

## پایش خشکسالی در استان تهران با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM

وحید نجفی<sup>۱</sup>، آزاده اربابی سبزواری<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

۲. دانشیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۲/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۵/۰۹)

### چکیده

خشکسالی پدیده‌ای اقلیمی است که بخش‌های مختلف محیط زیست را طی دوره استمرار خود تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیشتر سیستم‌های ارزیابی خشکسالی بر مبنای داده‌های بارش استوارند. با وجود این، کوتاه بودن دوره آماری بسیاری از داده‌ها، تراکم ناکافی ایستگاه‌ها و کیفیت نامطلوب داده‌های باران‌سنجی زمینی، توانایی نشان دادن الگوی مکانی خشکسالی را کاهش می‌دهد. از این‌رو، هدف تحقیق حاضر پایش خشکسالی در استان تهران با استفاده از داده‌های شبکه‌ای بارش است. به این منظور، از داده‌های بارش ماهانه شش ایستگاه همدید در استان تهران و داده‌های ماهانه بارش ماهواره TRMM با قدرت تفکیک مکانی  $0.25 \times 0.25$  درجه جغرافیایی طی دوره ۱۹۹۸-۲۰۱۹ استفاده شده است. نتایج نشان داده است خروجی شاخص SPI ۱۲ ماهه برای نقاط TRMM همخوانی مناسبی با ایستگاه‌های همدید دارد و ویژگی‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مختلف همسو و منطبق با نقاط مختلف شبکه TRMM است. در ۳۶ درصد دوره مطالعه شده بارش استان در محدوده نرمال و در ۶۴ درصد آن، شاهد ناهنجاری بارش هستیم. در همه نقاط استان فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب با هم برابر هستند و هر یک  $31/8$  درصد را به خود اختصاص داده‌اند. از نظر شدت، بیشتر ناهنجاری‌های بارش در استان تهران از نوع ملایم و متوسط هستند، به طوری که فراوانی خشکسالی ملایم ۱۸ درصد، خشکسالی متوسط ۹ درصد و خشکسالی شدید حدود  $4/5$  درصد است. رخداد بسیار شدید خشکسالی در هیچ‌یک از نقاط استان طی ۲۲ سال اخیر به وجود نیامده است. همچنین، سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ شدیدترین دوره‌های خشکسالی فراگیر در استان محسوب می‌شوند که بیشتر مناطق در این سال‌ها از خشکسالی متوسط تا شدید رنج می‌برند.

**کلیدواژگان:** پایش خشکسالی، داده‌های شبکه‌ای، شاخص SPI، ماهواره TRMM.

## مقدمه

خشکسالی از جمله مخاطرات اقلیمی بسیار پیچیده است، که بیش از هر مخاطره دیگر انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱] و هرساله بدون توجه به تفاوت‌های سیاسی و اقتصادی، همچنین بدون توجه به هشدار و مرزهای شناخته‌شده به وقوع می‌پیوندد [۲]. این پدیده از ویژگی‌های طبیعی آب‌وهوا است که در تمامی مناطق اقلیمی رخ می‌دهد [۳] و سالانه بیش از نیمی از کره زمین [۴] در معرض آن قرار دارند. خشکسالی نوعی مخاطره طبیعی است، اما با یک سیمای تکرارشونده آشنا است که با سایر مخاطرات تفاوت دارد [۵]. نخست برای آنکه مخاطره‌ای خزنده است و بعضی اوقات بیش از چندین سال حضور دارد و دوم اینکه به وضعیت توپوگرافی خاصی محدود نمی‌شود و تأثیر آن می‌تواند بر مناطق وسیعی گسترش یابد [۶]. افزون بر تأثیرات مستقیمی که خشکسالی روی بخش‌های مختلف اکوسیستم‌های طبیعی از جمله منابع آب، کشاورزی، محیط زیست و ساختارهای اقتصادی و اجتماعی دارد [۷ و ۸]؛ این پدیده می‌تواند آثار ثانویه بیشتری را بر جای گذارد، از آن جمله می‌توان به توفان‌های گرد و غبار، آتش‌سوزی جنگل‌ها، بیماری‌های ناشی از حشرات، کاهش سطح بهداشت عمومی اشاره کرد که به‌نوبه خود سبب بروز مشکلاتی برای موجودات زنده و به‌ویژه بشر می‌شوند [۹]. بنابراین، خشکسالی از مزمن‌ترین و زیان‌بارترین مخاطرات طبیعی است که در بین بلایای طبیعی تهدیدکننده انسان و محیط زندگی او، هم از نظر فراوانی وقوع و هم از نظر خسارت‌های مالی و حتی جانی در رده اول قرار دارد [۱۰]. به همین دلیل، این پدیده همواره مورد توجه متخصصان علوم مختلف همچون متخصصان اقلیم‌شناسی، هیدرولوژی و کشاورزی است و تا کنون مطالعات فراوانی را با روش‌های مختلف از جمله شاخص SPI از معروف‌ترین شاخص‌های پایش خشکسالی است، انجام داده‌اند.

