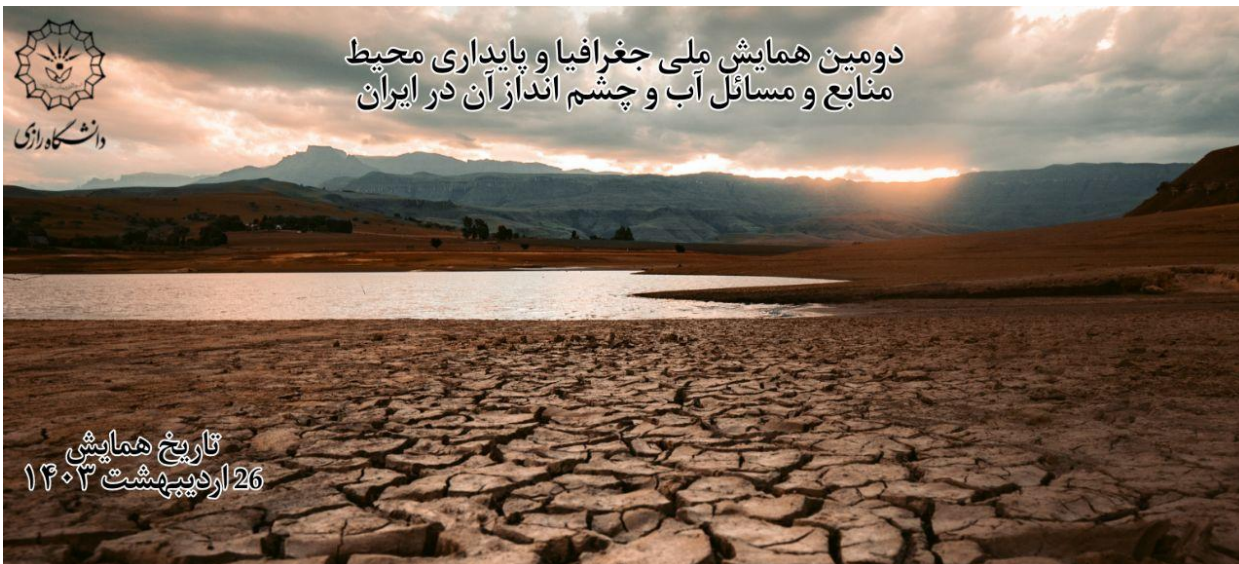




تحلیل روند تغییرات بلندمدت تمایل به خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص مدیریت خشکسالی (DMI)

پیمان محمودی^{۱*}

۱-دانشیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان،

ایمیل: p_mahmoudi@gep.usb.ac.ir.

چکیده

هدف اصلی این مطالعه بررسی روند تغییرات بلندمدت تمایل به خشکسالی ها در ایران می باشد. برای رسیدن به این هدف ابتدا اطمینان پذیری، انعطاف پذیری و آسیب پذیری (RRV) بر اساس داده های رطوبت خاک برای یک دوره ۶۴ ساله (۱۹۵۵-۲۰۱۸) برآورد و با برازش کاپولای گوسی به منظور به دست آوردن توزیع احتمالاتی توأم بین اطمینان پذیری-انعطاف پذیری، شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) برای ایران محاسبه شدند. بر اساس این شاخص مشاهده شد که مقادیر شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) همواره و به طور مداوم برای نیمه جنوبی و نیمه شرقی ایران بالا و برای نیمه غربی و نیمه شمالی آن پایین تر است. برای آشکارسازی روند تغییرات بلندمدت تمایل به خشکسالی ها در نیز از مدل رگرسیون امکانی فازی استفاده شد. شیب خط روند مقادیر شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) با استفاده از رگرسیون امکانی فازی نشان داد که بیشتر مساحت ایران در شمال، شمال شرق، شمال غرب، غرب، جنوب غرب و جنوب دارای شیب خط روند بسیار ملایمی بین ۰/۰۰۰۵ تا -۰/۰۰۰۵- در هر ۵ سال هستند. اما شرق، جنوب شرق و مرکز ایران شرایط بسیار متفاوت تری را نسبت به دیگر قسمت های ایران نشان می دهند؛ به طوریکه حدود ۲۹/۱ درصد از مساحت ایران در این مناطق دارای روند افزایشی در تمایل به خشکسالی با شیب روند تغییرات بیش از ۰/۰۰۰۵ در هر ۵ سال می باشند. روندهای کاهشی نیز به صورت پراکنده و به صورت لکه هایی مجزا از همدیگر در این مناطق مشاهده می شوند. مجموع مساحت این لکه ها که دارای روند کاهشی در تمایل به خشکسالی با شیب روند تغییرات کمتر از -۰/۰۰۰۵- در هر ۵ سال هستند نزدیک به ۵/۶ درصد می باشد.

کلمات کلیدی: اطمینان پذیری، انعطاف پذیری، آسیب پذیری، روند، رطوبت خاک



۱- مقدمه

کشور ایران با بارشی در حدود یک سوم بارش جهانی در یکی از مناطق خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته است و خشکی جزء فطرت و صفت اصلی اقلیم آن به شمار می آید (واقفی و همکاران، ۲۰۱۹). در سال های اخیر بنا به عللی که غالباً مربوط به تغییرات جهانی اقلیم هستند، ناهنجاری های بارش در نواحی مختلف ایران فزونی یافته است (فتحیان و همکاران، ۲۰۲۰؛ محمودی و ریگی چاهی، ۲۰۱۹؛ منصوری دانشور و همکاران، ۲۰۱۹؛ دانشمند و محمودی، ۲۰۱۷؛ بالینگ و همکاران، ۲۰۱۶) و نوسان های شدید مکانی و زمانی خشکسالی، خسارات هنگفتی را بر اقتصاد کشور ایران به ویژه در طی دهه های اخیر تحمیل کرده است (سبحانی و همکاران، ۲۰۱۱).

مطالعات مختلفی روند تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی ها را در ایران مورد توجه قرار داده اند (مرادی و همکاران، ۲۰۰۷؛ زارع ابیانه و همکاران، ۲۰۱۱؛ ملکی نژاد و سلیمانی، ۲۰۱۲؛ کشاورز و همکاران، ۲۰۱۳). محمودی و همکاران (۲۰۱۹) نشان داده اند که روند تغییرات شدت خشکسالی های ایران از فصلی به فصل دیگر و از یک مقیاس زمانی به یک مقیاس زمانی دیگر بسیار متفاوت بوده اند. در فصل پاییز روند تغییرات شدت خشکسالی های ایران، به استثنای نوار جنوبی دریای خزر و جنوب شرق، روند افزایشی و در دو فصل زمستان و بهار روند کاهشی داشته اند. به عبارت دیگر در فصل پاییز بر شدت خشکسالی ایران افزوده شده است و در دو فصل زمستان و بهار از شدت آنها کاسته شده است. در مقیاس سالانه نیز روند تغییرات شدت خشکسالی ها حاکی از یک روند کاهشی برای بیشتر مساحت ایران بوده است.

