در چین، در سال های ۱۹۶۱-۲۰۱۲ را بررسی کردند. تحلیل توزیع مکانی و زمانی عواملی که باعث بارش شدید بر اساس داده های بارش روزانه ایستگاه های هواشناسی می شود را انجام دادند. روند شاخص بارش از جنوب غربی به شمال شرقی رو به کاهش بود، که این ناشی از تفاوت های منطقه ای و تأثیر توپوگرافی بوده است. علاوه بر این، نتایج رابطه نشان داد که بین بارش و تغییرات اقلیمی رابطه ای وجود دارد؛ و تغییرات اقلیمی در توزیع مکانی و زمانی خشک سالی تأثیر دارند.

داده ها و روش ها

– داده ها

داده های هواشناسی ۱۹ ایستگاه سیتوپتیک که دارای داده های کافی در دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۳ بودند برای تحلیل انتخاب شدند. داده های جمع آوری شده شامل مقادیر روزانه ۶ متغیر هواشناسی دمای بیشینه برحسب درجه سانتی گراد (T_{max})، دمای کمینه برحسب درجه سانتی گراد (T_{min})، رطوبت نسبی حداکثر برحسب درصد (RH_{max})، رطوبت نسبی حداقل برحسب درصد (RH_{min})، سرعت باد برحسب نات و ساعات های آفتابی برحسب ساعت که برای برآورد ET_0 با روش PM استفاده شدند. ایستگاه های هواشناسی با ترمومترهای الکلی و جیوه ای، بادسنج جامی شکل، دستگاه ثبت کننده تابش خورشیدی کمپل^۱ و ترمومتر تر-خشک و دیگر ابزارهای هواشناسی تجهیز شده اند. همه ابزارهای موجود در ایستگاه هواشناسی ایران برای نصب و عملکرد صحیح در طول مشاهدات کنترل می شوند. در جدول ۱، درصد داده های ناقص مربوط به هر ایستگاه آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود در بیشتر ایستگاه ها این مقدار کمتر از ۲/۵ درصد می باشد و فقط در ایستگاه آبادان به حدود ۱۸ درصد رسیده است. در ایستگاه آبادان، بیشتر داده های ناقص مربوط به سال های ۱۹۹۳-۱۹۸۸ می باشد که در این سال ها جنگ ایران و عراق اتفاق افتاده است.

^۱. Campbell

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه (نگارنده)

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	درصد داده‌های ناقص	نوع اقلیم بر مبنای دمارتن
آبادان	۴۸° ۱۵' E	۳۰° ۲۳' N	۶/۶	۱۸/۰۹	خشک
اهواز	۴۸° ۴۰' E	۳۱° ۲۰' N	۲۲/۵	۲/۴۳	خشک
اصفهان	۵۱° ۴۰' E	۳۲° ۳۷' N	۱۵۵۰/۴۰	۱/۷۰	خشک
بیرجند	۵۹° ۱۳' E	۳۲° ۵۳' 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° ۵' E	۳۷° ۳۲' N	۱۳۱۵/۹	۲/۱۷	نیمه‌خشک
تبریز	۴۶° ۱۷' E	۳۸° ۵' N	۱۳۶۱	۱/۲۶	نیمه‌خشک
خرم‌آباد	۴۸° ۱۷' E	۳۳° ۲۶' N	۱۱۴۷/۸	۰/۸۸	نیمه‌خشک
شیراز	۵۲° ۳۶' E	۲۹° ۳۲' N	۱۴۸۴/۰۰	۰/۳۷	نیمه‌خشک
کرمانشاه	۴۷° ۹' E	۳۴° ۲۱' N	۱۳۱۸/۶	۲/۰۵	نیمه‌خشک
مشهد	۵۹° ۳۸' E	۳۶° ۱۶' N	۹۹۹/۲	۱/۲۴	نیمه‌خشک
همدان	۴۸° ۳۲' E	۳۴° ۵۲' N	۱۷۴۱/۵۰	۰/۲۲	نیمه‌خشک
بابلسر	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

- روش‌ها

پژوهش حاضر برحسب روش، توصیفی - پیمایشی و نوع پژوهش بر مبنای هدف، کاربردی است و همچنین از نوع تحلیلی - ریاضی که با تلفیق مطالعات کتابخانه‌ای با به‌کارگیری رویکردهای تغییرات اقلیمی و رویکرد سیستم‌های دینامیکی است و با توسعه مدل علی و معلولی و دیاگرام نمودار جریان، اقدام به تحلیل مؤلفه‌های مؤثر بر الگوی تغییرات خشک‌سالی شد. در این پژوهش داده‌های هواشناسی جمع‌آوری شده از ۱۹ ایستگاه‌های هواشناسی در طی ۲۰۰۳-۱۹۶۱ ایران و با استفاده از یک شاخص مرکب (CI) از خشک‌سالی‌های هواشناسی به تجزیه و تحلیل ویژگی‌های زمانی و مکانی خشک‌سالی در ایران پرداخته شد. فرکانس وقوع، حوزه و شدت خشک‌سالی هواشناسی محاسبه و برای آشکار ساختن الگوهای وقوع زمانی و مکانی در بخش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند و سپس با رویکرد پویایی سیستم اقدام به شبیه‌سازی آثار در جنبه‌های مختلف گردید.

بحث

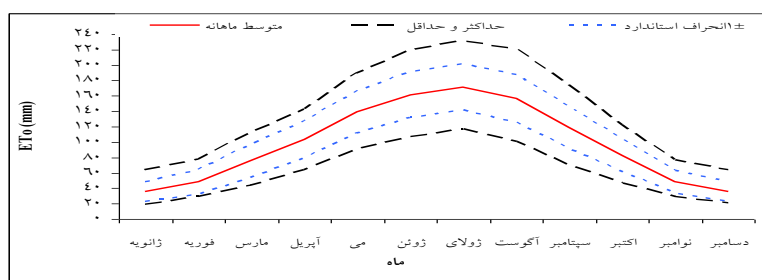
توزیع مکانی تبخیر و تعرق (ET_0) متوسط سالانه و ماهانه