به همین منظور، مک کی و همکاران (۱۹۹۳) در ایالت‌های کلرادوی آمریکا [۱۱]، پیترز و همکاران (۲۰۰۶) در انگلیس [۱۲]، ادوسا و همکاران (۲۰۱۰) در اتیوپی [۱۳]، اکبری و همکاران (۲۰۱۵) در حوضه آبخیز چنار- راهداری [۱۴]، سبرال و همکاران (۲۰۱۹) در برزیل [۱۵]، یردلن و همکاران (۲۰۲۱) در ترکیه [۱۶]، فرج‌زاده و احمدیان (۱۳۹۳) در پهنه ایران [۱۷]، معدنچی و همکاران (۱۳۹۸) در استان کرمان [۱۸] و مزیدی و همکاران (۱۴۰۰) در اصفهان [۱۹] با استفاده از شاخص SPI به بررسی خشکسالی پرداخته‌اند. کاهش

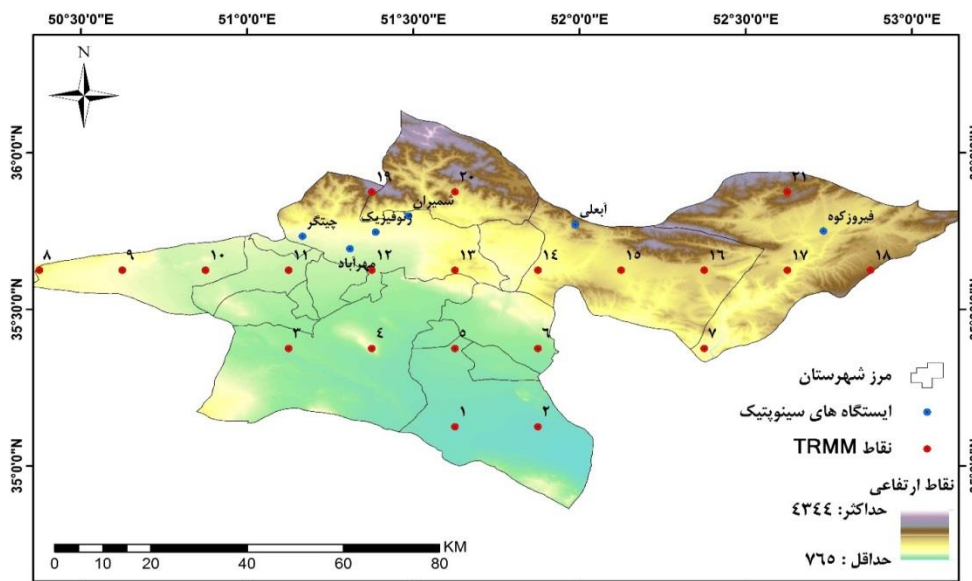
پیامدهای خشکسالی، نیازمند مدیریت، مطالعه و پایش مستمر این پدیده است [۲۰]، اما به دلایل مختلف اندازه‌گیری بارش به عنوان دلیل اصلی رخداد خشکسالی در بسیاری از نقاط جهان به‌ویژه کشورهای در حال توسعه همانند ایران با مشکل مواجه است. دلیل این محدودیت، عدم توزیع مناسب و کافی ایستگاه‌های هواشناسی و در دسترس نبودن آمار طولانی‌مدت بارش در ایران است که پیچیدگی واکاوی بارش در کشور را دوچندان کرده است [۲۱]. امروزه سامانه اطلاعات جغرافیایی و فنون سنجش از دور، به طور وسیعی در ارزیابی و پایش خشکسالی استفاده می‌شوند و گسترش ماهواره‌های هواشناسی از جمله TRMM پتانسیل جدیدی برای برآورد بهتر و دقیق‌تر بارندگی در نواحی که اندازه‌گیری‌ها و دیدبانی‌های زمینی محدود هستند، ایجاد کرده است [۲۲]. برای نمونه، نومن و همکاران (۲۰۱۲) در آفریقا در محدوده حوضه رودخانه لانگانگ [۲۳]، دیو و همکاران (۲۰۱۳) در استان شاندونگ چین [۲۴]، یان و همکاران (۲۰۱۴) در حوضه‌های چین [۲۵]، و همچنین عرفانیان و همکاران (۱۳۹۳) در استان فارس [۲۲]، غفوریان و همکاران (۱۳۹۳) در استان خراسان رضوی و احمدی و همکاران (۱۳۹۶) در شمال غرب کشور [۲۶] با استفاده از داده‌های بارش TRMM به پایش خشکسالی پرداختند. نتایج این تحقیقات نشان داد انطباق خوبی بین داده‌های بارش این سنجنده و ایستگاه‌های زمینی وجود دارد و استفاده از داده‌های TRMM با قدرت تفکیک مکانی زیاد برای پایش خشکسالی عملکرد بسیار مناسبی دارد. استان تهران با جمعیتی حدود ۱۲ میلیون نفر، پرجمعیت‌ترین استان کشور است و بیش از ۱۶ درصد از مردم ایران در آنجا زندگی می‌کنند. این در حالی است که وسعت استان کمتر از ۱ درصد کل کشور است. علاوه بر این، تهران مهم‌ترین قطب صنعتی کشور است و نیاز آبی آن بیش از سایر مناطق ایران است. بنابراین، پایش خشکسالی در این استان اهمیت قابل توجهی دارد. علاوه بر این، انجام مطالعه حاضر بر اساس داده‌های شبکه‌ای برخوردار از تفکیک مکانی زیاد نظیر TRMM با توجه به تغییرات اقلیمی دهه‌های اخیر و افزایش نیاز آبی در بخش‌های مختلف استان تهران اهمیت و ضرورتی دو چندان دارد.