با بررسی منابع موجود مشاهده شد که اکثر مطالعاتی که روند تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی ها را مورد توجه قرار داده اند از شاخص های مربوط به پایش خشکسالی های هواشناسی و در چند مطالعه محدود نیز از شاخص های مربوط به خشکسالی های هیدرولوژیکی بهره برده اند. اما در این مطالعه، تلاش بر این است که روند تغییرات ویژگی های بلندمدت خشکسالی های ایران را که ممکن است به دلیل تغییرات آب و هوایی به آرامی رخ دهند (مثلاً یک بازه زمانی ده ساله) را کمی سازی نماید. در این زمینه، از شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) (مایتی و همکاران، ۲۰۱۳) که به دنبال کمی کردن ویژگی های بلندمدت خشکسالی ها می باشد و ابزاری بسیار کارآمد برای مدیران و سیاست گذاران حوزه مدیریت منابع آب است استفاده می شود (مایتی و همکاران، ۲۰۱۳).

هاشیموتو و همکاران (۱۹۸۲) نشان دادند که اطمینان پذیری، انعطاف پذیری و آسیب پذیری (RRV) سیستم های مخازن آبی که مهمترین پارامترهای تعیین شده برای ارزیابی عملکرد مخازن آبی هستند ممکن است به طور مؤثری برای تحلیل سیستم های منابع آبی نیز مورد استفاده قرار گیرند. بر فرض اینکه، کاهش رطوبت خاک در یک ستون عمودی از خاک مشابه با عملکرد یک مخزن ذخیره آب باشد، شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) با استفاده از منطق RRV توسط مایتی و همکاران (۲۰۱۳) ارائه شد. بنابراین، شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) یک شاخص خشکسالی احتمالاتی برای توصیف خشکسالی هاست که بسیار متفاوت تر از دیگر شاخص های خشکسالی ها می باشد، چونکه آن



آمادگی سیستم را جهت برگشت از شرایط خشکسالی به شرایط ترسالی را در نظر می گیرد، عاملی که تا به امروز در تدوین برنامه های مدیریت و کاهش خسارات ناشی از خشکسالی ها در نظر گرفته نشده اند. چاندا و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از این شاخص تغییرات زمان-فضایی تمایل به خشکسالی های بلندمدت را در هندوستان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار این محققین نشان داد در مناطق شمال و شمال شرقی هندوستان تمایل به خشکسالی پایین اما در قسمت غربی آن این تمایل نسبتاً بالا است. در یک تحلیل جهانی چاندا و مایتی (۲۰۱۷) روند تمایل به خشکسالی را تا انتهای قرن بیست و یکم با استفاده از شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) مورد بررسی و نشان دادند که روند افزایشی قابل توجهی در تمایل به خشکسالی در قسمت های وسیعی از قاره آفریقا، آمریکای جنوبی و آسیا و یک روند کاهشی کاملاً مشخص در قسمت های شمالی اروپا و آمریکای شمالی قابل مشاهده است.

لذا در این مطالعه قصد بر این است که ابتدا سری های زمانی بلندمدت شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) برای یک بازه زمانی ۶۴ ساله (۱۹۵۵-۲۰۱۸) برای ایران محاسبه و سپس مورد تحلیل روند فازی قرار گیرند تا بر اساس آن بتوان تغییرات بلندمدت تمایل به خشکسالی در ایران شناسایی شوند.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد

برای بررسی روند تغییرات بلند مدت تمایل به خشکسالی در ایران از شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) استفاده شده است. برای محاسبه این شاخص مقادیر ماهانه شبکه بندی شده رطوبت خاک (۵/۰ در ۵/۰ درجه و برحسب میلی متر) از مرکز پیش بینی های اقلیمی (CPC)، نوآ، به آدرس اینترنتی (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cpcsoil.html>) برای یک بازه زمانی ۶۴ ساله از سال ۱۹۵۵ تا سال ۲۰۱۸ دانلود شدند (فن و ون دین دول، ۲۰۰۴). مجموع تعداد نقاط شبکه ای استخراج شده از این پایگاه داده ای برای چهارچوب مرزهای سیاسی ایران، ۶۲۲ نقطه شبکه ای شد.

تعیین یک آستانه عددی برای تفکیک دوره های تر و خشک از یکدیگر یکی از چالش های مهم در استفاده از شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) در پایش تمایل بلندمدت خشکسالی ها در یک منطقه می باشد. برای تعیین این آستانه چاندا و همکاران (۲۰۱۳) مقدار عددی نقطه پژمردگی دائمی (PWP) را پیشنهاد داده اند. مقدار عددی نقطه پژمردگی دائمی (PWP) حداقل مقدار رطوبت خاک مورد نیاز برای گیاهان جهت جلوگیری از پژمردگی آنان است (تایز و زیگر، ۱۹۹۱). اگر رطوبت خاک به زیر این آستانه عددی نزول پیدا کند، گیاهان دیگر نمی توانند از مرحله پژمردگی شان خارج و در نهایت از بین می روند. مقدار این آستانه در شرایط مزرعه برای هر نوع خاک مقدار ثابتی نیست و توسط ترکیبی از شرایط گیاه، خاک و جو تعیین می شود (رائو، ۱۹۹۷)، مقادیر عددی نقطه پژمردگی دائمی (PWP) برای چهارچوب مرزهای سیاسی ایران از پایگاه داده ای جهانی نیمرخ خاک با قدرت تفکیک فضایی بالا برای کاربردهای مدلسازی محصول به آدرس اینترنتی <https://dataverse.harvard.edu> اخذ شدند. در این پایگاه داده ای، برای هر نقطه شبکه ای، نقطه پژمردگی دائمی (PWP) برای شش لایه ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متری از سطح خاک



برآورد شده است (هان و همکاران، ۲۰۱۹). در این مطالعه از میانگین وزنی این شش لایه به عنوان آستانه نقطه پژمردگی دائمی (PWP) استفاده شده است.

۲-۲- روش ها

روش‌شناسی ارائه شده در این پژوهش به طور کلی شامل دو بخش مجزا و در عین حال مرتبط با یکدیگر هستند. در بخش اول، مراحل محاسبه شاخص خشکسالی مبتنی بر رطوبت خاک توضیح داده خواهد شد که شامل سه مرحله (۱) محاسبه اطمینان‌پذیری، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری (RRV) از روی داده‌های شبکه‌بندی شده ماهانه رطوبت خاک، (۲) به دست آوردن توزیع احتمالاتی توأم بین سه اندازه اطمینان‌پذیری-انعطاف‌پذیری-آسیب‌پذیری (RRV و ۳) محاسبه شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) مبتنی بر کاپولا‌ی منتخب به عنوان اندازه‌ای از ویژگی‌های بلندمدت خشکسالی‌ها در منطقه مورد مطالعه است. در بخش دوم نیز برای بررسی روند تغییرات بلند مدت تمایل به خشکسالی در ایران از مدل رگرسیون فازی امکانی استفاده شده است که در ادامه به تفکیک هر بخش توضیحاتی کاملی ارائه خواهد شد.

۲-۲-۱- محاسبه شاخص خشکسالی مبتنی بر رطوبت خاک

۲-۲-۱-۱- محاسبه اطمینان‌پذیری-انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری (RRV)

اطمینان‌پذیری، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری (RRV) سه سنجه مهم عملکرد هر سیستم هستند. مفهوم RRV در زمینه سیستم‌های منابع آب برای اولین بار توسط هاشیموتو و همکاران (۱۹۸۲) ارائه و با موفقیت برای تحلیل سیستم‌های مخازن آبی به کار گرفته شده‌اند. هنگامی که یک سیستم مخزن آبی، تقاضایی را که برای آن هدف خاص طراحی شده است را برآورده می‌کند، گفته می‌شود که سیستم در وضعیت رضایت‌بخش قرار دارد، در غیر این صورت گفته می‌شود که سیستم در حالت عدم موفقیت قرار گرفته است. مبانی محاسباتی این سه سنجه به طور کامل در منبع محمودی و همکاران (۲۰۲۱) آورده شده است.