بر اساس روش‌های استاندارد موجود برای محاسبه نیاز آبی در طرح‌های آب به‌جای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل مفهوم دیگری به نام تبخیر-تعرق گیاه مرجع به کار می‌رود که با علامت اختصاری (ET_0) نشان داده می‌شود. اصطلاح گیاه مرجع که ابتدا توسط پنمن و سپس پرویت (Pruitt) و همکاران وی در هنگام تهیه دستورالعمل معروف به FAO-24 برای تخمین نیاز آبی گیاهان به‌کاربرده شده به‌صورت زیر تعریف شده است. «تبخیر و تعرق از یک سطح فرضی پوشیده شده‌ی کامل از چمن کوتاه به ارتفاع ۸ تا ۱۰ سانتی‌متر که وسعت آن بسیار زیاد باشد و بدون آن که دارای آفت‌های یا بیماری باشد در وضعیتی که در محدودیت آبی از نظر مصرف قرار نداشته باشد، فعالانه رشد داشته باشد» گرچه ابتدا فقط گیاه مرجع چمن تعریف شده بود اما سپس فرمول‌های دیگری با توجه به گیاه مرجع یونجه (روش پنمن - رایب) یا گیاه مرجع فرضی (روش پنمن-مونیتیت) نیز برای محاسبه ET_0 ارائه گردید. در حال حاضر حداقل ۲۰ روش عمده برای محاسبه ET_0 وجود دارد که بر اساس مقایسه نتایج حاصله از آن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از دستگاه‌های لایسی متر وزنی دقیق در ۱۱ نوع شرایط آب‌وهوایی مختلف در سطح دنیا برخی از آن‌ها از نظر مطابقت با مقادیر واقعی در اولویت قرار دارند. در بررسی مقایسه‌ای روش موسوم به فائو - پنمن - مونیتیت چه در شرایط آب‌وهوایی خشک و چه در شرایط آب‌وهوایی مرطوب در ردیف اول قرار دارد. (علیزاده، ۱۳۸۶).

در جدول (۲) مقادیر متوسط ماهانه و سالانه ET_0 برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه داده شده است. همان‌طور که از جدول مشخص است، مقادیر ET_0 در همه ایستگاه‌ها در ماه ژولای به بیشترین مقدار خود رسیده است. همچنین در تمامی ایستگاه‌ها، مقادیر ET_0 از ماه ژانویه تا ژولای افزایش و سپس تا ماه دسامبر کاهش یافته است. بیشترین مقادیر ET_0 متوسط ماهانه در ایستگاه‌های آبادان و اهواز در ماه ژولای و به ترتیب برابر با ۲۳۲/۱۸ و ۲۱۴/۱۶ میلی‌متر اتفاق افتاده است که در طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن جزو اقلیم‌های خشک قرار گرفته‌اند. در تمامی ایستگاه‌ها کمترین مقادیر ET_0 در ماه‌های ژانویه و دسامبر اتفاق افتاده است و از بین تمامی ایستگاه‌ها، ارومیه دارای کمترین مقدار ET_0 ماهانه و برابر با ۱۹/۰۲ میلی‌متر در ماه ژانویه می‌باشد. در شکل (۱) تغییرات ET_0 متوسط ماهانه در دوره ۲۰۰۳-۱۹۶۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌گردد، مقادیر ET_0 از آوریل تا سپتامبر بیشتر از ۹۰ میلی‌متر می‌باشند و در ماه ژولی 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 (از آوریل تا سپتامبر) حدود ۷۲/۳ درصد از ET_0 سالانه اتفاق می‌افتد و تنها ۲۷/۷ درصد ET_0 در ماه‌های سرد سال اتفاق می‌افتد

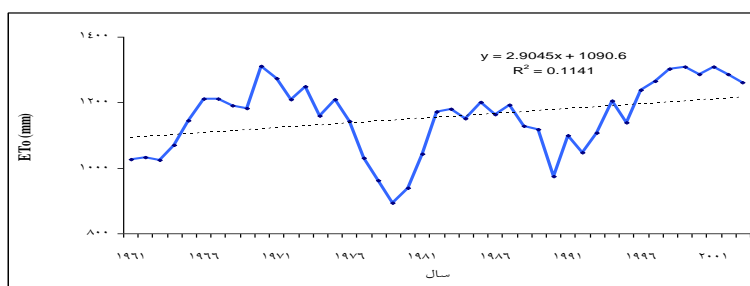
جدول ۲: مقادیر متوسط ماهانه و سالانه ETo برای همه ایستگاه‌ها در دوره ۲۰۰۳ تا ۱۹۶۱