## داده‌ها و روش تحقیق

در پژوهش حاضر از داده‌های بارش ماهانه ایستگاه‌های همیدی استان تهران و داده‌های بارش ماهواره TRMM طی

مهرآباد به نمایندگی از استان تهران با روش‌های مختلف آماری توسط میری و همکاران (۱۳۹۸ و ۱۳۹۵) تأیید شده‌اند [۲۱ و ۲۷]. پس از دریافت و آماده‌سازی داده‌ها، از شاخص SPI برای پایش خشکسالی استفاده شد و ویژگی‌های مختلف خشکسالی (فراوانی و شدت) در مقیاس ۱۲ ماهه که معرف وضعیت سالانه است، ارزیابی شد.

دوره ۱۹۹۸-۲۰۱۹ استفاده شده است. داده‌های ایستگاهی از سازمان هواشناسی کل کشور و داده‌های شبکه‌بندی شده بارش ماهانه TRMM با قدرت تفکیک مکانی  $0.25 \times 0.25$  درجه جغرافیایی طی دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۹ از سایت نوآ و تارنمای Giovanni دریافت و با استفاده از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی استخراج شده و پردازش شدند (شکل ۱). کیفیت داده‌های یادشده در سطح کشور و از جمله ایستگاه



شکل ۱. نقشه منطقه مطالعه شده و پراکنش ایستگاه‌های همدیدی و نقاط شبکه TRMM در استان تهران

$$\bar{a} = \frac{1}{4A} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \bar{\beta} = \frac{x}{\bar{a}} \quad (2)$$

$$A = \ln(x) = \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad \text{که}$$

$n$ ، تعداد مشاهدات بارش است، به علاوه  $x$  میانگین بارش تجمعی برای یک ماه طی دوره آماری است. چون تابع گاما برای  $x = 0$  (بارش صفر میلی‌متر) تعریف نشده و توزیع بارش ممکن است دارای مقادیر صفر باشد، احتمال تجمعی کل که دربرگیرنده مقادیر صفر است به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$H(x) = q + PG(x) \quad (2)$$

که در آن  $q$  احتمال صفر بودن مقدار بارش، و  $P = 1 + q$  است. اگر  $m$  تعداد داده‌های بارش صفر در سری زمانی  $n$  تایی باشد، آن‌گاه  $q$  از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$q = \frac{m}{n} A = \pi r^2 \quad (3)$$

### شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص بارش استاندارد (SPI) توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳) برای تعیین دوره‌های خشکسالی به منظور بهبود وضعیت عملیاتی پایش منابع آب در ایالت‌های کلرادو تدوین شد [۱۱]. این شاخص برای هر منطقه بر پایه داده‌های بلندمدت بارش و برای دوره مطلوب محاسبه می‌شود. محاسبه SPI شامل برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارش برای یک ایستگاه معین است.  $G(X)$ ، احتمالات تجمعی گاما از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$G(x) = \int_1^x x^{a-1} \varepsilon^{-\frac{x}{\beta}} \frac{1}{\beta^a \Gamma(a)} \quad (1)$$

در این رابطه،  $a$  پارامتر شکل،  $\beta$  پارامتر مقیاس،  $x$  مقدار بارش و  $\Gamma(a)$  تابع گاما است. پارامترهای توزیع چگالی احتمال گاما از داده‌های نمونه با روش درست‌نمایی حداکثر برای هر ایستگاه و برای مقیاس زمانی انتخابی و برای هر ماه از سال برآورد می‌شود (رابطه ۲)؛ بنابراین:

$$Z = \text{SPI} = + \left[ t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad (0.5 < H(X) \leq 1)$$

اگر:  $(0 < H(X) \leq 0.5)$

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{H(X)^2} \right]} \quad (7)$$

اگر:  $(0.5 < H(X) \leq 1)$

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(1-H(X))^2} \right]} \quad (8)$$

در این روابط مقدار  $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$  مقادیر ثابت زیر و  $H(X)$  احتمال تجمعی است [۲۸].

