

## ارزیابی شاخص‌های PNI، RAI، SIP و SPI برای پهنه‌بندی شدت خشکسالی ایران با

### مقایسه دو روش درونیابی IDW و مدل ارتفاعی رقومی DEM

محمود خسروی - دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

علیرضا موقری - دانشجوی دکترای آب و هواشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

محمد رضا منصور - دانشجو\* دکترای آب و هواشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۳/۱۵      تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۰۹/۲۰

#### چکیده

خشکسالی پدیده‌ای اقلیمی است که به‌طور دوره‌ای در اثر کمبود رطوبت ناشی از کاهش میزان بارندگی به‌وقوع می‌پیوندد؛ از این‌رو، برای ارزیابی خشکسالی، داده‌های بلندمدت بارش برای هر ایستگاه تحلیل شده است. در این پژوهش برای پهنه‌بندی خشکسالی و ارزیابی مناطق براساس شدت خشکسالی‌های به‌وقوع پیوسته، داده‌های بارش برای ۴۸ ایستگاه سینوپتیک ایران در یک دوره آماری سی‌ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) استخراج شد. سپس با استفاده از چهار شاخص PNI، RAI، SIP و SPI به تعیین شدت خشکسالی در سال ۲۰۰۱، پرداخته شد تا بهترین شاخص برای ارزیابی شدت خشکسالی در کشور تعیین شود. سال ۲۰۰۱، سالی است که خشکسالی فراگیر در دوره آماری بررسی شده برای ایران به‌وقوع پیوسته است. همچنین با استفاده از دو روش تحلیل فضایی درونیابی (IDW) و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) به پهنه‌بندی این شاخص‌ها اقدام شد. در آخر با همپوشانی پهنه‌بندی‌ها مشخص شد که شاخص‌های RAI و PNI از حساسیت بالاتری برخوردار بوده، توزیع مکانی شدت خشکسالی را با دقت بیشتری به نمایش گذاشته‌اند. همچنین با مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی شدت خشکسالی و طبق وابستگی خشکسالی به سیستم‌های جوی، می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل درونیابی بدون دخالت مدل ارتفاعی (DEM) بهترین روش برای ارزیابی شدت خشکسالی است.

کلید واژه‌ها: پهنه‌بندی، درونیابی، شاخص‌های خشکسالی، ArcGIS، DEM

## مقدمه

خشکسالی پدیده‌ای اقلیمی است که به‌طور دوره‌ای در اثر کمبود رطوبت ناشی از کاهش میزان بارندگی به‌وقوع می‌پیوندد. خشکسالی اختلالی موقتی است و با خشکی تفاوت دارد؛ زیرا خشکی فقط محدود به مناطقی با بارندگی اندک است و حالتی دائمی از اقلیم یک منطقه می‌باشد. با این حال این خشکسالی در صورت تداوم، خسارات بسیار گسترده‌ای را در جنبه‌های کشاورزی، هیدرولوژیک و اجتماعی-اقتصادی به‌جای خواهد گذاشت و گاه اثرات غیرمستقیم و مضر آن تا حدی است که می‌تواند به بحران جهانی تبدیل شوند (کاوایانی، ۱۳۸۰: ۸۳)؛ از این‌رو، پهنه‌بندی و پایش خشکسالی بایستی به‌منزله‌ی اصلی مهم در برنامه‌ریزی‌های کلان ملی و منطقه‌ای مدنظر قرار گیرد. به‌طور سیستمی می‌توان گفت، ارزیابی اثر خشکسالی تابعی از شدت و تداوم دوره‌های خشک به‌وقوع پیوسته است. درجه‌بندی برخی حوادث طبیعی مانند سیلاب، زلزله و طوفان‌های حاره‌ای از نظر درجه می‌دهد که خشکسالی در مقایسه با سایر حوادث طبیعی مانند سیلاب، زلزله و طوفان‌های حاره‌ای از نظر درجه شدت، طول مدت، مجموع فضای تحت پوشش، خسارات جانی و مالی و اثرات شدید درازمدت در بالاترین درجه از نظر بزرگی و اهمیت قرار دارد. به‌دلیل ماهیت خشکسالی و بطئی بودن شروع و خاتمه آن، تشخیص و ارزیابی آن مشکل است (مساعدی و همکاران، ۱۳۸۸). به‌طور کلی تداوم و شدت خشکی همگی توابعی هستند که به‌طور صریح و یا غیرصریح به مقیاس زمانی داده‌های اقلیمی وابسته‌اند؛ بنابراین برای ارزیابی خشکسالی، هر شاخصی با توجه به داده‌های آماری بلندمدت هر ایستگاه تحلیل و بررسی می‌شود. پس بررسی خشکسالی به‌صورت یکپارچه در سطح چند ایستگاه نیز زمانی اهمیت خواهد داشت که حداقل بتواند الگوهای مناسبی از پهنه‌بندی شدت یا تداوم خشکسالی‌های به‌وقوع پیوسته را به‌گونه مطلوبی نمایش دهد. نمایش مطلوب خشکسالی هم خود تابعی از شاخص‌های به‌کار گرفته شده در تعیین شدت یا تداوم خشکسالی‌ها و تحلیل فضایی انجام شده برای نمایش پهنه‌بندی آن خواهد بود. بنا به عقیده برخی از پژوهشگران دوره‌های خشک نمی‌توانند تنها تابعی از پارامترهای معمول مانند ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی باشند؛ بنابراین، برای پهنه‌بندی دوره‌های خشک سعی می‌شود، از روش‌های موجود برای درون‌یابی و تحلیل فضایی داده‌های مکانی استفاده شود (انصاری و داوری، ۱۳۸۶). در روش درون‌یابی فضایی که یکی از معمول‌ترین تکنیک‌های میان‌یابی نقاط پراکنده در فضا است، اثر پارامتر مورد‌ارزیابی در یک نقطه بر نقاط اطراف یکسان نیست و نقاط نزدیک بیشتر و نقاط دور کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. البته خشکسالی‌ها تابع این موارد نبوده، مسلماً عوامل متعدد بسیاری در وقوع خشکسالی دخالت دارند که از موضوع پژوهش حاضر خارج است. نیاز به پایش و تعیین شدت و تداوم خشکسالی، پژوهشگران را بر آن داشته است تا از شاخص‌هایی برای پایش دوره خشک و روش‌هایی برای پهنه‌بندی آن استفاده کنند. هدف یک شاخص خشکسالی، تعیین ساده و کمی ویژگی‌های شدت و تداوم دوره‌های خشک است و هدف یک روش پهنه‌بندی ترسیم گستردگی مکانی این پدیده است.

