

شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی بارش و دبی استان تهران تحت مدل CanESM2 (براساس تطبیق دوشاخه خشکسالی SPI و SSI)

محمدحسین جهانگیر*^۱، سیده مهسا موسوی رینه^۱، مهناز ابوالقاسمی^۱

۱- گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۷

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۴/۱۴

چکیده

بررسی خشکسالی به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی، که زندگی اکثر مردم به آن گره خورده است، بسیار حائز اهمیت است. جهت آماده سازی در مقابله با خشکسالی و کاهش خسارات ناشی از آن از روش‌های شبیه‌سازی، مدل‌سازی و تهیه مقدمات احتمال وقوع خشکسالی، استفاده می‌شود. در این مطالعه برای فراهم آوردن یک دید کلی از شرایط خشکسالی آینده از دو شاخص خشکسالی SSI و SPI استفاده گردید. در گام اول داده‌های مربوط به دبی و بارش با استفاده از مدل CanESM2 تحت سناریو انتشار RCP4.5 و مدل ریزمقیاس SDSM برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ پیش‌بینی شد سپس با توجه به موقعیت جغرافیایی هر ایستگاه مناسب‌ترین تابع توزیع تجمعی برای هر شاخص در هر ایستگاه انتخاب گردید و امکان محاسبه شاخص‌های خشکسالی SSI و SPI فراهم گردید. نتایج نشان داد در دوره آبی براساس شاخص SSI، ایستگاه شریف‌آباد بیشترین مقدار خشکسالی (۲/۷۴-) را داراست و همچنین براساس شاخص SPI بیشترین مقدار شاخص خشکسالی (۲/۱۷-) مربوط به ایستگاه لتیان است. لازم به ذکر است که تطابق دو شاخص در ایستگاه‌های نمرد و لتیان نیز با ترسیم منظر منحنی تغییرات در طی دوره مطالعاتی نشان داد که اختلاف مقادیر عددی این دو کمیت، تنها برای ۵ سال از انطباق مناسبی برخوردار نیست.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی خشکسالی، شاخص SPI و SSI، SDSM، استان تهران.

مقدمه

با جدی شدن بحث تغییر اقلیم در دنیا، مطالعه پارامترها و عناصر آب و هوایی به صورت گسترده-ای مورد توجه قرار گرفته است (رسولی و همکاران، ۱۳۹۳). خشکسالی به عنوان یکی از پیامدهای تغییر اقلیم، از مخاطرات طبیعی پرخسارت محسوب می‌شود که آثار آن به کندی نمایان می‌شود به همین دلیل به عنوان یک "بحران" کمتر به آن توجه می‌شود. به دلیل این که کشور ایران در محدوده خشک و نیمه خشک جهان واقع شده است، همواره خسارات زیاد ناشی از خشکسالی را متحمل می‌شود و پایش آن بسیار واجد اهمیت می‌باشد (جهانگیر و همکاران، ۱۳۹۴). از این رو بررسی پدیده‌هایی چون خشکسالی برای مقابله، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در دوره‌های آتی اهمیت ویژه‌ای دارد (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۷). برای کاهش تاثیرات و خسارات در طول دوره خشکسالی باید تصمیماتی به صورت موثر و هماهنگ اتخاذ شود. از این رو استفاده از روش‌های شبیه‌سازی، مدل-سازی و تهیه مقدمات احتمال وقوع خشکسالی، به ارائه طرح‌هایی جهت آماده سازی در مقابله با خشکسالی و کاهش خسارات ناشی از آن منجر می‌شود. در راستای این اهداف به منظور شناسایی رفتار این پدیده الگوهای سری زمانی و همچنین شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bazrafshan and Khalili, 2013). منظور از یک سری زمانی مجموعه‌ای از داده‌های آماری است که در فواصل زمانی مساوی و منظمی جمع‌آوری شده باشند. هدف از سری زمانی، تعیین قانونمندی و شناسایی رفتار آن برای پیش‌بینی در آینده است. اساس بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها در فرایندهای هیدرولوژیکی و تصمیمات بهره‌برداری از منابع آب بر پایه پیش‌بینی و تحلیل سری‌های زمانی است

(زارعی و همکاران، ۱۳۹۵). برای بررسی خشکسالی با توجه به شرایط می‌توان از سری‌های زمانی، (شامل میزان بارش، مقدار رطوبت خاک و...) و یا اقدامات نسبی (شامل شاخص SPEI، SPI، SSI، RAI و...) استفاده کرد (Uml et al, 2017). یکی از مناسب‌ترین شاخص‌ها برای محاسبه خشکسالی، شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی جریان سطحی استاندارد^۱ (SSI) می‌باشد که بر پایه داده‌های دبی محاسبه می‌شود و همچنین شاخص بارش استاندارد شده^۲ (SPI) که یکی از کارآمدترین شاخص‌ها برای بررسی خشکسالی می‌باشد. اوگانتاند و همکاران (Oguntunde et al, 2017) اثر تغییر اقلیم را بر خشکسالی هیدرواقلمی در سراسر حوضه آبخیز حوضه ولتا در غرب آفریقا بررسی کردند و نشان دادند وسعت خشکسالی‌ها در آینده بین ۲۴ تا ۳۴ درصد افزایش می‌یابد و بزرگی افزایش خشکسالی‌ها با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده بیشتر از شاخص SPI است. عینی و همکاران (۲۰۱۸) به برآورد رواناب و پایش مکانی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI و SDI پرداختند و نتیجه گرفتند که استفاده از پایگاه داده ملی اسفزاری دارای دقت زمانی و مکانی بسیار بالایی می‌باشد. یوسفی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از شاخص SPI و RDI به پهنه‌بندی و مدیریت خشکسالی استان مرکزی پرداختند و نتیجه گرفتند که مناطق مرکزی و غربی این استان در زمان وقوع خشکسالی آسیب پذیرتر هستند. لیو (Liu et al, 2016) به بررسی و پیش‌بینی خشکسالی در غرب چین به وسیله شاخص SSI و scPHDI و SPEI پرداختند، نتایج نشان داد شاخص جریان سطحی استاندارد شده (SSI) در تشخیص شروع، شدت و طول مدت خشکسالی بسیار دقیق عمل می‌کند. مددگار

بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که حفاظت از جنگل‌های بالادست تاثیر زیادی در میزان شاخص خشکسالی SSI در آینده دارد. رضایی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی کارایی مدل ریزمقیاس نمایی آماری (SDSM) در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در استان‌های کرمان و بم پرداختند نتایج بیانگر افزایش دما در تمام ماه‌های سال برای هر دو استان می‌باشد. دهقان و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های SDSM و IDW و LARS-WG برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس کردن دما و بارش پرداختند. نتایج دو مدل SDSM و IDW بیان‌کننده افزایش تبخیر و تعرق در تمامی ماه‌ها حتی به میزان ناچیز و حداکثر در اواخر بهار و تابستان است. در حالی که تبخیر و تعرق محاسبه شده در مدل LARS-WG برآورد بسیار کمتری را نسبت به دوره پایه نشان داده است که نشان‌دهنده توانایی کم مدل در محاسبه این متغیر است. میکونن و دیسی (Mekonnen and Disse, 2016) تغییرات اقلیمی حوضه رودخانه نیل آبی در افریقا را با استفاده از مدل SDSM و LARS-WG تحت شش سناریو بررسی کردند. یافته‌ها افزایش روند حداکثر و حداقل دما را نشان می‌دهد. سلاجقه و همکاران (۱۳۹۶) دما و بارش کرمانشاه و روانسر را براساس مدل LARS-WG و SDSM براساس سناریو A2 شبیه‌سازی کردند. نتایج حاکی از افزایش دما در هر دو مدل طی دو دهه ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ است همچنین کاهش بارش نیز پیش‌بینی شد. پیرنیا و همکاران (۱۳۹۷) به آنالیز روند پارامترهای دما و بارندگی طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۵ پرداختند و همچنین این پارامترها را برای دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۰ براساس داده‌های روزانه خروجی مدل CanESM2 تحت ستاریوهای RCP2.6 و