$$c_2 = 0.030328$$

$$c_1 = 0.802853$$

$$c_0 = 2.535537$$

$$d_3 = 0.003308$$

$$d_2 = 0.1899269$$

$$d_1 = 3.432788$$

### یافته‌های تحقیق

شکل ۲ درصد فراوانی ناهنجاری‌های منفی و مثبت بارش و همچنین، فراوانی دوره‌های نرمال برای سال‌های مورد مطالعه (۱۹۹۸-۲۰۱۹) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که رخداد ناهنجاری بارش در ایستگاه‌ها و همچنین، نقاط TRMM در استان تهران قابل توجه است و حدود ۶۴ درصد سال‌های مطالعه شده مقدار بارش از حالت بهنجار بلندمدت نوسان داشته است. این در حالی است که حدود ۳۶ درصد سال‌ها مقدار بارش در منطقه مطالعه شده در محدوده نرمال قرار دارد. نکته قابل توجه اینکه درصد رخداد‌های خشکسالی، ترسالی و دوره‌های نرمال برای همه نقاط استان مشابه است و به ترتیب شاهد ۳۱/۸ درصد خشکسالی، ۳۱/۸ درصد ترسالی و ۳۶/۴ درصد دوره نرمال هستیم. این وضعیت مؤید نتایج پژوهش میری و همکاران (۱۳۹۵) است و نشان می‌دهد ماهواره TRMM برآورد خوبی از بارش در پهنه استان تهران دارد؛ چرا که فراوانی دوره‌های خشکسالی و ترسالی به دست آمده از بارش ماهواره با فراوانی خشکسالی و ترسالی به دست آمده از بارش ثبت شده توسط ایستگاه‌های همدیدی در سطح استان با هم متناسب و یکسان هستند.

پس از محاسبه احتمال تجمعی کل مقدار متغیر تصادفی نرمال استاندارد، هم‌احتمال با احتمال یادشده که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است، محاسبه می‌شود که همان مقدار شاخص SPI است. روابط ۵-۸ یا SPI را از روی مقادیر  $H(X)$  ارائه می‌دهد.

(۵)

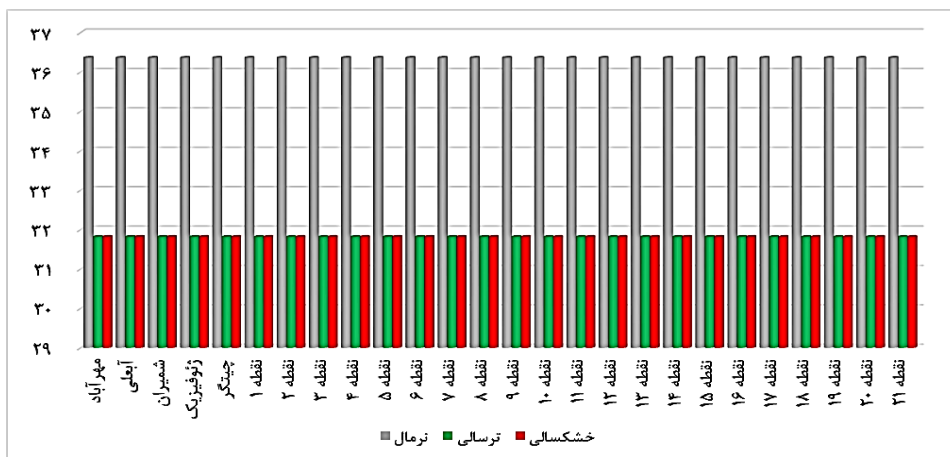
$$Z = \text{SPI} = - \left[ t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad (0 < H(X) \leq 0.5)$$

(۶)

از آنجا که طبقه‌بندی ارائه شده توسط مک کی و همکاران مرز بین خشکسالی و ترسالی (وضعیت نرمال) را لحاظ نمی‌کند و تغییر آستانه از خشکسالی به ترسالی و به عکس بسیار سریع صورت می‌گیرد و با توجه به ویژگی‌های اقلیمی منطقه مطالعه شده و نوسان شدید بارش در مناطق خشک و نیمه خشک کشور از جمله استان تهران، برای پایش و ارزیابی بهتر شدت‌های خشکسالی از طبقه‌بندی مقادیر SPI (جدول ۱) استفاده شده است.

جدول ۱. مقیاس طبقه‌بندی مقادیر SPI [۲۸]

| مقادیر SPI          | طبقه               |
|---------------------|--------------------|
| بزرگ‌تر یا مساوی ۲  | ترسالی بسیار شدید  |
| ۱/۵ تا ۱/۹۹         | ترسالی شدید        |
| ۱ تا ۱/۴۹           | ترسالی متوسط       |
| ۰/۵ تا ۰/۹۹         | ترسالی ملایم       |
| ۰/۴۹ تا -۰/۴۹       | تقریباً نرمال      |
| -۰/۵ تا -۰/۹۹       | خشکسالی ملایم      |
| -۱ تا -۱/۴۹         | خشکسالی متوسط      |
| -۱/۵ تا -۱/۹۹       | خشکسالی شدید       |
| کوچک‌تر یا مساوی -۲ | خشکسالی بسیار شدید |



شکل ۲. درصد فراوانی دوره‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال در استان تهران (۱۹۹۸-۲۰۱۹)