سالانه	ماهانه												ایستگاه
	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	ژولای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	
۱۶۷۵/۶۱	۵۴/۶۳	۷۷/۲۲	۱۲۲/۱۳	۱۷۳/۹۲	۲۲۰/۸۲	۲۳۲/۱۸	۲۲۰/۲۹	۱۸۹/۸۶	۱۴۳/۰۸	۱۱۲/۲۴	۷۴/۴۲	۵۴/۸۳	آبادان
۱۵۳۷/۱۹	۴۶/۲۰	۵۴/۶۷	۱۱۰/۴۹	۱۶۰/۲۴	۲۰۴/۱۰	۲۱۴/۱۶	۲۱۰/۸۵	۱۷۸/۵۳	۱۳۴/۶۱	۱۰۱/۲۸	۶۳/۰۸	۴۶/۱۰	اهواز
۱۱۸۳/۵۳	۳۳/۵۸	۴۶/۱۹	۸۱/۲۰	۱۱۵/۰۵	۱۵۳/۲۷	۱۶۹/۶۰	۱۵۹/۷۳	۱۴۱/۵۶	۱۰۹/۴۸	۸۴/۶۷	۵۳/۶۰	۳۵/۵۹	اصفهان
۱۲۷۷/۲۸	۴۳/۳۴	۵۷/۸۲	۹۱/۸۵	۱۲۴/۴۴	۱۶۴/۱۶	۱۷۹/۹۳	۱۶۹/۱۲	۱۴۹/۱۵	۱۱۳/۴۹	۸۵/۶۶	۵۵/۷۹	۴۲/۶۲	بیرجند
۱۱۹۳/۵۳	۳۰/۸۵	۴۵/۲۷	۸۱/۱۵	۱۱۹/۲۷	۱۵۷/۴۷	۱۷۸/۲۳	۱۷۱/۶۴	۱۴۶/۲۵	۱۰۸/۶۶	۷۶/۵۰	۴۶/۷۴	۳۱/۵۱	تهران
۱۴۲۹/۸۹	۶۳/۹۹	۷۲/۰۳	۱۰۲/۵۴	۱۳۱/۹۷	۱۶۴/۸۹	۱۷۹/۱۵	۱۷۲/۶۰	۱۵۹/۹۷	۱۳۲/۱۴	۱۰۸/۷۸	۷۷/۹۰	۶۳/۹۲	زاهدان
۱۱۷۶/۳۰	۴۶/۰۱	۵۹/۶۳	۹۷/۸۴	۱۳۲/۴۴	۱۶۹/۰۱	۱۷۶/۷۲	۱۶۸/۱۸	۱۵۷/۲۰	۱۲۳/۰۷	۹۵/۰۱	۶۴/۸۴	۴۶/۰۹	کرمان
۱۲۵۵/۰۵	۴۸/۷۷	۵۸/۴۶	۸۹/۶۹	۱۱۹/۲۰	۱۵۵/۳۴	۱۶۷/۷۴	۱۵۷/۵۸	۱۴۵/۰۳	۱۱۵/۲۶	۸۸/۳۷	۶۱/۴۰	۴۸/۲۰	یزد
۹۶۵/۰۳	۲۱	۳۲/۳۲	۶۲/۹۴	۱۰۲/۵۳	۱۳۹/۰۵	۱۵۴/۸۷	۱۴۴/۶۵	۱۱۸/۵۱	۸۴/۵۹	۵۵/۰۸	۲۹/۴۷	۱۹/۰۲	ارومیه
۱۱۲۳/۶۷	۲۳/۸۶	۳۶/۸۱	۷۲/۹۲	۱۲۰/۷۴	۱۷۲/۳۱	۱۸۷/۳۲	۱۶۴/۷۷	۱۳۲/۷۹	۹۳/۷۱	۶۲/۳۸	۳۳/۲۷	۲۲/۸۰	تبریز
۱۱۱۳/۳۲	۳۳/۰۴	۴۷/۳۶	۸۳/۷۰	۱۱۸/۵۹	۱۴۸/۵۳	۱۵۶/۵۸	۱۴۸/۸۹	۱۲۹/۶۷	۹۶/۴۱	۷۲/۰۱	۴۵/۷۴	۳۲/۷۸	خرم‌آباد
۱۳۹۵/۲۲	۴۸	۶۵/۴۶	۱۰۷/۵۴	۱۳۸/۱۱	۱۷۰/۷۵	۱۸۳/۸۱	۱۷۸/۲۶	۱۶۶/۲۵	۱۲۵/۰۷	۹۷/۱۷	۶۶/۳۷	۴۸/۴۲	شیراز
۱۲۵۹/۳۸	۳۳/۳۴	۴۹/۴۵	۹۱/۹۱	۱۳۳/۹۲	۱۷۶/۲۸	۱۸۹/۰۵	۱۷۷/۸۵	۱۴۶/۸۵	۱۰۶/۴۸	۷۷/۱۳	۴۵/۳۹	۳۱/۷۳	کرمانشاه
۹۶۵/۰۳	۲۵/۶۲	۳۸/۷۰	۷۵/۳۶	۱۲۱/۳۸	۱۶۸/۵۳	۱۹۰/۵۹	۱۷۷/۸۶	۱۴۴/۷۰	۱۰۱/۷۱	۶۷/۲۶	۳۸/۵۸	۲۶	مشهد
۱۲۱۴/۱۰	۲۸/۳۶	۴۵/۱۷	۸۷/۵۲	۱۳۲/۳۹	۱۷۹/۳۶	۱۹۳/۴۳	۱۷۵/۵۰	۱۳۸/۹۲	۱۰۴/۰۲	۶۹/۷۷	۳۴/۸۱	۲۴/۸۵	همدان
۸۶۶/۲۵	۲۲/۲۶	۳۲/۱۶	۵۶/۹۳	۸۵/۰۱	۱۱۷/۵۳	۱۳۳/۹۲	۱۲۷/۰۳	۱۰۷/۸۷	۷۵/۲۹	۵۰/۹۴	۳۲/۸۴	۲۴/۴۷	بابلسر
۸۴۴/۸۴	۲۴/۳۰	۳۳/۸۹	۵۳/۲۹	۸۱/۲۲	۱۱۸/۵۸	۱۳۸/۲۸	۱۲۷/۰۲	۱۰۱/۶۴	۶۸/۲۶	۴۴/۲۸	۲۹/۶۷	۲۴/۴۱	انزلی
۷۵۹/۳۸	۲۳/۳۰	۳۱/۲۰	۵۱/۱۸	۷۳/۰۲	۱۰۲/۸۵	۱۱۷/۰۸	۱۰۷/۴۶	۹۰/۳۱	۶۴/۰۸	۴۳/۷۳	۳۰/۶۶	۲۴/۵۱	رامسر
۷۶۲/۱۰	۲۴/۷۳	۲۹/۴۸	۴۶/۵۱	۷۰/۴۴	۱۰۰/۶۱	۱۱۷/۰۶	۱۱۰/۲۶	۹۲/۷۷	۶۷/۸۷	۴۵/۴۰	۳۱/۴۳	۲۵/۵۳	رشت