در مورد رطوبت خاک، زمانی که مقدار آن زیر مقدار PWP قرار می‌گیرد، حیات گیاه تحت تنش قرار گرفته و گفته می‌شود که "عدم موفقیت" رخ داده است دقیقاً مشابه با عدم موفقیت در سیستم‌های مخازن آبی. بنابراین با در نظر گرفتن PWP به عنوان یک آستانه، اندازه‌های RRV می‌توانند برای سری‌های رطوبت خاک محاسبه شوند. برای به دست آوردن یک برآورد پایدار و منطقی، مایتی و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که یک مقیاس زمانی ۵ ساله می‌تواند بسیار مناسب باشد. بنابراین، سری‌های زمانی ماهانه رطوبت خاک به پنجره‌های متحرک ۵ ساله تقسیم و یک سری از برآوردهای RRV از روی سری‌های زمانی ماهانه رطوبت خاک ۶۴ ساله به دست آورده می‌شود.

۲-۲-۱-۲- توزیع احتمال توأم اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری با استفاده از کاپولا



در این مرحله، توزیع احتمال توأم بین اطمینان پذیری-آسیب پذیری و انعطاف پذیری-آسیب پذیری توسعه داده می شود. کاپولاها به عنوان بهترین انتخاب برای مدلسازی توزیع های توأم بین حاشیه هایی با وابستگی استفاده می شوند. بیشتر کاپولاها برای مدلسازی توزیع توأم متغیرهای تصادفی همبسته شده به صورت مثبت مناسب هستند، در حالیکه برخی از آنها می توانند برای متغیرهای همبسته شده به صورت منفی نیز به کار گرفته شوند. در این مطالعه سه کاپولای کلایتون، گوسی و گامبل مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۱-۲-۲- محاسبه شاخص مدیریت خشکسالی (DMI)

یک مسئله مهم در طراحی شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) درازای مقیاس زمانی در نظر گرفته شده است. به منظور دستیابی به یک شاخص پایدار و همچنین یافتن بهترین تفکیک زمانی ممکن جهت ارزیابی تغییرات بلند مدت ویژگی های خشکسالی ها، هدف انتخاب حداقل درازای بلوک های زمانی ممکن است که از یک برآورد پایدار قابل قبول این شاخص می تواند به دست آورده شود. در یک مطالعه متقدم تر (مایتی و همکاران، ۲۰۱۳)، یک تحلیل حساسیت جهت بررسی اثرات احتمالی درازای بلوک های زمانی بر روی محاسبه شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) انجام شده است. بلوک های زمانی ۲ تا ۱۰ سال به صورت جداگانه برای محاسبه اندازه های میانی (یعنی RRV) و سپس محاسبه شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) برای پنج سری مختلف رطوبت خاک از طیف وسیعی از انواع اقلیم ها در نظر گرفته شدند. تغییرات شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) در مقیاس های زمانی ۲، ۳ و حتی ۴ ساله دارای نوسانات بسیار قابل توجهی هستند در حالیکه مقادیر این شاخص در مقیاس های زمانی بیشتر از ۵ سال ثبات بیشتری را نشان می دهند. از این رو، در این مطالعه از بلوک های زمانی ۵ ساله استفاده شده است.

شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) (مایتی و همکاران، ۲۰۱۳) به گونه ای طراحی شده است که با افزایش آسیب پذیری و کاهش اطمینان پذیری (انعطاف پذیری) افزایش پیدا می کند و بالعکس. شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) احتمال توأم تجاوز اطمینان پذیری (انعطاف پذیری) و عدم تجاوز آسیب پذیری یک سری از رطوبت خاک با استفاده از مقدار PWP مناسب است. بدین معنا که

$$DMI_t^{loc} = P[R > r_t^{loc}, V \leq v_t^{loc}] \quad (1)$$

که $P[\otimes]$ احتمال وقع رخداد $[\otimes]$ است. r_t^{loc} و v_t^{loc} به ترتیب مقادیر اطمینان پذیری (انعطاف پذیری) و آسیب پذیری کاهش یافته برای مکان جغرافیایی مورد نظر، loc ، و برای دوره زمانی ۵ ساله انتخاب شده، t ، است. دامنه تغییرات شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) به عنوان یک اندازه احتمالاتی، بین ۰-۱ است، مقادیر بالاتر، تمایل بیشتر به خشکسالی و مقادیر پایین تر تمایل بیشتر به ترسالی را نشان می دهد. در طی دوره های متوالی پنجره های متحرک ۵ ساله، مقادیر شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) را می توان برای به دست آوردن سری هایی که تغییرات زمانی را نشان می دهند استفاده نمود. به همین ترتیب، در مکان های مختلف (ترجیحاً شبکه بندی شده) چنین سری هایی را می توان برای به دست آوردن تغییرات زمانی-فضایی شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) محاسبه نمود.



۲-۲-۲- رگرسیون مکانی فازی

مدل‌های رگرسیون مکانی فازی اولین بار توسط تاناکا و همکاران در سال ۱۹۸۲ ارائه شد. این مدل بهترین معادله رگرسیون را با کمینه کردن میزان فازی بودن بدست می‌دهد و این کار با کمینه کردن مجموع کل پهنای توابع عضویت ضرائب فازی انجام می‌شود. یکی از مدل‌های رگرسیون فازی مکانی مدلی است که در آن ضرائب، فازی و ورودی و خروجی مشاهده‌ای، غیر فازی است. این مدل در حالت کلی با معادله (۲) بیان می‌شود.

$$\tilde{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x_1 + \tilde{A}_2 x_2 + \Lambda + \tilde{A}_n x_n \quad (2)$$

ضرائب معادله فوق یعنی $\tilde{A}_0, \tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$ اعداد فازی و متغیرهای ورودی مشاهده‌ای یعنی $x_1, x_2, \dots, x_n$ اعداد معمولی هستند. با توجه به معادله (۱۳) برای هر n متغیر ورودی (در اینجا یک ورودی)، یک عدد فازی مانند $\tilde{Y}$ بعنوان خروجی بدست می‌آید.