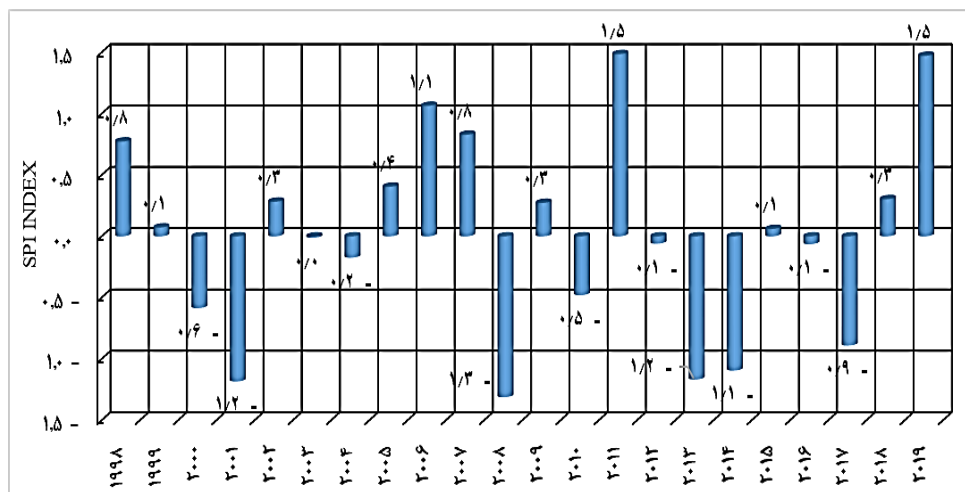
بررسی فراوانی شدت‌های مختلف ناهنجاری بارش (جدول ۲) نشان می‌دهد فراوانی شدت‌های خشکسالی و ترسالی برای تمام پهنه منطقه مطالعه‌شده با هم یکسان است و ناهنجاری بارش در سطح استان تهران معمولاً به طور فراگیر اتفاق می‌افتد.

جدول ۲. فراوانی شدت‌های مختلف ناهنجاری بارش در استان تهران بر حسب درصد (۱۹۹۸-۲۰۱۹)

| ایستگاه  | نرمال | ترسالی ملایم | ترسالی متوسط | ترسالی شدید | خشکسالی ملایم | خشکسالی متوسط | خشکسالی شدید |
|----------|-------|--------------|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| مهرآباد  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| آبعلی    | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| شمیران   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| ژئوفیزیک | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| چیتگر    | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۲   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۳   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۴   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۵   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۶   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۷   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۸   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۹   | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۰  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۱  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۲  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۳  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۴  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۵  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۶  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۷  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۸  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۱۹  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۲۰  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |
| نقطه ۲۱  | ۳۶/۴  | ۱۸/۲         | ۹/۱          | ۴/۵         | ۱۸/۲          | ۹/۱           | ۴/۵          |

با توجه به تعداد زیاد نقاط منتخب در سطح استان (۲۱) نقطه از شبکه TEMM و ۵ ایستگاه سینوپتیک، برای نشان دادن سری زمانی مقادیر SPI ۱۲ ماهه منتهی به ماه دسامبر که بیانگر خشکسالی در مقیاس سالانه است، از میانگین مقادیر SPI در هر سال استفاده شد (شکل ۳). مطابق شکل ۳ همچون وضعیت تمام نقاط، فراوانی دوره‌های ناهنجار بارش بیشتر از دوره‌های هنجار است و رخدادهای خشکسالی و ترسالی از نظم زمانی برخوردار نیستند و در تمام دوره مطالعاتی پراکنده شده‌اند. در اوایل دهه ۲۰۰۰ دو دوره خشکسالی بر کل استان حاکمیت داشته است و پس از آن، شاهد ۴ سال وضعیت نرمال تا سال ۲۰۰۵ هستیم. طی سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ وضعیت غالب استان ترسالی است تا اینکه در سال ۲۰۰۸ شدیدترین خشکسالی ۲۲ سال اخیر در تهران اتفاق افتاده است.

هر چند امکان دارد شدت ناهنجاری در همه نقاط به طور هم‌زمان یکسان نباشد (برای نمونه، مقدار نمره SPI ۱۲ ماهه سال ۱۹۹۸ در ایستگاه ژئوفیزیک ۰/۶۷ و در ایستگاه فیروزکوه ۱/۲ به دست آمده است)، اما در مجموع دوره بلندمدت فراوانی شدت‌های مختلف با هم برابر شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، بیشتر رخدادهای خشکسالی و ترسالی در استان تهران از نوع ملایم هستند و در همه نقاط ۱۸/۲ درصد از ناهنجاری بارش مربوط به ترسالی و خشکسالی ملایم است. در ۹/۱ درصد از مواقع شاهد دوره‌های خشک و مرطوب متوسط هستیم و رخدادهای شدید خشکسالی و ترسالی فقط در ۴/۵ درصد مواقع اتفاق افتاده‌اند. کمینه و بیشینه نمرات SPI برای نقاط منتخب در سطح استان  $\pm 1/95$  به دست آمده که بیان می‌کند خشکسالی و ترسالی‌های بسیار شدید در سال‌های اخیر اتفاق نیفتاده است.