و مرادخانی (Madadgar and Moradkhani, 2013) به کمک شاخص SSI خشکسالی فصلی را در حوضه رودخانه گنیشون در رودخانه کلرادو مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد فصل بهار حساسیت بیشتری نسبت به کاهش بارش و جریان سطحی و در نتیجه خشکسالی از خود نشان می‌دهد. استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو یا GCM³ از معتبرترین روش‌ها برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی (دما، بارش، دبی و...) می‌باشد اما مشکل مدل‌های گردش عمومی جو این است که در سطوح بزرگ محاسبه می‌شود و برای رفع این مشکل نیاز به کوچک مقیاس کردن نتایج این مدل‌ها در مقیاس‌های ایستگاهی احساس می‌شود (Samadi et al, 2011). در واقع ریزمقیاس نمایی ارتباطی صحیح میان پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی شونده‌ها بر قرار می‌نماید (Wilby et al, 2002). مدل SDSM که زیر مجموعه روش‌های ریزمقیاس نمایی می‌باشد به دلیل داشتن مزایای فراوان همچون اقتصادی بودن، سرعت بالا و سادگی در فرایند ریزمقیاس نمایی ناحیه‌ای، دلیل انتخاب توسط محققین می‌باشد (Fowler et al, 2007; Wilby et al, 2002). کبیری و همکاران (Kabiri et al, 2012) اثرات تغییر اقلیم بر حوضه کلانچ را در غرب مالزی بررسی کردند و از مدل SDSM برای ریزمقیاس سازی و از مدل بارش رواناب HEC-HMS برای شبیه‌سازی رواناب حوضه تا پایان این قرن (۲۱۰۰) استفاده کردند. نتایج نشان داد حجم رواناب در دوره پیش‌بینی شده کاهش می‌یابد. ژنگ و همکارانش (Zheng et al, 2014) به کمک شاخص SSI جریان آب سطحی بالادست رودخانه یوشینو را تحت دو سناریو GCM20 برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۹

پارامترهای مختلف اقلیمی باشد، در این مطالعه علاوه بر استفاده از شاخص پرکاربرد SPI که به طور گسترده در مناطق مختلف استفاده می‌شود، شاخص مهم SSI نیز به دلیل در نظر گرفتن برخی پارامترهای مهم اقلیمی، برای ارزیابی خشکسالی استفاده شد. به این منظور، اهداف تحقیق حاضر به صورت موارد زیر است که نمای از مراحل انجام کار در شکل ۱ آورده شده است:

۱) کنترل کیفیت پارامترهای بارش و دبی طی دوره ۲۰۱۸-۱۹۸۶

۲) پیش‌بینی این پارامترها طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ براساس داده‌های روزانه خروجی مدل CanESM2 تحت سناریو RCP4.5 با استفاده از مدل SDSM

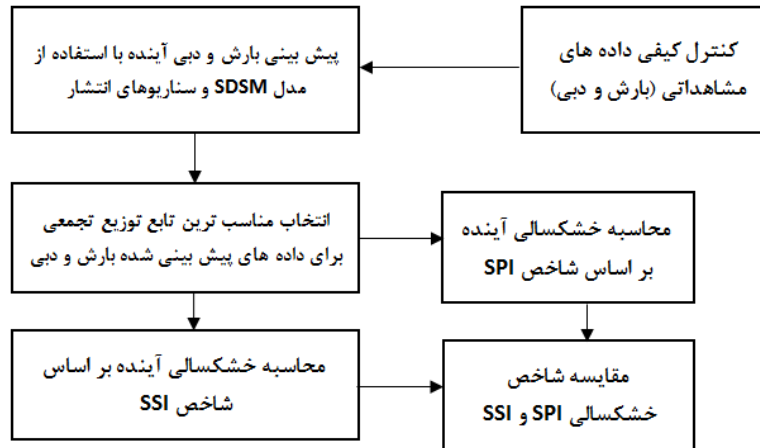
۳) انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع سازگار با سری-های زمانی برای هر دو شاخص SPI و SSI
 ۴) آشکارسازی و شبیه‌سازی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی SPI و SSI طی دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۰).

منطقه مورد مطالعه

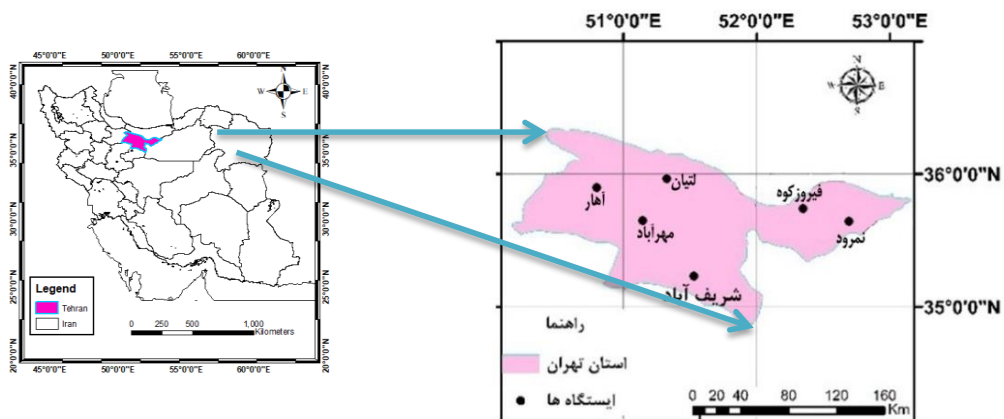
استان تهران، با وسعتی حدود ۱۲۹۸۱ کیلومتر مربع، در ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه و ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. تهران اقلیم‌های متنوع دارد، در شمال آب و هوای معتدل و کوهستانی و در جنوب آب و هوای نیمه خشک را شامل می‌شود. متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۳۳ میلی‌متر و دمای منطقه بین میانگین کمینه و بیشینه ۱۱/۹ و ۲۲/۷ درجه سلسیوس برآورد شده است. با توجه به اینکه پایتخت کشور در این منطقه واقع شده است و روند جمعیت در این استان رو به رشد می‌باشد تامین منابع آبی و بررسی کمبودهای آبی برای این منطقه از

RCP8.5 با استفاده از مدل SDSM برای حوضه آبخیز تمر بررسی کردند و در آخر شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI طی دوره آینده را بررسی نمودند. نتایج نشان داد شاخص SPEI شرایط خشکسالی را واقعی‌تر و منطقی‌تر و همچنین شدیدتر از شاخص SPI نشان می‌دهد. رحیمی و رحیمی (۱۳۹۷) به تحلیل مکانی و زمانی تغییر اقلیم در سال‌های آینده به کمک SDSM و LARS-WG و شبکه عصبی برای استان خوزستان پرداختند نتایج نشان داد همواره مناطق شمالی این استان خشکسالی شدیدتری را تجربه خواهند کرد. کریمی و همکاران (۱۳۹۷) به تحلیل روند تغییرات و پیش‌بینی پارامترهای حدی دما در سواحل جنوبی دریای خزر به کمک مدل آماری-دینامیکی SDSM پرداختند نتایج نشان داد در دوره پیش‌بینی دمای شبانه افزایش داشته و تفاوت دمای سرد و گرم کاهش می‌یابد. احمدآبادی و صدیقی فر (۱۳۹۷) به پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه کن براساس مدل SDSM و SWAT پرداختند و در نهایت مشخص شد برای دوره زمانی ۲۰۴۵-۲۰۱۶ کاهش بارندگی، افزایش دما و کاهش تبخیر و تعرق واقعی محتمل است و همچنین نتایج نشان داد رواناب سطحی از میزان ۱۰/۵۴ میلیمتر در دوره مشاهداتی به میزان ۲۷/۲۱ میلیمتر برای دوره پیش‌بینی برآورد شده است. در مطالعه حاضر برای پایش، ارزیابی و نیز اطلاع رسانی به موقع بروز خشکسالی‌ها از سناریو RCP4.5 مدل CanESM2 از گزارش پنجم IPCC^۴ و نیز مناسب‌ترین توابع توزیع شاخص‌های خشکسالی برای ارزیابی شرایط تغییر اقلیم و خشکسالی در زمان حال و آینده استفاده شد. با توجه به این که خشکسالی در یک منطقه می‌تواند تحت تاثیر