۳- نتایج و بحث

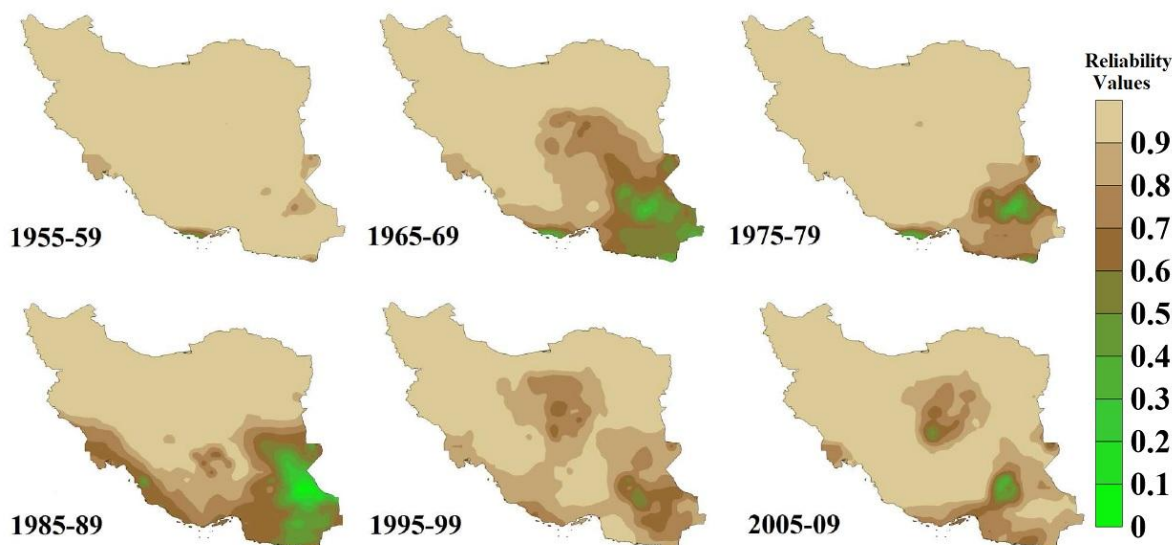
۳-۱- تغییرات زمانی و فضایی اطمینان پذیری، انعطاف پذیری و آسیب پذیری (RRV) در ایران

بعد از تهیه سری‌های زمانی رطوبت خاک برای تمامی نقاط شبکه‌ای موجود در داخل مرزهای سیاسی ایران، اقدام به تقسیم آنها به پنجره‌های متحرک زمانی ۵ ساله گردید. در مجموع تعداد ۶۰ بلوک از پنجره‌های متحرک ۵ ساله (۲۰۱۴-۲۰۱۸، ۲۰۱۳-۲۰۱۷، ۱۹۶۰-۱۹۵۶، ۱۹۵۵-۱۹۵۹) برای هر کدام از سری‌های زمانی رطوبت خاک به دست آمد.

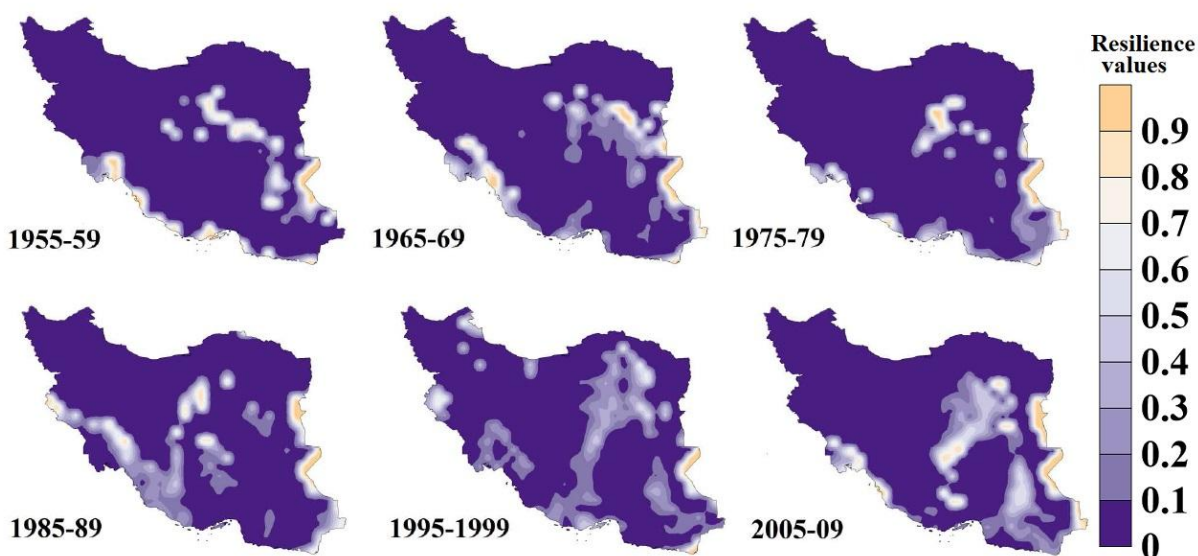
سپس بر اساس آستانه PWP برای هر کدام از این پنجره‌های متحرک ۵ ساله، به ترتیب مقادیر اطمینان‌پذیری، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری محاسبه و سری‌های زمانی آنها تهیه شدند. بر اساس سری‌های زمانی به دست آمده برای هر کدام از پنجره‌های متحرک ۵ ساله نقشه‌های منحنی میزان مربوط به اطمینان‌پذیری، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری آنها ترسیم گردیدند. مجموع نقشه‌های منحنی میزانی که در این مرحله تهیه شده‌اند به ۱۸۰ نقشه (۶۰ نقشه برای اطمینان‌پذیری، ۶۰ نقشه برای انعطاف‌پذیری و ۶۰ نقشه برای آسیب‌پذیری) رسیدند. برای نمونه از هر ۶۰ نقشه، ۶ نقشه با فاصله زمانی ۱۰ سال برای مشاهده تغییرات زمانی-فضایی مقادیر هر کدام از مؤلفه‌های اطمینان‌پذیری، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری در شکل‌های ۱ تا ۳ آورده شده‌اند. همانگونه که در شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده است در بیشتر نقشه‌های تهیه شده برای اطمینان‌پذیری و انعطاف‌پذیری، قسمت‌های شمالی ایران، مقادیر بیشتر و قسمت‌های جنوبی آن مقادیر کمتری را به خود اختصاص داده‌اند. مقادیر بالاتر حاکی از اطمینان‌پذیری و انعطاف‌پذیری بیشتر و مقادیر پایین‌تر نیز نشان دهنده اطمینان‌پذیری و انعطاف‌پذیری کمتری هستند. هر زمان مقادیر رطوبت خاک در طول یک دوره ۵ ساله حتی برای یکبار به زیر آستانه تعیین شده نزول پیدا نکند، آنگاه اطمینان‌پذیری و انعطاف‌پذیری برای آن دوره برابر با ۱ خواهد بود در غیر اینصورت اطمینان‌پذیری و انعطاف‌پذیری مقادیری پایین‌تر از ۱ را به خود اختصاص خواهند داد. تغییرات زمانی-فضایی مقادیر آسیب‌پذیری نیز الگوهای زمانی و فضایی تقریباً یکسانی با اطمینان‌پذیری و انعطاف‌پذیری نشان می‌دهند. بخش‌های وسیعی از نیمه شمالی ایران دارای آسیب‌پذیری کمتر (کمتر از ۴