شکل ۳. میانگین شاخص SPI استان تهران در مقیاس سالانه (۱۹۹۸-۲۰۱۹)

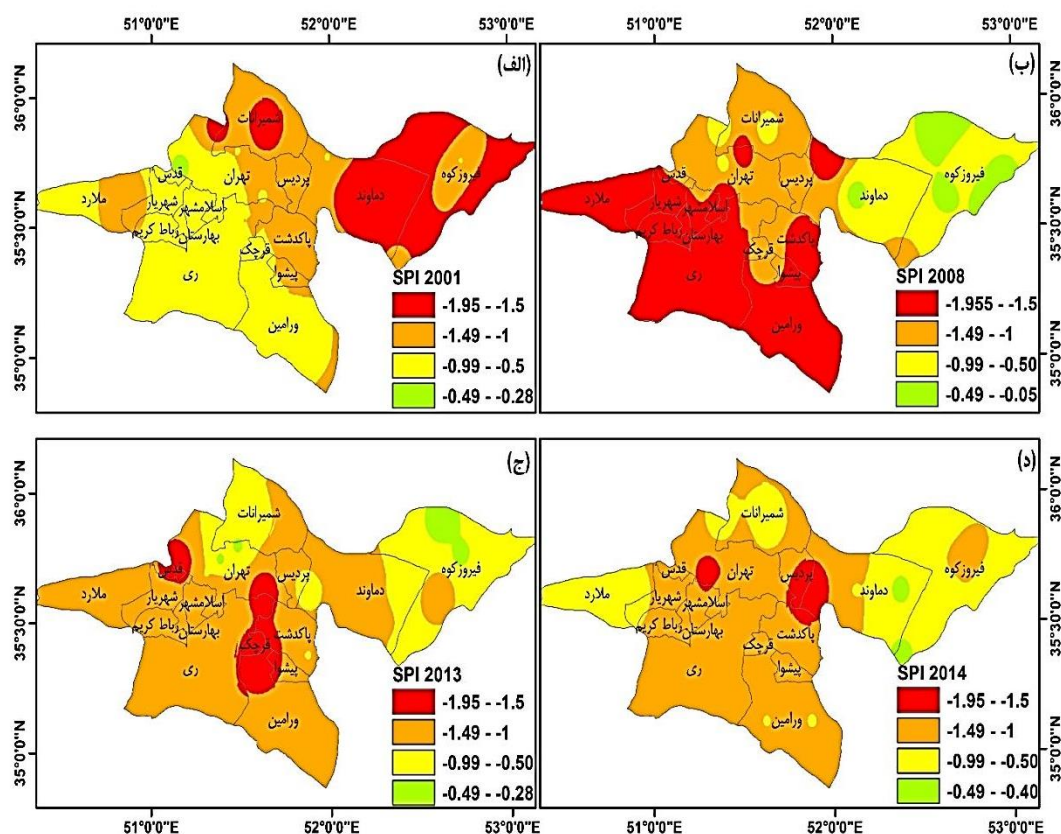
رخداد آن فراگیر و قابل توجه بوده است، به روش IDW<sup>۱</sup> ترسیم شده است. با توجه به شکل ۴ الف، در سال ۲۰۰۱ نواحی شمال شرقی استان و محدوده شمیرانات در شمال درگیر خشکسالی شدید هستند. در نواحی شمالی و شرقی استان مقادیر شاخص SPI در محدوده ۱- تا ۱/۴۹- قرار دارد که گویای حاکمیت خشکسالی متوسط است. در سایر مناطق (نواحی مرکزی، جنوبی و غربی) خشکسالی شدت کمی دارد و غلبه با رخداد ملایم یا ضعیف است. در سال ۲۰۰۸ که شدیدترین خشکسالی سال‌های اخیر اتفاق افتاده است،

در سال‌های پایانی دوره مطالعه شده ناهنجاری بارش در استان تهران تمایل بیشتر به خشکسالی دارد و در ۷ سال اخیر سه دوره خشک فراگیر و نسبتاً شدید در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۷ حادث شده است. در وضعیت میانگین کل استان ۵ رخداد خشک در مقابل ۴ رخداد مرطوب مشاهده می‌شود. از نظر تداوم نیز دوره‌های خشک و مرطوب تفاوتی با هم ندارند و از حداکثر تداوم ۲ ساله برخوردارند. به منظور آگاهی از توزیع مکانی خشکسالی در استان تهران، نقشه پهنه‌بندی این پدیده در سال‌هایی که

1. Inverse Distance Weighting

سال ۲۰۱۳) و قسمت‌هایی از غرب دماوند و شرق پردیس و جنوب تهران (سال ۲۰۱۴) دیده می‌شوند. در بازوی شمال شرق استان و وسعت زیادی از شمیرانات خشکسالی ملایم و ضعیف نمود بیشتری دارد. در این دو سال، گستره قابل توجهی از استان شامل غرب، جنوب، مرکز و شرق آن مقدار شاخص SPI بین -۱ تا -۱/۴۹ قرار دارد که نشان‌دهنده خشکسالی متوسط است.