موضوعات مهم استان به شمار می‌رود. نقشه‌ی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: فرایند پیش و پیش‌بینی خشکسالی استان تهران با استفاده از مدل SDSM



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

ارزیابی خشکسالی در آینده، دوره آماری ۲۰۵۰-۲۰۲۰ انتخاب شدند.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و دوره آماری

در این مطالعه از دو نوع داده استفاده شده است. داده‌های روزانه بارش و دبی ۸ ایستگاه در استان تهران برای سال‌های ۲۰۱۸-۱۹۸۶ از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است. همچنین داده‌های خروجی مدل CanESM2 (سناریو RCP4.5) برای به‌کارگیری در مدل SDSM، از سایت اقلیم شناسی کانادا^۵ (CCCSN) دریافت شد و برای

ریزمقیاس نمایی و داده‌های اقلیمی

با شروع دهه ۲۰۱۰ و در پنجمین گزارش ارزیابی^۶ هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم^۷ (IPCC)، CMIP5^۸ سناریوهای جدید RCP^۹ را به جای سناریوهای^{۱۰} SRES پیشنهاد داد که این سناریوها در چهار حالت ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ هستند. در این تحقیق

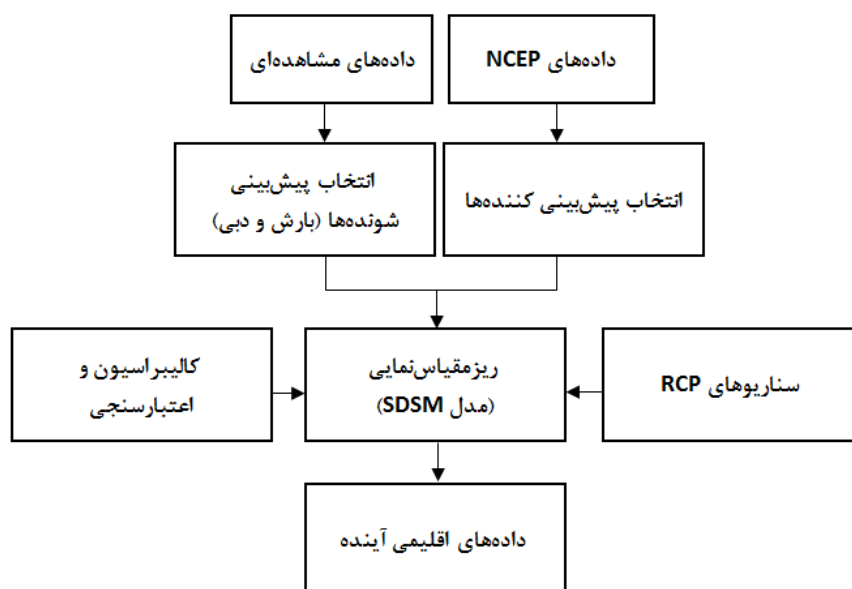
از سناریو ۴/۵ استفاده شده که نشان دهنده حالت متوسطی از محرکه‌های تابشی است. در این تحقیق از داده‌های مدل $CanESM2^{11}$ استفاده شد (Arora et al, 2011)، که مشخصات این مدل در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مدل $CanESM2$ (Arora et al, 2011)

نام مدل	قدرت تفکیک اتمسفر (درجه) (طول*عرض)	قدرت تفکیک اقیانوسی (درجه)(طول*عرض)	گروه موسس	دوره شبیه‌سازی تاریخی/ آینده	سناریوهای شبیه‌سازی
CanESM2 (2010)	$2.81^{\circ} \times 2.81^{\circ}$	$1.41^{\circ} \times 0.94^{\circ}$	(CCCMA) کانادا	۲۱۰۰-۲۰۰۶/۲۰۰۵-۱۸۵۰	RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5 RCP 6

متغیرها آورده شده است، (۳) واسنجی و آموزش مدل، (۴) تولید داده‌های وضع هوای ساختگی با استفاده از پیش‌بینی کننده‌های NCEP به منظور ارزیابی رابطه واسنجی (صحت‌سنجی) با رسم نمودار پراکندگی داده‌ها و تجزیه و تحلیل آماره‌ها، (۵) تولید سناریوی آب‌وهوایی با استفاده از پیش‌بینی کننده‌های وضع هوا یا مدل اقلیمی $CanESM2$. فرایند ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل SDSM در شکل ۳ به صورت ساده و خلاصه نشان داده شده است.

مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی در یک ایستگاه خاص در شرایط حال حاضر و آینده تحت تاثیر پدیده تغییر اقلیم به کار می‌رود که داده‌های آن به صورت سری‌های زمانی روزانه برای یک سری از متغیر-های اقلیمی می‌باشد (Wilby and Dawson, 2007). مدل SDSM به کمک داده‌های پیشگفته، ریزمقیاس‌نمایی آماری سری‌های روزانه را در پنج مرحله جداگانه به انجام می‌رساند؛ (۱) کنترل کیفیت و تغییر شکل داده‌ها، (۲) انتخاب بهترین متغیر پیش‌بینی کننده که در جدول ۲ شرح این



شکل ۳: فرایند ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل SDSM

تشریح شاخص بارش استاندارد (SPI)

شاخص SPI به منظور پایش خشکسالی اقلیمی ایالت کلرادو آمریکا توسط مک کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ ابداع گردید. مسئله اصلی در محاسبه شاخص SPI برآزش توزیع آماری مناسب روی اطلاعات بارندگی است. در نتیجه برای محاسبه $F(x)$ از توابع توزیع تجمعی مختلف استفاده شد تا در نهایت بهترین تابع توزیع تجمعی برای هر ایستگاه مشخص شود. بسیاری از پژوهشگران از جمله مک کی و همکاران توزیع آماری گاما راپیشنهاد دادند (McKee et al, 1993). به دلیل این که توابع توزیع تجمعی مورد استفاده برای X مساوی با صفر (بارندگی صفر میلیمتر) تعریف نشده است و توزیع بارندگی ممکن است دارای مقادیر صفر باشد، تابع احتمال تجمعی که در

برگیرنده صفر هم باشد، از رابطه ۱ به دست می آید:

$$H(x) = q + (1 - q) * F(x) \quad (1)$$

که در آن $H(X)$ تابع تجمعی کل، q احتمال صفر بودن مقادیر بارندگی می باشد. اگر m تعداد داده های بارندگی باشد که مقدار آنها در سری زمانی معادل صفر است آنگاه q از رابطه ۲ به دست می آید:

$$q = m/n \quad (2)$$

$$p = q + 1 \quad (3)$$

که در این رابطه q ، احتمال تعداد بارندگی های صفر و n ، تعداد اعضای سری زمانی موردنظر را نشان می دهد.

روابط ۴ و ۵، SPI را از روی مقدار محاسبه شده $H(X)$ ارائه می دهد.