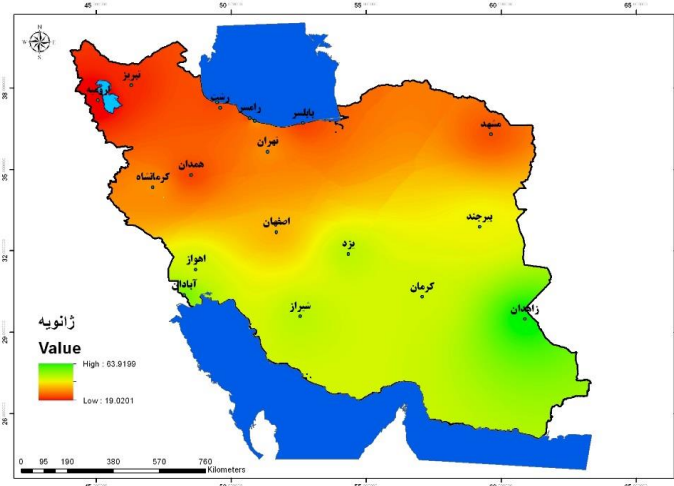


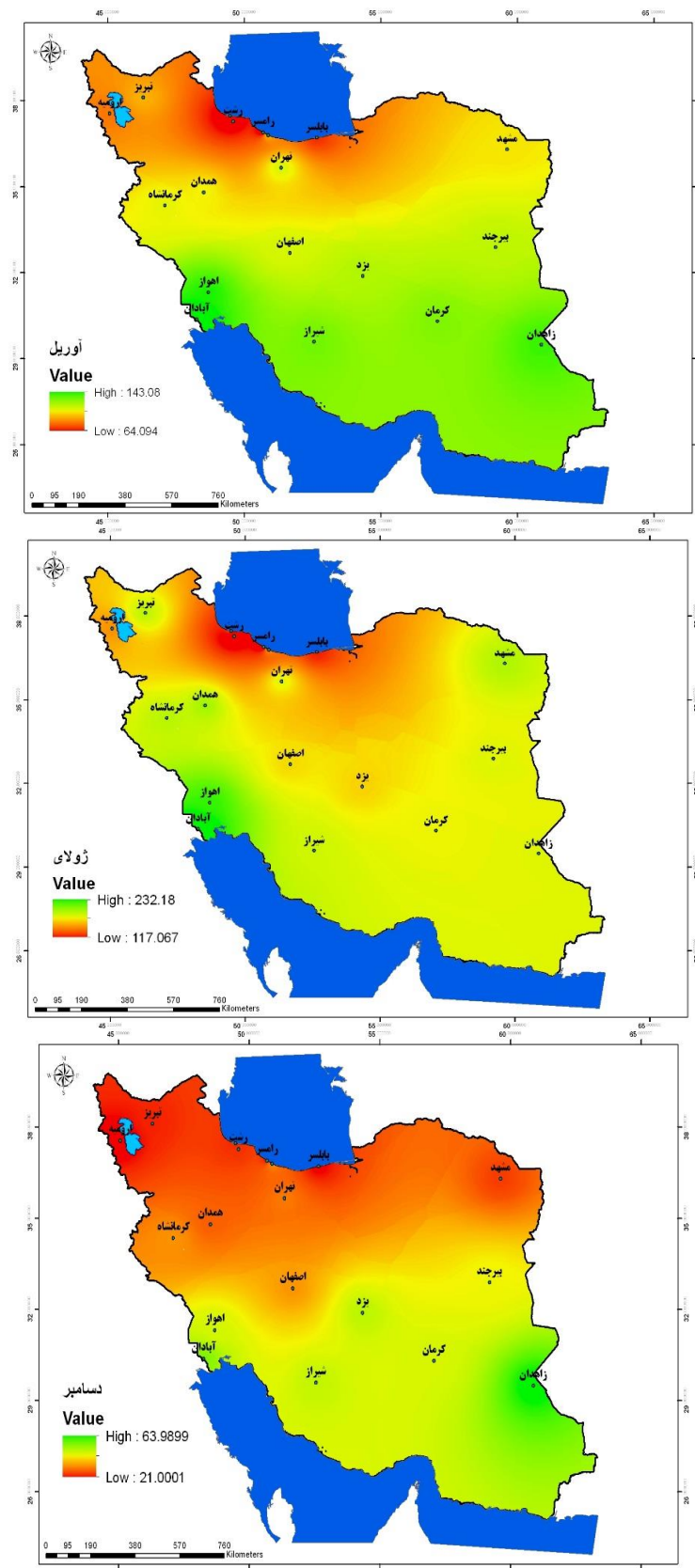
شکل ۱: نمودار مقادیر ETo ماهانه (۱۹۶۱-۲۰۰۳)، (سیفی، اکرم؛ ریاحی مدوار، حسین)

متوسط سالانه کل ET_0 ایران در دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۳ حدود ۱۱۵۴ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، متوسط سالانه ET_0 در ایران روندی صعودی با ۲/۹ میلی‌متر بر سال (mm/yr) در طول این دوره نشان می‌دهد. بر اساس این شکل بیشترین مقدار ET_0 در سال ۱۹۷۰ ($1309 mm/yr$) و سپس در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۱ ($1308 mm/yr$) اتفاق افتاده است و کمترین مقدار آن در سال‌های ۱۹۷۹ ($893 mm/yr$) و ۱۹۹۰ (mm/yr) (۹۷۴) مشاهده گردید در شکل (۳) توزیع مکانی میانگین ET_0 ماهانه در دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۳ با روش IDW برای ایران ترسیم گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییر رنگ از ماه ژانویه تا ژوئیه به سمت افزایش ET_0 و از ماه ژوئیه تا دسامبر دوباره به سمت کاهش ET_0 همراه می‌باشد. بیشترین میزان تبخیر در ماه ژوئیه با دامنه‌ای از ۱۱۷ تا ۲۳۲ میلی‌متر می‌باشد. در این ماه بیشترین میزان ET_0 در قسمت‌های شمال شرقی و غربی ایران و کمترین آن در قسمت‌های شمالی اتفاق 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، ژوئیه و آگوست رخ داده است. در تمامی ماه‌ها، بیشترین میزان ET_0 مربوط به قسمت‌های جنوب شرقی و جنوبی و کمترین آن مربوط به قسمت‌های شمالی و مرکزی کشور می‌باشد.



شکل ۲: نمودار سری زمانی ET_0 سالانه ایران (سیفی، اکرم، ریاحی مدوار، حسین)





شکل ۳: نقشه توزیع مکانی ET سالانه (میلی‌متر) در ایران بر اساس روش IDW (نگارنده)

جدول ۳: توزیع مکانی ET_o ماهانه (میلی متر) در ایران بر اساس روش IDW

ماه‌های سال	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه
حداقل مقدار ET _o	۴۴,۳۴	۶۴,۰۹	۹۰,۳۲	۱۰۷,۴۷	۱۱۷,۰۶	۱۰۰,۶۱	۷۰,۴۴	۴۶,۵۱	۲۹,۴۸	۲۱,۰۰	۱۹,۰۲	۲۹,۴۸
حداکثر مقدار ET _o	۱۱۲,۲۱	۱۴۳,۰۸	۱۸۹,۸۶	۲۲۰,۲۹	۲۳۲,۲۱	۲۲۰,۸۲	۱۷۳,۹۲	۱۲۲,۱۳	۷۷,۲۱	۶۳,۹۸	۶۳,۹۱	۷۷,۹