مناطق غربی و جنوبی استان به خلاف سال ۲۰۰۱، از خشکسالی شدید رنج می‌برند. در قسمت‌های مرکزی و شمالی خشکسالی متوسط حاکمیت داشته است و در شمال شرق تهران (شهرستان‌های فیروزکوه و دماوند) بیشتر نقاط درگیر خشکسالی ملایم بوده‌اند (شکل ۴ ب). مطابق شکل ۴ ج و د، در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ گستره خشکسالی شدید کاهش قابل توجهی دارد و لکه‌هایی از این نوع خشکسالی در حوالی شهر قدس، قرچک، شمال ورامین، غرب پاکدشت (در



شکل ۴. پهنه‌بندی خشکسالی‌های فراگیر در استان تهران (الف: سال ۲۰۰۱، ب: سال ۲۰۰۸، ج: سال ۲۰۱۳ و د: سال ۲۰۱۴)

استان تهران است. بیشتر سیستم‌های ارزیابی خشکسالی بر مبنای داده‌های بارش استوارند. با توجه به اختلاف توپوگرافی شدید در استان تهران، پراکنش نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی و کوتاه بودن طول دوره آماری ایستگاه‌های تازه‌تأسیس، در این تحقیق از داده‌های بارش ماهواره TRMM در کنار داده‌های ایستگاهی استفاده شد. همچنین، شاخص SPI به عنوان یکی از شاخص‌های رایج در تحلیل خشکسالی استان تهران استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که ماهواره TRMM قابلیت خوبی در برآورد بارش و پایش خشکسالی در منطقه مطالعه‌شده دارد، به‌طوری که

### نتیجه‌گیری

آب و بحران آن یکی از چالش‌های بزرگ قرن حاضر و یکی از مشکلات عمده بشریت در آینده، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. در چند دهه اخیر با افزایش جمعیت و توسعه صنایع نیاز آبی استان تهران افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که رخداد خشکسالی و افزایش مصرف موجب فشار بر منابع آب استان شده است. این وضعیت پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی زیادی ایجاد کرده است. از این‌رو، هدف تحقیق حاضر پایش خشکسالی و پهنه‌بندی رخداد‌های فراگیر این پدیده در سطح

- wheat (*Triticum aestivum* L.) drought assessment. *Computers and electronics in agriculture*. 2011 Jul 1;77(2):175-87.
- [2]. Azizi Gh, Safarrad T. Evaluation of conventional kriging methods and weight inverse distance in estimating drought and wetland values of Iran, The first national conference on geomatics in natural resources and environment 2016. [in Persian].
- [3]. Rossi G, Vega T, Bonaccorso B, editors. *Methods and tools for drought analysis and management*. Springer Science & Business Media; 2007 Jul 26.
- [4]. Kogan FN. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997 Apr;78(4):621-36.
- [5]. Wilhite DA. *Drought and water crises: science, technology, and management issues*. Crc Press; 2005 Mar 22.
- [6]. Zarrin A, Salehabadi N, Drought risk prediction in Tehran based on the output of CMIP6 models, Sixth Regional Conference on Climate Change. 2019. [in Persian].
- [7]. Asong ZE, Wheater HS, Bonsal B, Razavi S, Kurkute S. Historical drought patterns over Canada and their teleconnections with large-scale climate signals. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018 Jun 4;22(6):3105-24.
- [8]. Cheng Q, Gao L, Chen Y, Liu M, Deng H, Chen X. Temporal-spatial characteristics of drought in Guizhou Province, China, based on multiple drought indices and historical disaster records. *Advances in Meteorology*. 2018 Jan 1;2018.
- [9]. Rahimi M, *Statistical Analysis - Synonymy of Droughts in Southwest Iran*, Master Thesis, Faculty of Geography, University of Tehran. 2011. [in Persian].
- [10]. Lukamba MT. Natural disasters in African countries: What can we learn about them?. *TD: The Journal for Transdisciplinary Research in Southern Africa*. 2010 Dec 1;6(2):478-95.
- [11]. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* 1993 Jan 17 (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- [12]. Peters E, Bier G, Van Lanen HA, Torfs PJ. Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. *Journal of Hydrology*. 2006 Apr 30;321(1-4):257-75.
- [13]. Edossa DC, Babel MS, Gupta AD. Drought analysis in the Awash river basin, Ethiopia. *Water resources management*. 2010 May;24(7):1441-60.
- [14]. Akbari H, Rakhshandehroo G, Sharifloo AH, Ostadzadeh E. Drought analysis based on standardized precipitation index (SPI) and streamflow drought index (SDI) in Chenar Rahdar river basin, Southern Iran. *Southern Iran, American Society of Civil Engineers*. 2015 Aug 5:11-22.
- [15]. Sobral BS, de Oliveira-Junior JF, de Gois G, Pereira-Júnior ER, de Bodas Terassi PM, Muniz-