رابطه ۴)

$$SPI = - \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]; \quad (0 < H(x) \leq 0/5) \quad t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)}$$

رابطه ۵)

$$SPI = + \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]; \quad (0/5 < H(x) \leq 1) \quad t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)}$$

که در روابط فوق C و d مقادیر ثابت بوده و $H(X)$ تابع احتمال تجمعی است. که مقادیر ثابت در فرمول بالا عبارتند از: $C_0=2/535537$ ، $d_1=3/432788$ ، $C_2=0/030328$ ، $C_1=0/802853$

جدول ۲: طبقه بندی خشکسالی براساس شاخص SPI

طبقه بندی خشکسالی	مقدار SPI
ترسالی بسیار شدید ^{۱۲} (EW)	۲ یا بیشتر
ترسالی شدید ^{۱۳} (SW)	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط ^{۱۴} (MW)	۱ تا ۱/۴۹
نرمال ^{۱۵} (N)	-۰/۹۹ تا -۰/۹۹
خشکسالی متوسط ^{۱۶} (MD)	-۱ تا -۱/۴۹
خشکسالی شدید ^{۱۷} (SD)	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشکسالی بسیار شدید ^{۱۸} (ED)	کوچکتر یا مساوی -۲

که در معادله بالا مقادیر ثابت عبارتند از: $C_0=2.535537$, $C_1=0.802853$, $C_2=0.030328$, و $d_1=3.432788$, $d_2=0.189269$, $d_3=0.003308$ مقدار W از معادله $w = \sqrt{-2\ln(p)}$ حاصل می‌شود که در آن مقدار P برای $P \leq 0.5$ برابر است با $P=F(x)$ و برای $P > 0.5$ برابر است با $P=1-F(x)$ که در این مورد علامت نهایی SSI برعکس می‌شود. مقادیر نهایی SSI نرمال است به طوری که میانگین آن برابر صفر و انحراف معیار آن برابر با یک می‌باشد (Lee et al, 2011). طبقه‌بندی درجات مختلف خشکسالی و ترسالی هیدرولوژیک براساس شاخص SSI در جدول ۳ ارائه می‌شود (Lorenzo-Lacruz et al, 2013).

شاخص خشکسالی جریان سطحی استاندارد (SSI)

در شاخص جریان سطحی استاندارد از پارامتر دبی رودخانه استفاده شده است که اطلاعات بیشتر را می‌توان در ویسنته سرانو و همکاران یافت (Vicente-Serrano et al, 2011).

این روش براساس محاسبه تابع توزیع تجمعی برای داده‌های دبی سالانه می‌باشد، در نتیجه برای محاسبه‌ی $F(x)$ از توابع توزیع تجمعی مختلف استفاده گردید تا در نهایت بهترین تابع توزیع تجمعی برای هر ایستگاه مشخص شود، شاخص SSI با استفاده از معادله رابطه ۶ به دست می‌آید (Stegun and Abramowitz, 1965).

رابطه ۶

$$SSI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + \frac{d_1}{2} W^2 + \frac{d_3}{3} W^3}$$

جدول ۳: طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص جریان سطحی

مقدار SSI	طبقات خشکسالی
بزرگتر مساوی ۱/۴۶	خیلی مرطوب
۱/۴۶ تا ۰/۵۲	مرطوب
۰/۵۲ تا -۰/۵۲	متوسط
-۱/۴۶ تا -۰/۵۲	خشک
کوچک‌تر یا مساوی -۱/۴۶	بسیار خشک

ازای هر احتمال مشخص مقدار متغیر موردنظر به دست آید (علیزاده، ۱۳۹۴). مقادیر شاخص SSI و SPI با استفاده از چهار تابع توزیع فیتیگ لایف^{۱۹}، ویبول (سه پارامتره)^{۲۰}، گاما^{۲۱} و نرمال^{۲۲} محاسبه گردید. برای محاسبه توابع توزیع تجمعی مختلف در شاخص SSI و SPI از روابط ۷ تا ۱۰ استفاده گردید.

انواع توزیع‌های تحت بررسی

تابع توزیع احتمال ابزاری موثر و مفیدی برای توصیف جامع هر متغیر هواشناسی یا هیدرولوژی است (Vlček and Huth, 2009). در بررسی‌های هیدرولوژی سعی می‌شود بر داده‌هایی که به صورت تجربی اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند، توابع احتمالاتی مناسبی برازش داده شود و بهترین تابعی که با داده‌ها مطابقت داشته باشد به عنوان تابع توزیع احتمال برگزیده شود تا از روی آن به

در روابط ۷ تا ۱۰، α پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس و $\gamma(\alpha)$ پارامتر توزیع است که روابط ۱۱ و ۱۲ روش محاسبه آنها را نشان می‌دهد.

$$F(x) = \varphi\left(\frac{1}{\alpha}\left(\sqrt{\frac{x-\gamma}{\beta}} - \sqrt{\frac{\beta}{x-\gamma}}\right)\right); \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt \quad \text{رابطه ۷ Fatigue life}$$

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad \text{رابطه ۸ Weibull}$$

$$F(x) = \frac{\Gamma_{x/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}; \quad \Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt (\alpha > 0) \quad \text{رابطه ۹ Gamma}$$

$$\Gamma_x(\alpha) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (\alpha > 0)$$

$$F(x) = \varphi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right); \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt \quad \text{رابطه ۱۰ Normal}$$

نتایج

نتایج پیش‌بینی سری زمانی بارش و دبی با

استفاده از مدل SDSM

پس از کنترل کیفی داده‌های مشاهداتی روزانه بارش و دبی دوره زمانی (۲۰۱۸-۱۹۸۶)، شبیه‌سازی این دو متغیر برای ۳۰ سال آینده توسط مدل SDSM انجام شد. در ارزیابی این مدل و مقایسه سری زمانی بارش و دبی دوره پایه با سری‌های زمانی پیش‌بینی شده، از دو معیار $RMSE^{۲۳}$ و $MSE^{۲۴}$ استفاده شد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است.

$$\gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

جدول ۴: خطای میان بارش و دبی مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده

	مهراباد	لتیان	نمرود	آهار	لتیان	فیروزکوه	نمرود	جاجرود
	(بارش)	(بارش)	(بارش)	(بارش)	(دبی)	(دبی)	(دبی)	(دبی)
RMSE	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۵	۳/۷	۰/۳۶	۱/۰۶	۲/۶۷
MSE	-۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۰۵	۱/۰۳	۰/۰۶	-۰/۰۰۱	۱/۴

نسبت به دوره پایه اندک و قابل قبول می‌باشد و هم‌چنین ایستگاه فیروزکوه با $RMSE$ ۰/۳۶ و MSE ۰/۰۶ دارای کم‌ترین خطا و بهترین پیش‌بینی در میان ایستگاه‌های هیدرومتری مورد بررسی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جدول ۴ هر هشت ایستگاه مطالعاتی دارای خطای قابل قبول بوده‌اند و با توجه به کمینه بودن میزان خطا در پیش‌بینی داده‌های بارش می‌توان ادعا نمود که مدل SDSM در پیش‌بینی بارش عملکرد موفق‌تری نسبت به دبی دارد. با این حال خطای دبی شبیه‌سازی

انتخاب مناسب‌ترین توابع توزیع تجمعی

در این بخش با استفاده از ۴ توزیع آماری بر روی مقادیر بارش و دبی ایستگاه‌های مورد بررسی طی دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۵۰ براساس آزمون کلموگروف اسمیرنوف^{۲۶} برحسب P-value به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود که کدام

توزیع برای برازش به داده‌های هر ایستگاه مناسب‌تر است. جداول ۵ و ۶ نتایج رتبه‌بندی توابع مورد بررسی برای داده‌های بارش و دبی پیش‌بینی شده ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری را نشان می‌دهد.