منبع: نگارنده

در جدول (۴) نتایج مقادیر آماره Z حاصل از روش من-کنندال در تعیین روندهای ET_o ماهانه در دو سطح معنی‌داری ۹۵ و ۹۹ درصد آورده شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد، مقادیر ET_o ماهانه دارای روندهای افزایشی و کاهش می‌باشند؛ اما بیشتر روندها در ایستگاه‌های مورد مطالعه مثبت یا افزایشی می‌باشند. بیشترین روندهای مثبت معنی‌دار در سطح ۹۵٪ در ایستگاه‌هایی با اقلیم نیمه‌خشک اتفاق می‌افتد. به‌طوری‌که ایستگاه‌های ارومیه، خرم‌آباد، مشهد و همدان به ترتیب در ۹، ۱۰، ۹ و ۷ ماه از سال دارای روند مثبت و ایستگاه شیراز دارای سه ماه روند منفی می‌باشد. در این اقلیم ایستگاه خرم‌آباد از ماه ژانویه تا اکتبر دارای روند مثبت است و بیشترین روند مثبت با ۶/۰۸ میلی‌متر در ماه ژوئیه در این ایستگاه اتفاق افتاده است. در اقلیم خشک، ایستگاه یزد در هشت ماه از سال دارای روند مثبت معنی‌دار و آبادان دارای سه ماه روند منفی معنی‌دار می‌باشد. بیشترین روند منفی معنی‌دار در ایستگاه بیرجند و در ماه اکتبر با ۳/۱۲- میلی‌متر اتفاق افتاده است. در اقلیم مرطوب نیز رامسر و رشت به ترتیب دارای ۸ و ۹ ماه روند مثبت معنی‌دار می‌باشند. به‌طوری‌که این روند در ایستگاه رامسر از ماه مارس تا نوامبر و در ایستگاه رشت از فوریه تا اکتبر است.

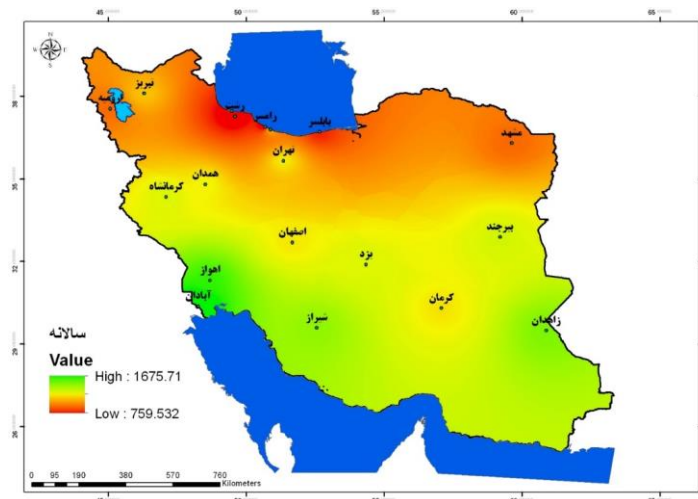
جدول ۴: مقادیر شیب رگرسیون خطی روندهای ET_o ماهانه

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
آبادان	-۰/۶۵ ^{ab}	-۰/۴۷	-۰/۹۸ ^a	-۰/۶۳	-۰/۷۹	-۰/۸۲	-۰/۲۰	-۰/۱۲	-۰/۳۹	-۰/۳ ^a	-۰/۷۱ ^a	-۰/۷۴ ^{ab}
اهواز	۰/۱۶	۰/۶۱ ^{ab}	۰/۲۱	۰/۷۳ ^{ab}	۰/۳۲	۱/۰۹ ^a	۱/۴۶ ^a	۱/۱۹ ^a	۰/۳۸	-۰/۱۶	۰/۲۰	-۰/۱۳
اصفهان	-۰/۱۱	-۰/۱۵	-۰/۵۷ ^{ab}	-۰/۰۱	-۰/۰۸	۰/۳۱	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۰۱	-۰/۱۶	-۰/۱۶ ^a
بیرجند	-۰/۰۲	۰/۱۷ ^a	-۰/۰۱	۰/۳۷ ^{ab}	۰/۷۰ ^{ab}	۰/۶۸ ^a	۰/۹۳ ^{ab}	۰/۸۰ ^{ab}	۰/۴۲	-۰/۱۶	-۰/۱۹	-۰/۱۸
تهران	-۰/۱۱	-۰/۰۵	-۰/۱۸	۰/۲۳ ^a	۰/۱۳	-۰/۳۶	-۰/۲۸	۰/۴۳ ^a	۰/۱۶	-۰/۰۸	۱/۶ ^{ab}	۰/۳۳ ^{ab}
زاهدان	۰/۱۰	۰/۰۹	-۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۵۶ ^{ab}	۰/۱۸	-۰/۰۲	-۰/۰۹	۰/۰۲	-۰/۰۲
کرمان	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۶۰ ^a	۰/۵۹	۰/۴۹	۱/۰۸ ^{ab}	۰/۹۳ ^{ab}	۰/۴۱ ^a	-۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۱۱
یزد	-۰/۰۹	۰/۲۰	۰/۳۴ ^a	۰/۵۳ ^{ab}	۱/۱۱ ^{ab}	۱/۴۶ ^{ab}	۱/۲۱ ^{ab}	۱/۲۱ ^{ab}	۱/۲۱ ^{ab}	۰/۸۹ ^{ab}	۰/۵۱ ^{ab}	۰/۰۱
ارومیه	۰/۱۳ ^a	۰/۴۳ ^{ab}	۰/۴۴ ^{ab}	۰/۸۱ ^{ab}	۱/۱۹ ^{ab}	۱/۱۰ ^a	۱/۳۰ ^{ab}	۰/۹۱ ^a	۰/۵۹ ^{ab}	۰/۲۴ ^a	-۰/۰۱	-۰/۱۱
تبریز	۰/۰۷	۰/۲۳ ^{ab}	۰/۰۹	۰/۳۳ ^{ab}	۰/۲۰	۰/۰۴	-۰/۰۹	-۰/۰۳	-۰/۱۳	۰/۰۷	-۰/۰۴	-۰/۰۸
خرم‌آباد	۰/۰۸	۰/۲۴ ^a	۰/۳۱ ^a	۰/۷۳ ^{ab}	۱/۱۹ ^{ab}	۲/۱۱ ^{ab}	۲/۳۷ ^{ab}	۱/۹۰ ^{ab}	۱/۰۹ ^{ab}	۰/۶۰ ^{ab}	۰/۰۱	-۰/۱۲
شیراز	-۰/۱۳	-۰/۱۲	-۰/۳۳ ^a	-۰/۱۳	-۰/۱۲	-۰/۰۲	-۰/۱۰	-۰/۰۳	-۰/۱۵	-۰/۵۹ ^{ab}	۰/۳۱ ^{ab}	-۰/۱۸ ^a