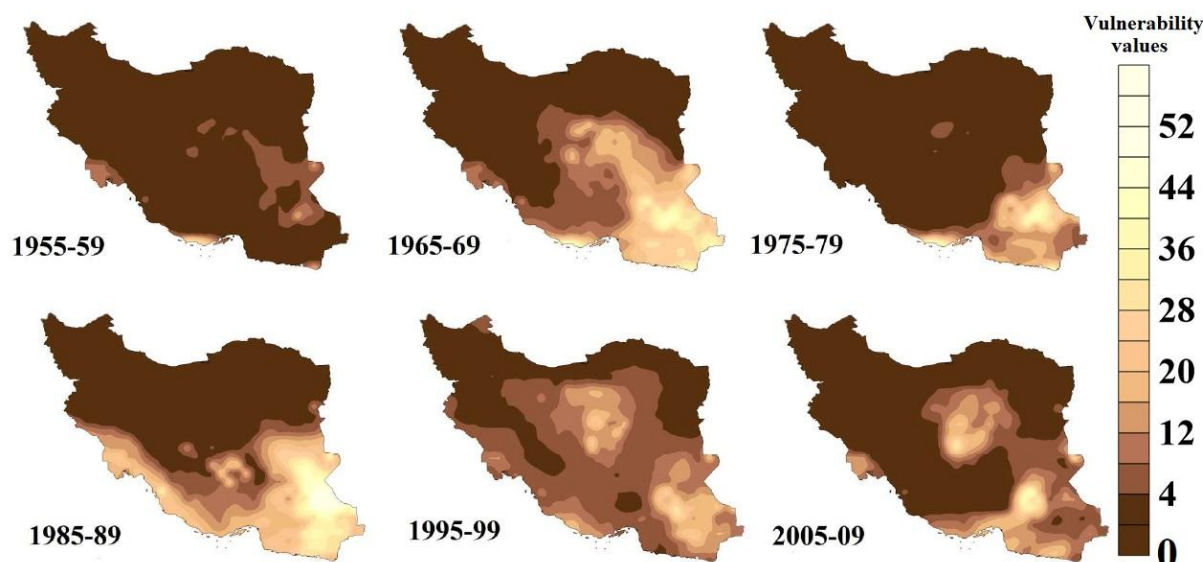
میلی متر) و نیمه جنوبی آن دارای آسیب پذیری بیشتری (بیشتر از ۲۴ میلی متر) است. لازم به توضیح است که اطمینان پذیری و انعطاف پذیری بدون واحد اندازه گیری هستند چونکه آنها بر اساس مقادیر احتمالاتی بین ۰ و ۱ اندازه گیری می شوند، اما آسیب پذیری دارای واحد اندازه گیری می باشد و واحد اندازه گیری آن نیز میلی متر می باشد.



شکل ۱۷- نقشه های منحنی میزان تغییرات زمانی-فضایی مقادیر اطمینان پذیری بر روی ایران برای بازه زمانی ۱۹۵۵-۲۰۱۸ (از مجموع ۶۰ نقشه، برای نمونه تنها ۶ نقشه با فاصله زمانی ۱۰ سال آورده شده اند)



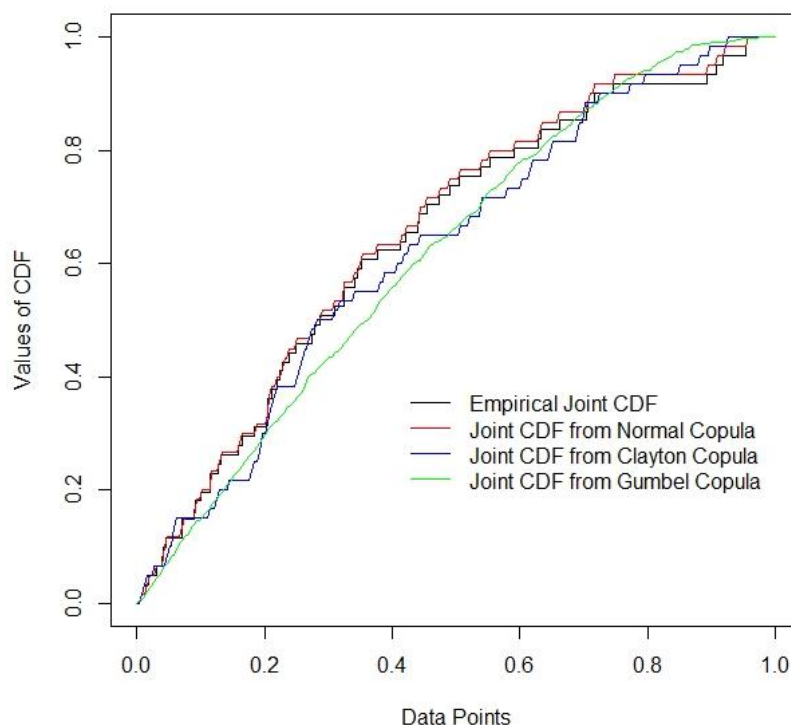
شکل ۱۸- نقشه های منحنی میزان تغییرات زمانی-فضایی مقادیر انعطاف پذیری بر روی ایران برای بازه زمانی ۱۹۵۵-۲۰۱۸ (از مجموع ۶۰ نقشه، برای نمونه تنها ۶ نقشه با فاصله زمانی ۱۰ سال آورده شده اند)



شکل ۳- نقشه های منحنی میزان تغییرات زمانی-فضایی مقادیر آسیب پذیری بر روی ایران برای بازه زمانی ۱۹۵۵-۲۰۱۸ (از مجموع ۶۰ نقشه، برای نمونه تنها ۶ نقشه با فاصله زمانی ۱۰ سال آورده شده اند)

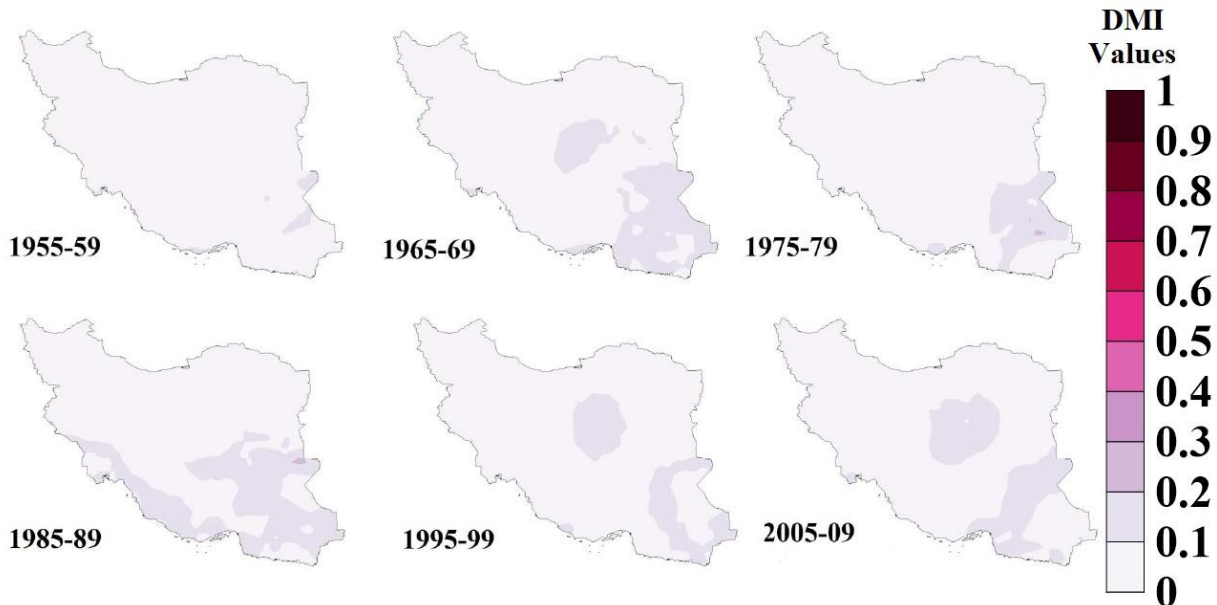
۳-۲- تغییرات زمانی و فضایی شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) در ایران