جدول ۵: خصوصیات آماری آزمون کلموگراف اسمیرنوف برحسب داده‌های (بارش) سالانه ایستگاه‌های هواشناسی

توابع توزیع	آهار		نمرود		لتیان		مهرآباد	
	P-Value	رتبه	P-Value	رتبه	P-Value	رتبه	P-Value	رتبه
GAMMA	۰/۷۳۲	۳	۰/۸۲۶	۳	۰/۹۱۴	۲	۰/۹۲۶	۳
Normal	۰/۵۱۸۶۹	۴	۰/۶۴۸۶۴	۴	۰/۸۱۲۵۸	۴	۰/۸۵۶۵۲	۴
weibull 3p	۰/۸۴۸۵۹	۲	۰/۹۳۳۳۳	۲	۰/۹۳۳۹۲	۱	۰/۹۳۲۴۳	۲
Fatigue life 3p	۰/۹۳۲۷۲	۱	۰/۹۸۵۰۳	۱	۰/۸۷۸۵۵	۳	۰/۹۷۶۲۴	۱
R ²	۰/۹۶۲۸		۰/۹۴۰۷		۰/۹۵۸۸		۰/۹۲۶۶	
ME	-۴/۷۲۴		-۴/۰۵۵۰		-۴/۵۱۴۴۹		-۳/۷۶۷۰۶	
RMSE	۵/۰۳۶۰		۴/۱۸۲۶۰۳		۴/۶۵۲۰۲۹		۳/۹۲۴۰۱	

همان‌طور که در جدول ۵ مشخص شد علی‌رغم این که پژوهشگران تابع گاما را به عنوان تابع پیشنهادی برای محاسبه شاخص SPI معرفی کرده‌اند در هیچ‌کدام از ایستگاه‌های هواشناسی این تابع به عنوان بهترین تابع توزیع انتخاب نگردید. با توجه به مقادیر بالای P-value که در جدول ۵ رتبه‌بندی شده است، در ایستگاه‌های مهرآباد، نمرود و آهار تابع فیتینگ لایف و در ایستگاه لتیان تابع ویبول به‌عنوان برترین توابع توزیع تجمعی انتخاب گردیدند. همچنین مشاهده می‌شود که براساس مقادیر P-value به‌دست آمده، در مجموع توابع سه پارامتری برازش بهتری بر

داده‌های بارش سالانه ایستگاه‌های مورد اشاره در جدول ۵ دارند، به‌طوری که اختلاف مقادیر تا ۰/۱۲ نسبت به توابع دو پارامتری خواهد بود. دلیل وجود اختلاف نسبتاً زیاد ارقام P-value در توابع سه پارامتری با توابع دیگر می‌تواند به گسستگی ارقام ورودی بارش (صفر یا مقادیر مثبت قابل توجه) مربوط باشد. لذا انتخاب کاربر برای انتخاب تابع برازش یافته برای ایستگاه‌های هواشناسی مذکور برای مقادیر بارش پیش‌بینی شده باید از میان توابع سه پارامتری ویبول یا فیتینگ لایف باشد.

جدول ۶: خصوصیات آماری آزمون کلموگراف اسمیرنوف برحسب داده‌های (دبی) سالانه ایستگاه‌های هیدرومتری

توابع توزیع	جاجرود		نمرود		فیروزکوه		لتیان	
	P-Value	رتبه	P-Value	رتبه	P-Value	رتبه	P-Value	رتبه
Fatigue life 3p	۰/۹۴۳۵۱	۳	۰/۹۶۰۳۷	۴	۰/۹۵۲۶۷	۴	۰/۹۸۷	۱

normal	۰/۹۶۵	۱	۰/۹۷۵۶۷	۲	۰/۹۷۲	۱	۰/۸۶۹۹۹	۴
weibull 3p	۰/۹۴۹۱۵	۲	۰/۹۸۹	۱	۰/۹۶۳۹۱	۲	۰/۹۴۲۴۷	۳
GAMMA	۰/۹۲۶۶۹	۴	۰/۹۷۰۲۲	۳	۰/۹۶۱۰۷	۳	۰/۹۷۱۰۷	۲
R ²	۰/۹۵۰		۰/۹۷۶		۰/۹۰۸		۰/۹۲۵	
ME	-۷/۶۳۴		-۳/۸۹۸		-۱		-۶/۴۲۲	
RMSE	۷/۶۵۰		۴/۰۰۲		۱/۳۳۰		۶/۴۵۴	

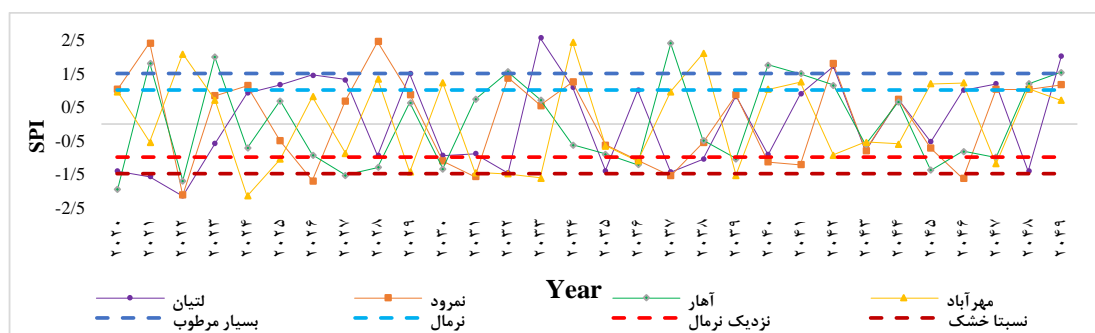
ارزیابی خشکسالی در دوره آینده براساس

شاخص SPI

نتایج حاصل از محاسبه شاخص SPI در شکل ۴ و تجزیه و تحلیل این شاخص برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰ در استان تهران در جدول ۷ آورده شده است. لذا همانطور که انتظار می‌رود، برای شرایط اقلیمی کوهستانی مثل ایستگاه هواشناسی آهار و نظیر هیدرولوژیک آن برای ایستگاه نمرود، وضعیت بیشتر به صورت ترسالی پیش‌بینی شده است. همچنین برای ایستگاه‌های هواشناسی مهرآباد و هیدرومتری شریف‌آباد با شرایط اقلیمی گرم و خشک، وضعیت خشکسالی بسیار شدیدتر و تعداد آن به مراتب بیشتر پیش‌بینی می‌شود. اما برای شرایط نرمال ایستگاه لتیان که معرف هر دو پارامتر اقلیمی پیش‌بینی شده می‌باشد، مقادیر خشکسالی به وضعیت نرمال نزدیکتر است.

با استفاده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف و با توجه به مقدار P-Value، در جدول ۶ رتبه‌بندی تمامی توابع ارائه شد، تابع توزیع نرمال برازش بهتری را برای ایستگاه‌های فیروزکوه و جاجرود نشان می‌دهد، همچنین تابع ویبول بهترین برازش را برای ایستگاه نمرود و تابع فتیگ لایف مناسب‌ترین برازش برای ایستگاه لتیان را نشان می‌دهد.

براساس نتایج به دست آمده در جدول، به واسطه اختلاف اندک مقادیر P-value برای برازش داده‌های دبی پیش‌بینی شده، نمی‌توان به صراحت در مورد انتخاب تابع توزیع اظهار نظر قطعی نمود، لکن رتبه‌بندی نشان می‌دهد که استفاده از تابع نرمال یا سایر توابع سه پارامتری می‌تواند نتایج مشابهی داشته باشد.



شکل ۴: مقادیر شاخص SPI در استان تهران (۲۰۲۰-۲۰۵۰)

جدول ۷: نتایج تجزیه و تحلیل شاخص SPI در استان تهران (۲۰۲۰-۲۰۵۰)

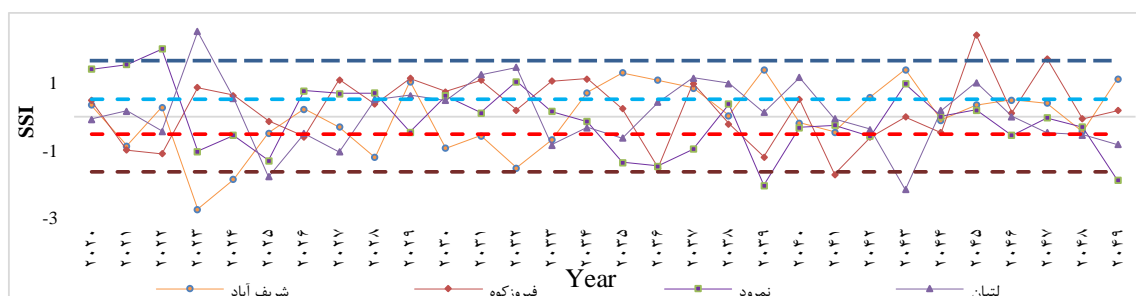
نام ایستگاه	نوع شاخص	تعداد خشکسالی‌های خیلی شدید	تعداد خشکسالی‌های شدید	شدیدترین مقدار خشکسالی
آهار	SPI	۰	۳	-۱/۹۷
لتیان	SPI	۱	۱	-۲/۱۷
مهرآباد	SPI	۱	۲	-۲/۱۶
نمرود	SPI	۱	۴	-۲/۱۳

SPI پیش‌بینی و به‌دست آمده است و در نقطه مقابل شرایط گرم و خشک ایستگاه مهرآباد، خشکسالی شدیدتری در دفعات بیشتر را در آینده تجربه خواهد کرد.