--													
-۰/۱۷	-۰/۲۵	-۰/۴۵ ^a	-۰/۲۹	-۰/۰۰	-۰/۱۳	-۰/۲۷	-۰/۷۴ ^a	-۰/۶۰ ^a	-۰/۱۹	-۰/۲۹ ^a	-۰/۱۹	کرمانشاه	
-۰/۱۴ ^a	-۰/۱۹ ^a	-۰/۳۰ ^a	-۰/۳۳ ^a	-۰/۵۳ ^{ab}	-۰/۴۹ ^a	-۰/۳۳ ^a	-۰/۰۸	-۰/۱۲۲	-۰/۰۶	-۰/۱۴	-۰/۱۰	مشهد	
-۰/۰۴	-۰/۱۰	-۰/۴۴ ^{ab}	-۰/۸۹ ^{ab}	۱/۲۸ ^{ab}	۱/۳۰ ^{ab}	۱/۱۸ ^{ab}	-۰/۹۳ ^{ab}	-۰/۶۳ ^{ab}	-۰/۱۸	-۰/۱۹	-۰/۰۹	همدان	
-۰/۰۴	-۰/۰۸	-۰/۱۹ ^a	-۰/۲۲	-۰/۳۳	-۰/۱۳	-۰/۱۷	-۰/۰۶	-۰/۳۰ ^a	-۰/۱۴	-۰/۰۹	-۰/۰۹ ^a	بابلسر	
-۰/۰۶	-۰/۱۵	-۰/۱۶	-۰/۰۳	-۰/۰۸	-۰/۰۷	-۰/۰۲	-۰/۰۶	-۰/۱۸	-۰/۰۴	-۰/۰۸	-۰/۰۶	انزلی	
-۰/۱۰ ^a	۱/۱۵ ^{ab}	-۰/۴۱ ^{ab}	-۰/۴۲ ^a	-۰/۵۸ ^a	-۰/۴۹	-۰/۴۸	-۰/۳۰	-۰/۳۵ ^{ab}	-۰/۲۲ ^{ab}	-۰/۱۷ ^{ab}	-۰/۰۹	رامسر	
-۰/۰۹	-۰/۰۷	-۰/۳۷ ^{ab}	-۰/۵۶ ^{ab}	۱/۰۶ ^{ab}	۱/۳۵ ^{ab}	۱/۲۳ ^{ab}	-۰/۹۱ ^{ab}	-۰/۵۹ ^{ab}	-۰/۲۹ ^{ab}	-۰/۳۳ ^{ab}	-۰/۰۲	رشت	

منبع: نگارنده

a معناداری در سطح ۹۵٪ ($\alpha_{0.05} = 1.682$) و b معناداری در سطح ۹۹٪ ($\alpha_{0.01} = 2.417$) با توجه به مقادیر T در شکل ۴ شیب خط رگرسیونی سالانه (میلی‌متر بر سال) در ایران بر اساس روش IDW آورده شده است. این نقشه با استفاده از روش میانگین‌گیری از نقشه‌های ماهانه تولیدشده با روش IDW در نرم‌افزار ArcGIS تولید شد.

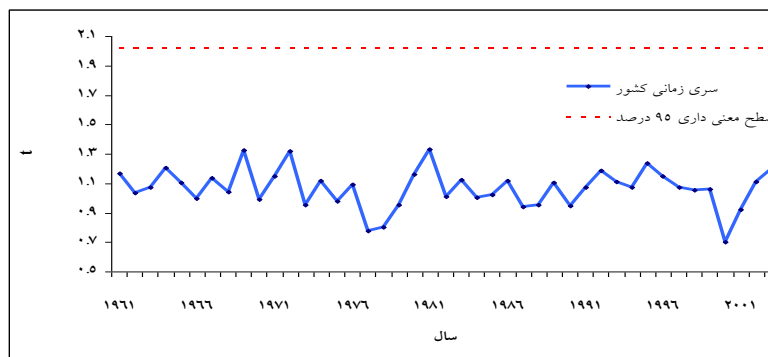


شکل ۴: توزیع مکانی شیب خط رگرسیونی سالانه (میلی‌متر) در ایران بر اساس روش IDW- (نگارنده)

تغییرات ناگهانی سری‌های ET₀ سالانه در ایران

شکل ۵ مقادیر t تست متحرک ETO در طول دوره ۲۰۰۳-۱۹۶۱ در ایران را نشان می‌دهد. در این مطالعه از دنباله‌های ۵ ساله برای مطالعه تغییرات ناگهانی استفاده شد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، هیچ‌گونه تغییر ناگهانی در طول دوره مورد مطالعه در ایران مشاهده نگردید به طوری که خط مربوط به مقادیر T زیرخط معناداری در سطح ۹۵٪ قرار گرفته است و هیچ‌گونه تقاطعی با خط معناداری ندارد. محل تقاطع نمودار سری زمانی با خط معناداری، زمان (سال) تغییر ناگهانی ETO در ایستگاه مربوطه می‌باشد که زمان آن‌ها در جدول ۵ آورده شده است. ایستگاه‌های اصفهان و کرمان در اقلیم خشک قرار دارند که دارای یک تغییر ناگهانی می‌باشند و سه ایستگاه دیگر یعنی خرم‌آباد، شیراز و

کرمانشاه واقع در اقلیم نیمه خشک می‌باشند که ایستگاه‌های شیراز و کرمانشاه هر کدام یک تغییر ناگهانی در دوره ۴۳ ساله دارند ولی ایستگاه خرم‌آباد سه تغییر ناگهانی با فواصل هشت و ده‌ساله دارد.