در این مطالعه برای توسعه شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) برای پایش خشکسالی های بلندمدت ایران از ترکیب توأمان اطمینان پذیری-آسیب پذیری بهره گرفته شد. بعد از انتخاب ترکیب توأمان اطمینان پذیری-آسیب پذیری به عنوان ترکیب مناسب جهت توسعه شاخص مدیریت خشکسالی (DMI)، عملکرد سه کاپولای کلایتون، گوسی و گامبل به منظور به دست آوردن توزیع احتمالاتی توأم بین اطمینان پذیری-آسیب پذیری مورد آزمون قرار گرفت. همانگونه که در شکل ۴ قابل مشاهده است برای هر مقدار از تابع فراوانی تجمعی (CDF) توأم تجربی، مقادیر متناظر آن با استفاده از کاپولاهای کلایتون، گوسی و گامبل برآورد شدند. بر اساس این نمودار (شکل ۴)، کاپولای مناسب کاپولایی است که مقادیر تابع فراوانی تجمعی (CDF) توأم آن بسیار نزدیک به مقادیر تابع فراوانی تجمعی (CDF) توأم تجربی باشد. بنابراین بر اساس شکل ۴ مشاهده می شود که کاپولای گوسی نتایج بهتری را در مقایسه با دو کاپولای دیگر در اختیار قرار می دهد. در نهایت کاپولای گوسی برای به دست آوردن توزیع توأم بین اطمینان پذیری و آسیب پذیری در این مطالعه انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین، بر اساس این شاخص، خشکسالی یک پدیده نامطلوب اقلیمی است که با افزایش آسیب پذیری و کاهش اطمینان پذیری در یک منطقه همراه است.



شکل ۴- عملکرد سه کاپولای کلایتون، گوسی و گامیل جهت نشان دادن CDF تجربی و CDF های مشترک بین اطمینان پذیری-آسیب پذیر

تغییرات زمانی-فضایی شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) توسط مجموعه ای از ۶۰ نقشه که برای کل دوره مورد مطالعه (۱۹۵۵-۲۰۱۸) تهیه شده اند مورد بررسی قرار گرفتند. از مجموع این ۶۰ نقشه، ۶ نقشه به عنوان نمونه با فاصله زمانی ۱۰ سال در شکل ۵ آورده شده است. همانگونه که در شکل ۵ قابل مشاهده است مقادیر شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) همواره و به طور مداوم برای جنوب، شرق و مرکز ایران بالا است که نشان دهنده تمایل بسیار زیاد این مناطق به خشکسالی است. در حالیکه برای نیمه غربی و نیمه شمالی ایران، این شاخص، مقدار بسیار پایین تری را نشان می دهند.



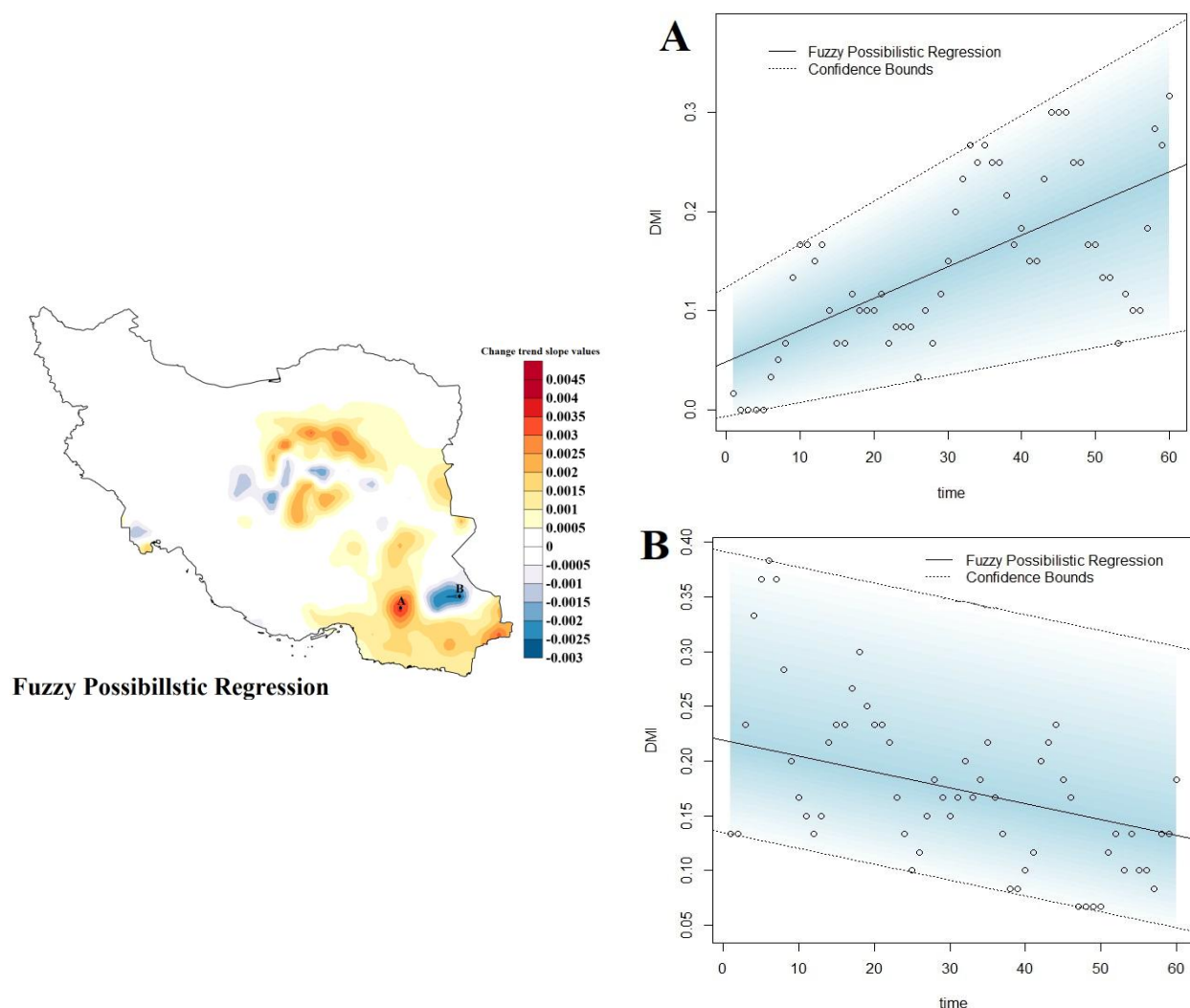
شکل ۵- نقشه های منحنی میزان تغییرات زمانی-فضایی مقادیر شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) بر روی ایران برای بازه زمانی ۲۰۱۸-۱۹۵۵ (از مجموع ۶۰ نقشه، برای نمونه تنها ۶ نقشه با فاصله زمانی ۱۰ سال آورده شده اند)

۳-۳- روند تغییرات بلندمدت تمایل به خشکسالی مبتنی بر شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) در ایران