ارزیابی خشکسالی در دوره آینده براساس شاخص SSI

نتایج حاصل از محاسبه شاخص SSI در شکل ۵ و تجزیه و تحلیل این شاخص برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰ در استان تهران در جدول ۸ آورده شده است. با توجه به قرارگیری ایستگاه فیروزکوه در منطقه کوهستانی، انتظار می‌رود که شرایط خشکسالی نه‌چندان شدیدی بر منطقه حاکم شود که این امر در شکل ۵ نتیجه می‌شود و برای اقلیم آباد، وضعیت خشکسالی خیلی شدیدتر پیش‌بینی شده است.

نتایج محاسبه شاخص خشکسالی SPI نشان می‌دهد که، ایستگاه لتیان با مقدار $-2/17$ شدیدترین خشکسالی را در سال ۲۰۲۲ و شدیدترین ترسالی را در سال ۲۰۳۳ با مقدار شاخص $2/56$ در بین تمامی ایستگاه‌ها تجربه خواهد کرد. در طی ۳۰ سال آینده ایستگاه نمرود در ۴ سال غیرمتوالی خشکسالی شدید را تجربه خواهد کرد. در سال‌های آتی برای ایستگاه آهار هیچ‌گونه خشکسالی بسیار شدیدی پیش‌بینی نشده است. میانگین شاخص خشکسالی SPI در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ برای ایستگاه‌های نمرود، لتیان، مهرآباد و آهار به ترتیب $0/055$ ، $0/09$ ، $0/056$ و $0/018$ محاسبه گردید که بررسی این میانگین در ۳۰ سال آینده وضعیت خشکسالی استان تهران را در بازه نزدیک به نرمال نشان می‌دهد. مطابق انتظار برای شرایط اقلیم کوهستانی آهار، کمترین مقدار عددی شاخص



شکل ۵: مقادیر شاخص SSI در استان تهران (۲۰۲۰-۲۰۵۰)

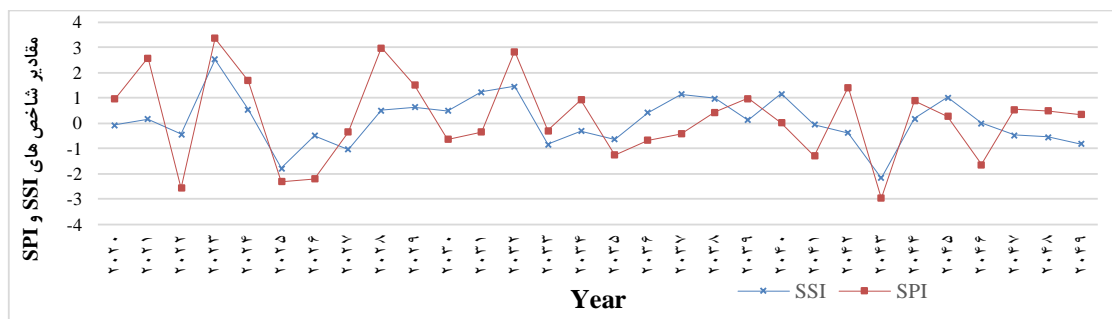
جدول ۸: نتایج تجزیه و تحلیل شاخص SSI در استان تهران (۲۰۲۰-۲۰۵۰)

نام ایستگاه	نوع شاخص	تعداد خشکسالی‌های خیلی شدید	تعداد خشکسالی‌های شدید	شدیدترین مقدار خشکسالی
فیروزکوه	SSI	۱	۷	-۱/۷۲
شریف‌آباد	SSI	۲	۷	-۲/۷۴
لتیان	SSI	۳	۵	-۲/۱۶
نمرود	SSI	۲	۱۰	-۲/۰۴

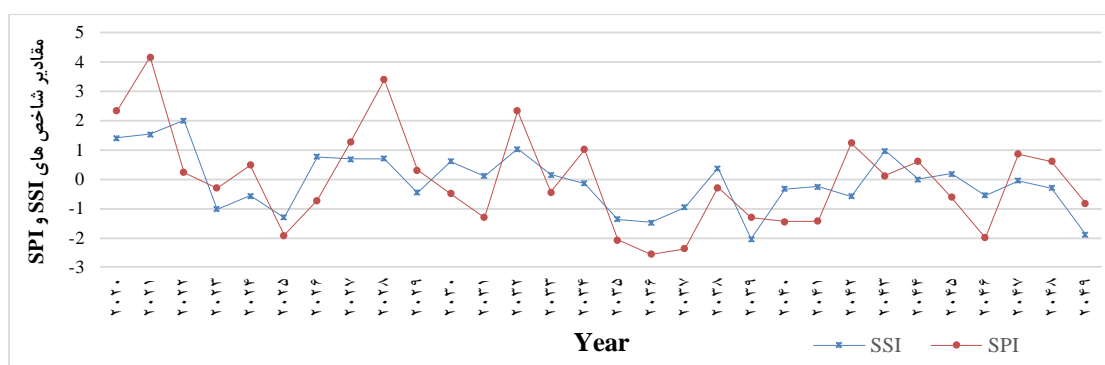
با توجه به نتایج شاخص خشکسالی SSI در جدول ۸ ایستگاه شریف‌آباد با مقدار شاخص -۲/۷۴- شدیدترین خشکسالی را در استان تهران در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. شدیدترین ترسالی در ایستگاه لتیان با مقدار ۲/۵۱ در سال ۲۰۲۳ برآورد شده است. در ۳۰ سال آبی ایستگاه لتیان ۳ خشکسالی خیلی شدید غیر متوالی و ایستگاه نمرود ۱۰ خشکسالی شدید را تجربه خواهد کرد. همچنین مقادیر میانگین شاخص خشکسالی SSI آینده برای تمامی ایستگاه‌ها وضعیت نرمال را پیش‌بینی نموده است.

هیدرولوژیک SSI براساس داده‌های دبی جریان سطحی استاندارد شده برای استان تهران محاسبه گردید. در بین تمامی ایستگاه‌های استان تهران تطابق دو شاخص خشکسالی فوق در دو ایستگاه لتیان و نمرود مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. با توجه به استفاده از توابع توزیع انتخاب شده برای هر سری از ایستگاه‌های موردنظر، مشاهده می‌شود که وضعیت خشکسالی و یا ترسالی و شیب تغییرات عددی هریک، براساس دو شاخص با دو کمیت متفاوت، نتایج مشابهی داشته است. بدین معنا که استفاده از توابع توزیع پیشنهادی، درصد خطای وضعیت پیش‌بینی را به شدت کاهش داده است، لکن برای تعیین مقدار دقیق عددی شاخص باید حتماً از یک مدل پیش‌بین دیگر استفاده نمود.