شکل ۵: نمودار T تست متحرک از داده‌های ET₀ سالانه در طول دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۳ در کشور ایران

جدول ۵: ایستگاه‌های دارای تغییرات ناگهانی در ET₀ سالانه در دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۳

ایستگاه	سال تغییرات ناگهانی در ET ₀ سالانه
اصفهان	۱۹۹۴
خرم‌آباد	۱۹۶۱، ۱۹۶۹، ۱۹۷۹
شیراز	۱۹۸۱
کرمان	۱۹۶۴
کرمانشاه	۱۹۶۲

بررسی تغییرات مکانی ET₀ نشان داد که این تغییرات به عرض جغرافیایی، ویژگی‌های توپوگرافیکی و دور و نزدیکی به مبادی ورود توده‌های جوی به کشور بستگی دارد. برای بررسی وجود یا عدم حدوث تغییرات اقلیمی در سطح کشور از آزمون Mann-Kendal که قدرتمندترین آزمون‌ها در این زمینه است بهره گرفته شد. نقشه نشان‌دهنده روند نزولی بارش و مقادیر مثبت حاکی از روند صعودی بارش ماهانه است. بدین معنی که نواحی شمال و شمال‌غرب و جنوب و جنوب‌شرق کاهش بارندگی ماهانه را تجربه می‌نمایند و در سایر نواحی کشور روند صعودی بارش ماهانه مشاهده می‌شود. البته باید به این نکته توجه کرد که اولاً در شکل (۶) سطح معنی‌داری این روندها مشخص نیست و ثانیاً صعودی یا نزولی بودن روند تغییرات به کمیت بارش دریافتی در سطح ارتباطی ندارد. بدین معنی که با وجود صعودی بودن روند تغییرات بارش در نواحی مرکزی کشور با توجه به میزان باران محدود دریافتی در این نواحی، مقدار قابل توجهی به بارش افزوده نشده است.

نتیجه‌گیری

تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژی ناحیه خشک برای فرمول‌بندی یک برنامه‌ریزی آبیاری مؤثر، آماده کردن داده‌های ورودی برای مدل‌های هیدرولوژیکی مطالعات تعادل آب و فهم تأثیر تغییرات اقلیمی گذشته بر فرآیندهای هیدرولوژیکی است. از این رو، اطلاع در مورد خصوصیات زمانی و مکانی روندهای ET_o نقش حیاتی را در مطالعات هیدرولوژیکی و اکولوژیکی بازی می‌کند. در مطالعه حاضر به بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی ماهانه و سالانه ET_o محاسبه‌شده به وسیله معادله فائو-پنمن-مانتیت (FAO56-PM) در دوره ۲۰۰۳-۱۹۶۱ پرداخته شد. همچنین تغییرات ناگهانی ET_o ایستگاه‌ها و کل ایران و دوره‌های موجود در ET_o بررسی گردید. بدین منظور از آمار و اطلاعات ۱۹ ایستگاه سینوپتیک ثبت‌شده در سازمان هواشناسی کشور استفاده گردید که نتایج زیر از آن استخراج شد:

- در تمامی ایستگاه‌ها، مقادیر ET_o 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_o 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 جزو اقلیم‌های خشک قرار گرفت. در تمامی ایستگاه‌ها کمترین مقادیر ET_o در ماه‌های ژانویه و دسامبر اتفاق افتاد و از بین تمامی ایستگاه‌ها، ارومیه دارای کمترین مقدار ET_o ماهانه و برابر با ۱۹/۰۲ میلی‌متر در ماه ژانویه بود. متوسط سالانه کل ET_o 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. بر اساس نمودار تجمعی بی‌ترتیب ET_o سالانه، شش فاز (سه فاز صعودی و سه فاز نزولی) متفاوت در ET_o سالانه تشخیص داده شد که روند ET_o سالانه در طول سال‌های ۱۹۶۳-۱۹۶۱، ۱۹۸۱-۱۹۷۵ و ۱۹۹۳-۱۹۸۷ نزولی و در سال‌های ۱۹۷۵-۱۹۶۵، ۱۹۸۷-۱۹۸۱ و ۲۰۰۳-۱۹۹۳ روندی صعودی بود.

- بر اساس نقشه توزیع مکانی متوسط ماهانه ET_o، بیشترین میزان تبخیر در ماه ژوئیه با دامنه‌ای از ۱۱۷ تا ۲۳۲/۱۸ میلی‌متر بود. در این ماه بیشترین میزان ET_o 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_o اتفاق افتاد و در این ماه‌ها، ET_o روند همگن‌تری را نسبت به سایر ماه‌ها داشت. بر اساس نقشه توزیع مکانی ET_o سالانه، مقادیر ET_o در این نقشه دامنه‌ای از ۷۵۹ تا ۱۶۷۵ میلی‌متر در سال دارند که کمترین میزان آن در قسمت‌های شمالی و بیشترین مقدار ET_o در قسمت‌های جنوب، جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی اتفاق افتاده است.

- بیشتر روندها در ایستگاه‌های مورد مطالعه مثبت یا افزایشی بودند و بیشترین روندهای مثبت معنی‌دار در سطح ۹۵٪ در ایستگاه‌هایی با اقلیم نیمه‌خشک اتفاق افتاد. بیشترین روند مثبت با ۶/۰۸ میلی‌متر در ماه ژوئیه در ایستگاه خرم‌آباد و بیشترین روند منفی معنی‌دار در ایستگاه بیرجند و در ماه اکتبر با ۳/۱۲- میلی‌متر اتفاق افتاد. از ماه‌های آوریل تا اکتبر بیش از ۴۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای روند مثبت با روش من-کندال بودند و بیشترین روند منفی ایستگاه‌ها در ماه مارس اتفاق افتاد. بیشترین شیب افزایشی Sen's در ایستگاه خرم‌آباد با ۲/۳۹ میلی‌متر در ماه ژوئن و بیشترین شیب کاهش‌ی در

ایستگاه آبادن با ۰/۵۳- میلی متر در ماه دسامبر اتفاق افتاد. بیشترین روند با شیب افزایشی در ماه‌های ژولای و آگوست به ترتیب با ۴۲/۱۱ و ۶۳/۱۶ درصد ایستگاه‌ها و بیشترین روند با شیب کاهشی در ماه مارس با ۱۵/۷۹ درصد ایستگاه‌ها بود. بر اساس روش رگرسیون، بیشترین شیب افزایشی در ایستگاه خرم‌آباد با ۲/۳۷ میلی متر در ماه ژوئن و بیشترین شیب کاهشی در ایستگاه آبادن با ۰/۹۸- میلی متر در ماه مارس بود. در ایستگاه انزلی، هیچ کدام از روش‌های بررسی روند به کار گرفته شده، روند معناداری را نشان ندادند. بیشترین روند با شیب افزایشی در ماه‌های ژولای، آگوست و آوریل به ترتیب با ۵۲/۶۳، ۵۷/۸۹ و ۶۸/۴۲ درصد ایستگاه‌ها و بیشترین روند با شیب کاهشی در ماه دسامبر با ۲۱/۰۵ درصد ایستگاه‌ها اتفاق افتاده است.