دوره‌های ناهنجار بارش، و همچنین، فراوانی و شدت دوره‌های خشکسالی به‌دست‌آمده توسط ایستگاه‌های هواشناسی زمینی، تا حد زیادی همسو و منطبق با نقاط شبکه TRMM است. این نتایج با یافته‌های محققانی همچون عرفانیان و همکاران (۱۳۹۳)، احمدی و همکاران (۱۳۹۶) و نومن و همکاران (۲۰۱۲) که قابلیت ماهواره TRMM در برآورد خشکسالی را مناسب ارزیابی کرده‌اند، مطابقت دارد. خروجی شاخص SPI نشان داد بارش استان تهران در ۳۶/۴ درصد مواقع در محدوده نرمال و در ۶۳/۶ درصد آن خارج از محدوده نرمال است. این وضعیت برای همه نقاط شبکه TRMM و ایستگاه‌های هواشناسی صادق است. نکته قابل توجه اینکه در همه نقاط استان فراوانی دوره‌های مرطوب و خشک هر یک با ۳۱/۸ درصد با هم برابر است. از نظر شدت، بیشتر رخدادهای خشکسالی در دو دهه اخیر از نوع ملایم و متوسط بوده است و بیش از ۸۵ درصد ناهنجاری‌های منفی بارش در محدوده ۰/۵- تا ۱/۵- قرار دارد. همچنین، رخداد بسیار شدید خشکسالی (مقدار شاخص SPI ۲- و کمتر) در استان اتفاق نیفتاده و بیشترین مقدار شاخص SPI در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۱۹، حدود ۱/۹۵- به دست آمده است. خشکسالی در استان تهران تداوم زیادی ندارد و رخداد آن از دو سال پی‌پی تجاوز نکرده است. همچنین، ناهنجاری بارش در کل دوره مطالعه‌شده پراکنده شده است و دوره‌های خشک با دوره‌های مرطوب جبران شده‌اند. به همین دلیل، میانگین نمرات شاخص SPI طی ۲۲ سال اخیر نزدیک به صفر است. البته، در چند سال اخیر رخداد خشکسالی‌ها افزایش یافته و در ۷ سال پایانی دوره مطالعه‌شده ۳ دوره خشک در مقابل یک دوره مرطوب اتفاق افتاده است. سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ از جمله فراگیرترین رخدادهای خشکسالی در استان تهران بوده‌اند. در سال ۲۰۰۸ بیشتر پهنه استان تحت حاکمیت خشکسالی متوسط تا شدید قرار داشتند، اما در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ رخدادهای ملایم تا متوسط گستره بیشتری از استان را درگیر کرده‌اند. از نظر مکانی خشکسالی شدید در محدوده ورامین، قرچک و پاکدشت بیشتر از سایر مناطق اتفاق افتاده است و به‌جز سال ۲۰۰۱، بازوی شمال شرقی استان و محدوده شمیرانات در شمال، کمترین شدت خشکسالی را دارند.

#### منابع

- [1]. Subash N, Mohan HR, Banukumar K. Comparing water-vegetative indices for rice (*Oryza sativa* L.)



- [23]. Naumann G, Barbosa P, Carrao H, Singleton A, Vogt J. Monitoring drought conditions and their uncertainties in Africa using TRMM data. *Journal of Applied meteorology and Climatology*. 2012 Oct;51(10):1867-74.
- [24]. Du L, Tian Q, Yu T, Meng Q, Jancso T, Udvardy P, Huang Y. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013 Aug 1;23:245-53.
- [25]. Yan N, Wu B, Chang S, Bao X. Evaluation of TRMM Precipitation Product for Meteorological Drought Monitoring in Hai Basin. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2014 Mar 18 (Vol. 17, No. 1, p. 012093). IOP Publishing.
- [26]. Ghafourian H, Sanayeenejad H, Davari K. Investigation of determining suitable areas for drought monitoring using TRMM satellite data (Case study: Khorasan Razavi province), *Water and soil*. 2014. 28: 639-648. [in Persian].
- [27]. Ahmadi M, Houshmand A, Zamani F. Drought monitoring in the northwest of the country using MODIS and TRMM data, 24th National Geomatics Conference. 2017. [in Persian].
- [28]. Jahangir Mh, Mousavi M. A Comparative Study of Meteorological (SPI) and Hydrological Drought Index (SSI) Based on the Best Cumulative Distribution Function in Tehran Province. *Iranian Journal of Watershed Management Science & Engineering*. 2020. 14(48): 1-10. [in Persian].
- Júnior JG, Lyra GB, Zeri M. Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO. *Atmospheric research*. 2019 May 15;220:141-54.
- [16]. Yerdelen C, Abdelkader M, Eri E. Assessment of drought in SPI series using continuous wavelet analysis for GEDIZ basin, Turkey. *Atmospheric Research*. 2021 May 25:105687.
- [17]. Farajzade M, Ahmadian K. Temporal and spatial analysis of drought using SPI index in Iran, natural hazards. 2014. 4:1-16. [in Persian].
- [18]. Madanchi P, Shahedi K, Habibnejad M, Soleymani K, Fatehi A. Zoning of climatic droughts and the magnitude of drought using SPI index in Kerman province. *Irrigation and Water Engineering of Iran*. 2019. 38: 205-228. [in Persian].
- [19]. Mazidi A, Omidvar K. Investigation of drought and wetness of Isfahan meteorological station using SPI index. *Geography and human relations*. 2021. 13:657-672
- [20]. Hatmoko W, Seizarwati W, Vernimmen R. Comparison of TRMM satellite rainfall and APHRODITE for drought analysis in the Pemali-comal River Basin. *Procedia Environmental Sciences*. 2016 Jan 1;33:187-95.
- [21]. Miri M, Rahimi M, Norouzi A. Assessing the accuracy of estimating daily precipitation of TRMM and GPM databases versus observational data in Iran, watershed engineering and management. 2019. 4: 978-983. [in Persian].
- [22]. Erfnian M, vafae N, Rezaeean M. Presenting a new method for drought risk assessment in Fars province by combining monthly rainfall data of TRMM satellite and NDVI vegetation index data of Terra / MODIS sensor, *Natural geography researches*. 2014. 87:93-108. [in Persian].