برای آشکارسازی روند تغییرات بلندمدت تمایل به خشکسالی‌ها در ایران از رگرسیون فازی امکانی استفاده شد. شیب خط روند مقادیر شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) با استفاده از رگرسیون امکانی فازی نشان می‌دهد که بیشتر مساحت ایران در شمال، شمال شرق، شمال غرب، غرب، جنوب غرب و جنوب دارای شیب خط روندی بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۵- در هر ۵ سال است (شکل ۶). قسمت‌های مختلفی از ایران را که شیب خط روند آنها در بین این دو مقدار قرار داشته‌اند را به عنوان مناطق فاقد روند معرفی و آنها را بر روی نقشه بدون رنگ (رنگ سفید) نشان داده شده است. به عبارت دیگر می‌توان گفت روندی در تمایل بلندمدت خشکسالی‌های این مناطق با استفاده از این رگرسیون فازی مشاهده نشده است. علت این اتفاق می‌تواند در بالا بودن میانگین بارش و رطوبت خاک و پایین بودن میانگین دما و آستانه نقطه پژمردگی دائمی (PWP) این مناطق به خصوص مناطق نیمه شمالی ایران در مقایسه با دیگر مناطق دانست. علاوه بر این، نقشه‌های اطمینان‌پذیری (شکل ۱)، انعطاف‌پذیری (شکل ۲) و آسیب‌پذیری (شکل ۳) به روشنی نشان می‌دهند که بسیاری از این مناطق به خصوص نیمه شمالی ایران به ندرت به زیر آستانه PWP نزول پیدا می‌کنند، بنابراین همواره مقادیر DMI آنها صفر و یا نزدیک به صفر است. لذا انتظار تغییراتی در تمایل خشکسالی‌های بلندمدت آنها چه به صورت افزایشی و چه به صورت کاهش وجود ندارد. اما شرق، جنوب شرق و مرکز ایران شرایط بسیار متفاوت‌تری را نسبت به دیگر قسمت‌های ایران نشان می‌دهند؛ به طوریکه حدود ۲۹/۱ درصد از مساحت ایران در این مناطق دارای روند افزایشی در تمایل به خشکسالی با شیب روند تغییرات بیش از ۰/۰۰۵ در هر ۵ سال می‌باشند. روندهای کاهش نیز به صورت پراکنده و به صورت لکه‌هایی مجزا از همدیگر در این مناطق مشاهده می‌شوند. مجموع



مساحت این لکه‌ها که دارای روند کاهشی در تمایل به خشکسالی با شیب روند تغییرات کمتر از -0.005 - در هر ۵ سال هستند نزدیک به $5/6$ درصد می باشد. بالاترین مقدار شیب روند افزایشی برابر با 0.038 و پایین ترین مقدار شیب روند کاهشی نیز برابر با -0.029 - در هر ۵ سال یوده است که در شکل ۶ به ترتیب با دو حرف A و B نشان داده شده اند. به عبارت دیگر در این دو نقطه در طول ۶۴ سال مورد مطالعه (۱۹۵۵-۲۰۱۸) به ترتیب 0.228 به مقدار DMI نقطه A افزوده و 0.185 از مقدار DMI نقطه B کاسته شده است که به روشنی تمایل به افزایش و کاهش تمایل به خشکسالی در این دو نقطه کاملاً مشهود است. برای نمونه در شکل ۶ نمودار روند تغییرات بلندمدت این دو نقطه که با استفاده از رگرسیون امکانی فازی به دست آمده است آورده شده اند. همچنانکه قبلاً در قسمت روش شناسی توضیح داده شده است مدل های مختلف رگرسیون فازی و به ویژه رگرسیون امکانی فازی، به دنبال آن است که ضرایب فازی را به گونه ای تعیین کند که پهنای خروجی فازی برای تمام مجموعه های داده ها مینیمم گردد. لذا در نمودارهای شکل ۶، سه خط روند قابل مشاهده است که دو خط پررنگ قرمز حد پایین و بالای پهنای خروجی مدل را نشان می دهد و خط سیاه کم رنگ نیز میانگین پهنای خروجی مدل را ارائه می دهد که در این تحقیق این خط مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۶- نقشه الگوی فضایی مقادیر شیب روند تغییرات بلندمدت شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) ایران با استفاده از مدل رگرسیون امکانی فازی به همراه (A) نمو دار شیب روند تغییرات افزایشی برای نقطه منتخب و (B) نمو دار شیب روند تغییرات کاهش‌ی برای نقطه منتخب

نتایج آشکارسازی روند بلندمدت تمایل خشکسالی به دست آمده در این مطالعه تقریباً با نتایج چاندا و همکاران (۲۰۱۳) در هندوستان برای بسیاری از قسمت‌های ایران شباهت‌هایی را نشان می‌دهد. چاندا و همکاران (۲۰۱۳) علاوه بر تایید دوره‌ای بودن شاخص DMI در حوضه آبریز مالاپرادا در جنوب غربی هندوستان، یک روند افزایشی با نرخ ۰/۰۰۴۸ در هر دوره ۵ ساله را که با استفاده از رگرسیون خطی کلاسیک به دست آمده بود را گزارش داده‌اند. اما صرف نظر از کار چاندا و همکاران (۲۰۱۳) که از لحاظ داده و روش شناسی شباهت زیادی به این مطالعه داشتند، دیگر گزارش‌های محققین، به خصوص گزارش‌های ارائه شده برای ایران، نشان از روند کاهش‌ی شدت خشکسالی‌ها برای قسمت‌های وسیعی از ایران دارند (محمودی و همکاران، ۲۰۱۹؛ نوری و همایی، ۲۰۱۹؛ شفیع زاده و همکاران، ۲۰۱۶؛ باری ابرقویی و همکاران، ۲۰۱۱). در حالیکه مطالعه حاضر تاکید جدی بر افزایش تمایل به خشکسالی‌ها به خصوص در جنوب، جنوب



شرق، شرق و مرکز ایران دارد. مهمترین دلایلی که باعث ایجاد این تفاوت شده است، تفاوت در روش‌شناسی موجود در این مطالعات می‌باشد. در شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) شدت خشکسالی‌ها مورد توجه قرار نمی‌گیرد بلکه تمایل بلندمدت آنها به خشکسالی‌ها مورد توجه می‌باشد. به عبارت دیگر، شاخص‌هایی که در مطالعات قبلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند تنها وضعیت جاری خشکسالی‌ها را با استفاده از یک معیار مشخص توصیف می‌کنند. در حالیکه در شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) ویژگی‌های بلندمدت خشکسالی‌های یک منطقه معین را که ممکن است به دلیل تغییرپذیری فرکانس پایین و تغییر در آب‌وهوا به آرامی تغییر پیدا کنند (مثلاً در بازه‌های زمانی پنج یا ده‌ساله) را کمی‌سازی می‌نماید. بنابراین با توجه به این توضیحات نمی‌توان نتایج این مطالعه را با نتایج مطالعات قبلی مقایسه نمود.