تطابق شاخص‌های خشکسالی SSI و SPI برای دوره آبی
پیش‌بینی شاخص خشکسالی هواشناسی SPI بر پایه داده‌های بارش و شاخص خشکسالی



شکل ۶: تطابق شاخص‌های SSI و SPI در ایستگاه لتیان (۲۰۲۰-۲۰۵۰)



شکل ۷: تطابق شاخص‌های SSI و SPI در ایستگاه نمرود (۲۰۲۰-۲۰۵۰)

جدول ۹: میانگین نمایه‌های خشکسالی SSI و SPI برای ایستگاه لتیان و نمرود

نمرود		لتیان		ایستگاه
SSI	SPI	SSI	SPI	
۰/۳۷۱۳	۰/۵۰۸۷	۰/۰۵۱۵	-۰/۰۳۸۲	2020-2030
۰/۳۷۱۱	-۰/۲۵۴۶	۰/۴۰۴۳	-۰/۰۱۷۷۲	2030-2040
۰/۲۷۹۹	۰/۰۱۸۵	۰/۲۱۲۱	۰/۰۳۸۲۱	2040-2050

خشکسالی SSI و SPI آتی (۲۰۲۰-۲۰۵۰) مورد استفاده قرار گرفت. سپس در مرحله بعد، شبیه‌سازی داده‌های بارش و دبی با استفاده از مدل CanESM2 تحت سناریو انتشار RCP4.5 و مدل ریز مقیاس SDSM انجام شد. نتایج سایر مطالعات مشابه نشان دهنده کارایی مدل SDSM در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی است. برای مثال شی و همکاران (shi et al, 2007) در چین با استفاده از SDSM و مدل HadCM3 متغیرهای اقلیمی مانند بارندگی و دما را شبیه‌سازی نمودند، نتایج بیانگر عملکرد خوب مدل در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی بود. (Lopes, 2008) با یک بررسی درون مقایسه‌ای به تحلیل عدم قطعیت‌های دو مدل SDSM و LARS-WG پرداخت. مقایسه نتایج روشن ساخت که هر دو مدل عملکرد قابل قبولی دارند. اما مدل SDSM در پیش‌بینی دما بهتر عمل کرده است. در تحقیق حاضر به منظور افزایش دقت در ارزیابی خشکسالی دوره‌های آتی از توابع توزیع تجمعی گوناگونی

سری زمانی نمایه خشکسالی SSI و SPI تحت سناریو RCP4.5 و مدل ریزمقیاس SDSM طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ در ایستگاه‌های لتیان و نمرود به ترتیب در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است که نشان دهنده دقت و صحت قابل قبول نتایج پیش‌بینی این دو شاخص در هر دو ایستگاه می‌باشد. با توجه به جدول ۹ که میانگین نمایه‌های خشکسالی مدل ریز مقیاس SDSM برای ایستگاه‌های لتیان و نمرود را نشان می‌دهد، میانگین نمایه SSI در هر دو ایستگاه مقادیر مثبت و میانگین شاخص SPI در اکثر دوره‌های ده ساله ایستگاه لتیان منفی محاسبه شده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه اطلاعات ۳۲ سال (۲۰۱۸-۱۹۸۶) بارش روزانه و دبی روزانه ۸ ایستگاه هواشناسی و هیدرولوژی در استان تهران که نماینده تمام شرایط اقلیمی موجود هستند، جهت شبیه‌سازی بارش و دبی آینده و سپس محاسبه شاخص‌های

پیشنهاد استفاده از توابع توزیع سه پارامتری برای دیتاهای گسسته نظیر بارش بود که برای ایستگاه‌های هواشناسی حاصل شد ولی برای مقادیر پیش‌بینی شده دبی در ایستگاه‌های هیدرومتری، اختلاف اندکی بین توابع سه پارامتری و توزیع نرمال دیده شد که تفاوتی برای انتخاب وجود ندارد. نتایج پیش‌بینی شاخص SPI نشان داد که تعداد دوره‌های خشکسالی شدید در ایستگاه نمرود در نهایت ۴ مرتبه بوده است و ایستگاه آهار فاقد دوره‌ی خشکسالی بسیار شدید می‌باشد. همچنین نتایج پیش‌بینی شاخص SSI نشان داد، ایستگاه لتیان با ۳ مرتبه، بیشترین تعداد و ایستگاه فیروزکوه با یک رویداد، کم‌ترین تعداد خشکسالی بسیار شدید را دارا می‌باشد. با توجه به تغییرات اندک میزان محاسبه شده برای RMSE به ازای مقادیر خطای میان بارش و یا دبی مشاهده‌ای با مقادیر نظیر پیش‌بینی شده آنها در حدود ۰/۳۵ تا ۳/۷ (جدول ۴) می‌توان بیان کرد که مدل SDSM توانایی شبیه‌سازی داده‌های دبی و بارش در دوره‌های آتی را در منطقه مورد مطالعه دارد. بررسی تطبیقی مقادیر دو شاخص SPI و SSI در دو ایستگاه لتیان و نمرود نشان داد که این دو شاخص هواشناسی و هیدرولوژیک با دقت و صحت قابل قبولی بر هم منطبق‌اند. در مجموع می‌توان اظهار داشت که میانگین شاخص‌های SSI و SPI برای تمامی ایستگاه‌های استان تهران شرایط خشکسالی نرمالی را در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ نشان می‌دهد.

استفاده شد. جهت انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع برای شاخص‌های مورد بررسی در هر ایستگاه از آزمون کلموگروف اسمیرنوف استفاده گردید که نتایج نشان داد با توجه به تغییر موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی هر ایستگاه، مناسب‌ترین تابع توزیع نیز تغییر می‌کند. با وجود این که بسیاری از مطالعات گذشته تابع توزیع تجمعی گاما را برای شاخص SPI پیشنهاد کرده بودند، اما مطالعات اخیر نشان می‌دهد که دیگر توابع دارای برازش مناسب‌تری نسبت به تابع گاما می‌باشند، برای نمونه ولچک و هو (Vlček and Huth, 2009) برای ارزیابی مناسب بودن توزیع گاما برای مقادیر بارندگی روزانه از آزمون‌های کلموگروف - اسمیرنوف و لیلیفورس در ۹۰ ایستگاه از جمهوری چک استفاده کردند. آن‌ها بر تفاوت بودن نتایج حاصل از دو آزمون تاکید کردند و بیان داشتند که مقدار بارندگی زمستانه در بیش از ۴۰ درصد ایستگاه‌های مورد بررسی با توزیع گامای دو پارامتری مطابقت ندارد. ویسنت سرانو (Vicente-Serrano, 2010) به بررسی توابع مختلف سه پارامتری، تابع چگالی احتمال لوگ لجستیک سه پارامتری را دارای بهترین برازش بر مقادیر D_i تشخیص داد. در مطالعه حاضر نیز بر خلاف مطالعات گذشته که برترین تابع توزیع تجمعی را برای شاخص SPI تابع گاما پیشنهاد کرده بودند، در این تحقیق برای ایستگاه‌های آهار، نمرود و مهرآباد برترین تابع فتیگ لایف و در ایستگاه لتیان تابع ویبول در نظر گرفته شد. به-طور مشابه از نتایج پژوهش حاضر، انتخاب و

پانویس

- 1-Standardized Stream flow Index
- 2-Standardized Precipitation Index
- 3-General Circulation Model

- 4-Intergovernmental Panel on Climate Change
- 5-<http://climate-scenarios.canada.ca>
- 6-Fifth Assessment Report

7-International Panel on Climate Change
8-Coupled Model Intercomparison Project-5
9-Representative Concentration Pathways
10-Special Report on Emissions Scenarios
11-Second generation Canadian Earth System model
12-Extremely Wet
13-Sever Wet
14-Moderately Wet
15-Normal
16-Moderately Drought

17-Severe Drought
18-Extremely Drought
19-Fatigue life
20-Weibull
21-Gamma
22-Normal
23-Root Mean Square Error
24-Mean Square Error
25-Kolmogorov-Smirnov test
26-Kolmogorov-Smirnov test