- نتایج آنالیز T تست متحرک نشان داد که هیچ‌گونه تغییر ناگهانی در طول دوره مورد مطالعه در ایران مشاهده نشد اما ایستگاه‌های اصفهان و کرمان که در اقلیم خشک قرار دارند دارای یک تغییر ناگهانی بودند و سه ایستگاه دیگر یعنی خرم‌آباد، شیراز و کرمانشاه واقع در اقلیم نیمه‌خشک می‌باشند که ایستگاه‌های شیراز و کرمانشاه هر کدام یک تغییر ناگهانی در دوره ۴۳ ساله داشتند ولی ایستگاه خرم‌آباد سه تغییر ناگهانی با فواصل هشت و ده‌ساله داشت.

- نتایج مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌های عصبی شعاعی برای خشک‌سالی‌های ایستگاه‌های کشور با استفاده از سه متغیر مستقل دما، رطوبت نسبی و کمبود اشباع نشان داد که استفاده از این روش می‌تواند رویکرد مناسبی برای پیش‌بینی شاخص خشک‌سالی در اکثر ایستگاه‌های کشور باشد. با توجه به اینکه روش شبکه‌های عصبی شعاعی روشی مناسب برای تحلیل سیستم‌هایی با رفتار غیرخطی است می‌تواند عملکرد خوبی در قبال پدیده‌هایی که در طول زمان رفتارشان دچار تغییر می‌شود داشته باشد.

منابع

- ۱- خزانه داری، لیلی. کوهی منصوره. زابل عباسی، فاطمه. قندهاری، شهزاد. ملبوس، شراه، بررسی روند خشک‌سالی در ایران طی ۳۰ سال آینده (۲۰۱۰-۳۰۳۹) - دی‌ماه (۱۳۸۹): مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران
- ۲- دانش کار 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.
- ۳- سیفی، اکرم. ریاحی مدوار، حسین (۱۳۹۵): بررسی تغییرات ناگهانی والگوی تغییرات دوره‌های تبخیر و تعرق مرجع ایران با تحلیل موجک و آزمون t متحرک. نشریه دانش آب‌و خاک جلد ۲۶ شماره ۳/۱ صص. ۲۱۰-۱۹۹ سال ۹۵.
- ۴- علیجانی، بهلول. بابایی، فینی‌ام السلمه. (۱۳۸۸): تحلیل فضایی خشک‌سالی‌های کوتاه‌مدت ایران. جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره ۱، شماره پیش‌شماره؛ از صفحه ۱۰۹ تا ص ۱۲۱.
- ۵- علیجانی، بهلول. محمودی، پیمان. چوگان عبدالجبار، بیشه. نیاسر، مرتضی. (۱۳۹۰): بررسی ساختار تداوم دو وضعیتی بارش‌های سالانه جنوب ایران با استفاده از مدل وضعیت نهان زنجیره مارکوف، دوره ۹، شماره پیاپی ۲۵؛ از صص ۱ - ۱۶.

- ۶- علیجانی، بهلول. روشنی، احمد. پرک، فاطمه. حیدری، روح اله. (۱۳۹۱): روند تغییرپذیری فرین‌های دما با استفاده از شاخص‌های تغییر اقلیم در ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱، شماره ۲: از صص ۱۷ - ۲۸.
- ۷- علیزاده، امین. (۱۳۸۶): اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
- ۸- کردوانی، پرویز. (۱۳۸۶): خشک‌سالی و راه‌های مقابله با آن در ایران. انتشارات دانشگاه تهران.
- ۹- کردوانی، پرویز. (۱۳۸۶): منابع و مسائل آب در ایران، (جلد اول). انتشارات دانشگاه تهران.
- ۱۰- کردوانی، پرویز. (۱۳۹۰): مناطق خشک. انتشارات دانشگاه تهران.
- ۱۱- کریمی، ولی اله. سلیمانی، کریم. حبیب نژاد روشن محمود. شاهدی، کاکا. (۱۳۹۲): مقایسه برخی روش‌های تعیین الگوی توزیع زمانی بارش جهت برآورد سیلاب‌های شهری، مطالعه موردی بابلسر، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال چهارم، شماره سیزدهم-پاییز (۱۳۹۲).
- ۱۲- محمدی، حسین. (۱۳۹۱): مخاطرات جوی. تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۱۳- مرید، س. مقدسی، م. (۱۳۸۹): مروری بر معرف‌ها و محرک‌ها و نحوه تدوین آن‌ها برای طرح‌های خشک‌سالی. مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال ششم، شماره یک: ۷۲-۷۶.

- 14- Chaofan Li, Chi Zhang, GepingLuo, Xi Chen. (2013): Modeling The Carbon Dynamics Of The Dryland Ecosystems In Xinjiang, China From 1981 To 2007—The Spatiotemporal Patterns And Climate Controls. Ecological Modelling. Volume 267, 10 October (2013): Pages 148–157
- 15- Gies, Lauren, M.S., Purdue University, August (2013): Drought Policy Development And Assessment In East Africa Using Hydrologic And System Dynamics Modeling.
- 16- Huang, QingXu, ET. al. "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 (2014): 839-854.
- 17- Kexin Zhang, Shaoming Pan, Ligu Cao, Yun Wang, Yifei Zhao, Wei Zhang. (2014): Spatial Distribution and Temporal Trends In Recipitation Extremes Over The Hengduan Mountains Region, China, From 1961 To 2012. Available Online 16 May 2014.
- 18- Mishra ,A. K., and Singh ,V. P. (2011): Drought Modeling: A Review, J Hydrology ,(In Press
- 19- Shi T., Gill R. (2005): Developing Effective Policies For The Sustainabledevelopment Of Ecological Agriculture In China: The Case Study Of Jinshan Countywith a Systems Dynamics Model. Ecological Economics. 53. 223-246.
- 20- Sterman, J. D. (2000): Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling For a Complex World.