۴- نتیجه‌گیری

مؤلفه‌های اطمینان‌پذیری، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری بر اساس داده‌های رطوبت خاک برای چهارچوب مرزهای سیاسی ایران محاسبه شدند. نتایج نشان از بالاتر بودن مقادیر اطمینان‌پذیری و انعطاف‌پذیری و پایین‌تر بودن مقادیر آسیب‌پذیری برای نیمه شمالی و نیمه غربی ایران در مقایسه با نیمه جنوبی و نیمه شرقی آن دارد. مقایسه دو به دوی مقادیر سه مؤلفه اطمینان‌پذیری، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری نیز حاکی از یک رابطه منفی بین اطمینان‌پذیری - انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری - اطمینان‌پذیری و یک رابطه مثبت بین آسیب‌پذیری - انعطاف‌پذیری بوده است. با توجه به روابط موجود بین این سه متغیر از ترکیب توأمان اطمینان‌پذیری - آسیب‌پذیری جهت توسعه شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) برای ایران استفاده شد. بر اساس این شاخص، خشکسالی یک پدیده نامطلوب اقلیمی است که با افزایش آسیب‌پذیری و کاهش اطمینان‌پذیری در یک منطقه همراه است. بنابراین بر اساس این شاخص مشاهده شد که مقادیر شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) همواره و به طور مداوم برای جنوب، شرق و مرکز ایران بالا و برای نیمه غربی و نیمه شمالی آن پایین‌تر است. لازم به اشاره است که مقادیر بالا و پایین این شاخص به ترتیب حاکی از تمایل بسیار زیاد و تمایل بسیار کم به خشکسالی است.

برای آشکارسازی روند تغییرات بلندمدت تمایل به خشکسالی‌ها در ایران نیز از مدل رگرسیون امکانی فازی استفاده شد. شیب خط روند مقادیر شاخص مدیریت خشکسالی (DMI) با استفاده از رگرسیون امکانی فازی نشان داد که بیشتر مساحت ایران در شمال، شمال شرق، شمال غرب، غرب، جنوب غرب و جنوب دارای شیب خط روند بسیار ملایمی بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۵- در هر ۵ سال هستند. اما شرق، جنوب شرق و مرکز ایران شرایط بسیار متفاوت‌تری را نسبت به دیگر قسمت‌های ایران نشان می‌دهند؛ به طوریکه حدود ۲۹/۱ درصد از مساحت ایران در این مناطق دارای روند افزایشی در تمایل به خشکسالی با شیب روند تغییرات بیش از ۰/۰۰۵- در هر ۵ سال می‌باشند. روندهای کاهشی نیز به صورت پراکنده و به صورت لکه‌هایی مجزا از همدیگر در این مناطق مشاهده می‌شوند. مجموع مساحت این لکه‌ها که دارای روند کاهشی در تمایل به خشکسالی با شیب روند تغییرات کمتر از ۰/۰۰۵- در هر ۵ سال هستند نزدیک به ۵/۶ درصد می‌باشد. بالاترین مقدار شیب روند افزایشی برابر با ۰/۰۳۸ و پایین‌ترین مقدار شیب روند کاهشی نیز برابر با ۰/۰۲۹- در هر ۵ سال یوده است.



بنابراین با توجه به روند افزایشی در تمایل به خشکسالی ها در جنوب شرق ایران و با در نظر گرفتن اقلیم خشک، بارش اندک و کمبود منابع آبی مناسب در این قسمت از ایران، توجه جدی به سیاستگزاری های جدید در مدیریت منابع آب بسیار مشهود و لازم به نظر می رسد.

منابع

- Balling, R., Keikhosravi Kiany, M. S., Sen Roy, S., Khoshhal, J., 2016. Trends in Extreme Precipitation Indices in Iran: 1951-2007. *Adv. Meteorol.*, 2016, 1-8.
- Chanda, K., Maity, R., 2017. Assessment of trend in global drought propensity in the twenty-first century using drought management index. *Water Resour. Manage.*, 31, 1209–1225.
- Chanda, K., Maity, R., Sharma, A., Mehrotra, R., 2014. Spatiotemporal variation of long-term drought propensity through reliability-resilience-vulnerability based drought management index. *Water. Resour. Res.*, 50, 7662–7676.
- Daneshmand, H., Mahmoudi, P., 2017. Estimation and Assessment of Temporal Stability of Periodicities of Droughts in Iran. *Water Resour. Manage.* 31, 3413–3426.
- Fan, Y., van den Dool, H., 2004. Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5 degree resolution for 1948 to present. *J. Geophys. Res.*, 109(10), D10102.
- Fathian, F., Ghadami, M., Haghighi, P., Amini, M., Naderi, S., Ghaedi, Z., 2020. Assessment of changes in climate extremes of temperature and precipitation over Iran. *Theor. Appl. Climatol.*, 141, 1119–1133.
- Han, E., Amor V.M.Ines, A. V. M., Koo, J., 2019. Development of a 10-km resolution global soil profile dataset for crop modeling applications. *Environ. Model. Softw.*, 119, 70-83.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., Loucks D. P., 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.*, 18(1), 14–20.
- Keshavarz, M. R., Vazifedoust, M., Fattahi, E., and Behyar, M. B., 2013. Spatial pattern of droughts severity and direction variations using trend analysis of Distributed Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index. *Journal of Geographical Sciences*, 12(27), 97-110. (In Persian)



- Mahmoudi, P., Rigi chahi, A., 2019. Climate change impact on spatial and temporal distribution of precipitation in Iran. In: Proceedings of 6th International Regional Conference of Climate Change, 18-19 November, Tehran, Iran.
- Mahmoudi P, Maity R, Amir Jahanshahi SM, Chanda K (2021) Changing spectral patterns of long-term drought propensity in Iran through reliability-resilience-vulnerability (RRV) based drought management index. *Int J Climatol* 42(8):4147–4163.
- Mahmoudi, P., Hamidian Pour, M., Sanaei, M., Daneshmand, N., 2019. Investigating the Trends of Drought Severity Changes in Iran. In: Proceedings of International Conference on Climate Change, Impacts, Adaptation and Mitigation, 11 June, Kharzmi University, Tehran, Iran.
- Maity, R., Sharma, A., Kumar, D. N., Chanda, K., 2013. Characterizing drought using the reliability-resilience-vulnerability concept. *J. Hydrol. Eng.* 18(7), 859–869.
- Maleknejad, H., Soleimani Motlaq M., 2012. Assessing the severity of climatic and hydrologic droughts in Chaghalvandi basin. *Iranian Water Research Journal*, 5(9), 61-71. (In Persian)
- Mansouri Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M., Nejadsoleymani, H., 2019. An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *J. Environ. Syst.*, 8(1), 1-10.
- Moradi, A., Rajabi, M., Farajzadeh, M., 2007. Analysis trend and spatial characteristics of droughts severity in Fars province. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 14(1), 97-109. (In Persian)
- Rao, N. H., 1997. Grouping water storage properties of Indian soils for soil water balance model applications. *Agric. Water Manage.*, 36, 99–109.
- Sobhani, B., Jafarzadehaliabad, L., Zengir, V.S., 2020. Investigating the effects of drought on the environment in northwestern province of Iran, Ardabil, using combined indices, Iran. *Model. Earth Syst. Environ.*, 6, 983–993.
- Taiz, L., Zeiger, E., 1991. *Plant physiology*. Benjamin/Cummings, Redwood City, California.
- Tanaka H, Uejima S, Asai K (1982) linear regression analysis with fuzzy model. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 12:903–907



- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yong, H., Abbaspour, K. C., 2019. The future of extreme climate in Iran. Sci. Rep., 9, 1-11.
- Zareabyaneh, H., Bayatvarkeshi, M., Yazdani, V., 2011. Trend analysis of annual and seasonal temperature, precipitation and drought in Hamedan province. Journal of Irrigation and Water Engineering, 1(3), 47-58. (In Persian)