منابع

- احمدآبادی، ع. و صدیقی فر، ز.، ۱۳۹۷. پیش-بینی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز کن براساس مدل ریزمقیاس نمایی آماری، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۱۸، شماره ۵۱، ص ۱۰۳-۱۱۴.
- پیرنیا، ع.، گلشن، م. بیگنه، س. و سلیمان، ک.، ۱۳۹۷. ارزیابی وضعیت خشکسالی در حوضه آبخیز تمر (بالادست سد گلستان) با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI تحت شرایط اقلیمی حال و آینده، نشریه اکوهیدرولوژی، شماره ۵(۱)، ص ۲۱۵-۲۲۸.
- جهانگیر، م.، خوش مشربان، م. و یوسفی، ح.، ۱۳۹۴. پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد (SPI) و شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (مطالعه موردی: استان‌های تهران و البرز)، اکوهیدرولوژی، شماره ۲(۴)، ص ۴۱۷-۴۲۸.
- دهقان، ز.، فتحیان، ف. و اسلامیان، س.، ۱۳۹۴. ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های IDW، SDSM و LARS-WG برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس کردن دما و بارش، آب و خاک، شماره ۲۹(۵)، ص ۱۳۷۶-۱۳۹۰.
- رحیمی، ر. و رحیمی، م.، ۱۳۹۷. تحلیل مکانی و زمانی تغییر اقلیم در سال‌های آینده و مقایسه روش‌های ریزمقیاس‌نمایی SDSM، LARS-WG و شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: استان خوزستان)، نشریه اکوهیدرولوژی، شماره ۵(۴)، ص ۱۱۶۱-۱۱۷۴.
- رسولی، ع.، جهانبخش، س. و قاسمی، ا.، ۱۳۹۳. بررسی ارتباط بین پارامترهای مهم ابر و بارش روزانه در ایران، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۲۹(۱)، ص ۲۳-۴۲.
- رضایی، م.، نهستانی، م.، رضایی، م. و میرکازهی ریگی، م.، ۱۳۹۳. بررسی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در دو اقلیم خشک و فراخشک (مطالعه موردی: کرمان و بم)، نشریه پژوهش‌های مدیریت حوزه آبخیز، دوره ۵، شماره ۱۰، ص ۱۱۷-۱۳۱.
- زارعی، ع.، مقیمی، م. و محمودی، م.، ۱۳۹۵. مدل‌سازی و پیش‌بینی خشکسالی فصلی با استفاده از شاخص RDI و مدل‌های سری زمانی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تهران)، مهندسی اکوسیستم بیابان، شماره ۱۱، ص ۱۰۵-۱۱۶.
- سلاجقه، ع.، رفیعی ساردویی، ا.، مقدم نیا، ع.، ملکیان، آ.، عراقی نژاد، ش.، خلیقی سیگارودی، ش. و صالح پورجم، ا.، ۱۳۹۶. بررسی کارایی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی دما و بارش، تحقیقات آب

- و خاک ایران، شماره ۴۸(۲)، ص ۲۵۳ تا ۲۶۲.
- علیزاده، ا.، ۱۳۹۴. اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا، ۹۴۲ ص.
- عینی، م.، جوادی، س.، دلاور، م. و دارند، م.، ۱۳۹۷. ارزیابی داده‌های بارش پایگاه ملی اسفزاری در برآورد رواناب و پایش خشکسالی منطقه‌ای، اکوهیدرولوژی، شماره ۵(۱)، ص ۹۹-۱۱۰.
- کریمی، م.، ستوده، ف. و رفعتی، س.، ۱۳۹۷. تحلیل روند تغییرات و پیش‌بینی پارامترهای حدی دمای ناحیه جنوبی دریای خزر، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۱۸(۴۸)، ص ۷۹-۹۳.
- یوسفی، م.، نوحه گر، ا.، خسروی، ز. و عزیز آبادی فراهانی، م.، ۱۳۹۴. مدیریت و پهنه‌بندی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI و RDI مطالعه موردی: استان مرکزی، نشریه اکوهیدرولوژی، شماره ۲(۳)، ص ۳۳۷-۳۴۴.
- نوروزی، ا.، رستمی، ن. و جهانگیر، م.، ۱۳۹۷. پیش‌بینی وضعیت خشکسالی طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۳۷ تحت رویکرد تغییر اقلیم (مطالعه موردی: ایستگاه‌های ایلام و دهلران)، شماره اکوهیدرولوژی، شماره ۵(۳)، ص ۹۷۷-۹۹۱.
- Abramowitz, M. and Stegun, I.A., 1965. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical table. In US Department of Commerce, National Bureau of Standards Applied Mathematics series 55.
- Arora, V.K., Scinocca, J.F., Boer, G.J., Christian, J.R., Denman, K.L., Flato, G.M., Kharin, V.V., Lee, W.G. and Merryfield, W.J., 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases, *Geophysical Research Letters*, 38(5), Doi 10.1029/2010 gl046270.
- Bazrafshan, J. and Khalili, A., 2013. Spatial Analysis of Meteorological Drought in Iran from 1965 to 2003. *Desert*, v. 18(1), p. 63-71.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S. and Tebaldi, C., 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 27(12), p. 1547-1578.
- Jain, V.K., Pandey, R.P., Jain, M.K. and Byun, H.R., 2015. Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin, *Weather and Climate Extremes*, v. 8, p. 1-11.
- Kabiri, R., Kanani, V. and Andrew, C., 2012. Climate Change Impacts on River Runoff in Klang Watershed in West Malaysia. *J. Clim. Res*, v. 48, p. 57-71.
- Lee, K., Ahn, J., Kim, B., Jung, T., Lee, S., Lim, M., Moon, C.R., Jung, S., Lee, J., Kim, H. and Lee, D., 2011. SNR Performance Comparison of 1.4 um Pixel: FSI, Light-guide, and BSI. *IISW2011*, 3 p.
- Liu, X., Xu, X., Yu, M. and Lu, J., 2016. Hydrological drought forecasting and assessment based on the standardized stream index in the Southwest China, *Procedia Engineering*, v. 154, p. 733-737.
- Lopes, P.M.D.A.G.G., 2008. Assessment of climate change statistical downscaling methods: Application and comparison of two statistical methods to a single site in Lisbon (Doctoral dissertation, FCT-UNL).
- Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S.M. and López-

- Moreno, J.I., 2013. Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns, *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17(1), p. 105-119.
- Madadgar, S. and Moradkhani, H., 2013. A Bayesian framework for probabilistic seasonal drought forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, v. 14(6), p. 1685-1705.
- M McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993. January. The relationship of drought frequency and duration to time scales, In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, v. 17(22), p. 179-183.
- Fenta Mekonnen, D. and Disse, M., 2018. Analyzing the future climate change of Upper Blue Nile River basin using statistical downscaling techniques, *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 22(4), p. 2391-2408.
- Oguntunde, P.G., Abiodun, B.J. and Lischeid, G., 2017. Impacts of climate change on hydro-meteorological drought over the Volta Basin, West Africa, *Global and Planetary Change*, v. 155, p. 121-132.
- Prediction of Climate Change Induced Hydrogeomorphology by using SDSM in CAN Watershed, 2018. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, v. 18(51), p. 103-114.
- Samadi, S., Ehteramian, K. and Sarraf, B.S., 2011. SDSM ability in simulate predictors for climate detecting over Khorasan province. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 19, p. 741-749.
- Shi, J., Wang, H., Xu, J., Wu, J., Liu, X., Zhu, H. and Yu, C., 2007. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. *Environmental Geology*, v. 52(1), p. 1-10.
- Uml, M.J., Kim, Y., Park, D. and Kim, J., 2017. Effects of different reference periods on drought index (SPEI) estimations from 1901 to 2014. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21(10), p. 4989-5007. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4989-2017>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I., 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index, *Journal of climate*, v. 23(7), p. 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C. and Morán-Tejeda, E., 2011. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17(2), p. 318-332.
- Vlček, O. and Huth, R., 2009. Is daily precipitation Gamma-distributed?: Adverse effects of an incorrect use of the Kolmogorov-Smirnov test?, *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 93(4), p. 759-766.
- Wilby, R.L. and Dawson, C.W., 2007. SDSM 4.2-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User manual, 94 p.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow, E.M., 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, v. 17(2), p. 145-157.
- Zheng, B., Lei, K., Liu, R., Song, S. and An, L., 2014. Integrated biomarkers in wild crucian carp for early warning of water quality in Hun River, North China, *Journal of Environmental Sciences*, v. 26(4), p. 909-916.