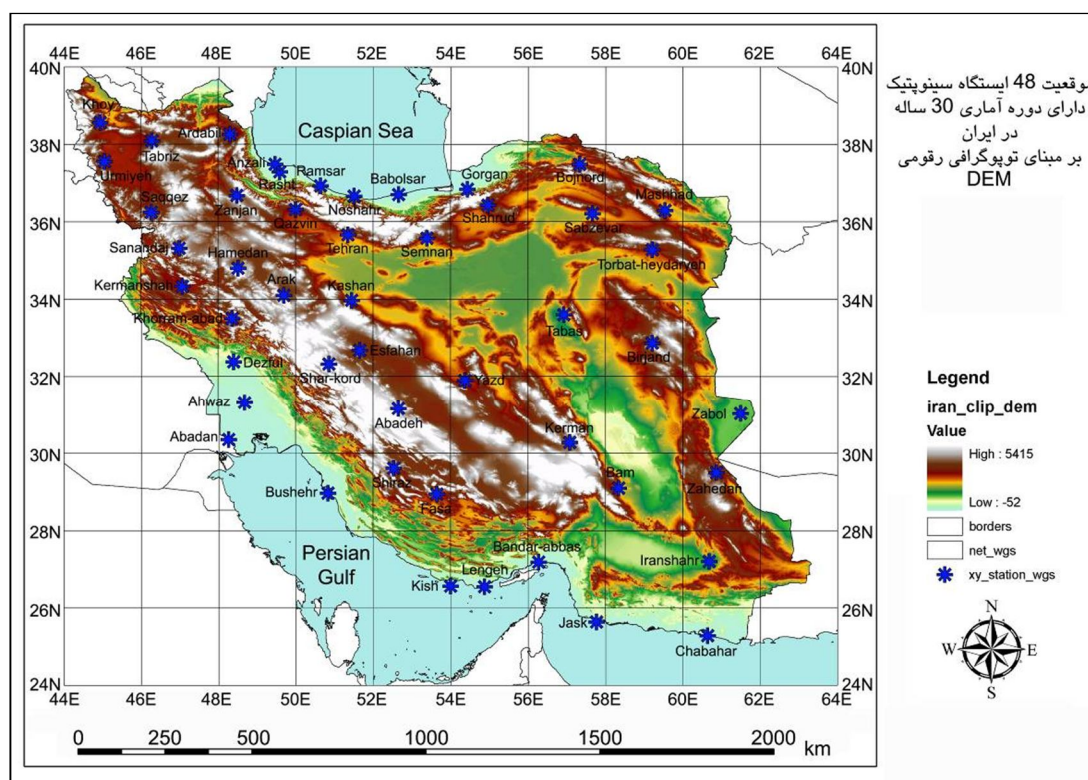
ارائه‌ی شاخصی که در واقع تابعی از عوامل مختلف محیطی و عوامل متأثر از دوره‌های خشک است که در نهایت به صورت یک عدد نمایش داده می‌شود، می‌توان تصویر جامعی از همه این عوامل را فراهم کرده و از آن برای ارزیابی خشکسالی و تصمیم‌گیری درباره آن استفاده کرد. از سوی دیگر، پهنه‌بندی این شاخص‌ها و به‌طور کلی پهنه‌بندی مکانی دوره‌های خشک و توزیع منطقه‌ای آن یکی از ویژگی‌های مهمی است که باعث درک بهتری نسبت به این پدیده و بررسی دقیق‌تر آثار آن می‌شود (انصاری و داوری، ۱۳۸۶). روش‌های عمده پهنه‌بندی خشکسالی‌ها را می‌توان شامل روش‌های درون‌یابی در چهار گروه اصلی IDW<sup>۱</sup>، GPI<sup>۲</sup>، RBF<sup>۳</sup> و Kriging طبقه‌بندی کرد (عیوضی و مساعدی، ۱۳۹۰) که در این بین تکرار استفاده از روش پهنه‌بندی IDW بیشتر بوده است؛ برای مثال در پژوهش‌های (محمدیان و همکاران، ۱۳۸۹؛ شاهیان و همکاران، ۱۳۸۸) مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه پایش و پیش‌بینی خشکسالی و تعیین پهنه‌های درگیر خشکسالی در داخل و خارج کشور انجام شده است. اما بیشتر پژوهش‌های داخلی به صورت تک شاخصی و در مقیاس موردی و نه برای تمام ایران به انجام رسیده است. در روش کار مشابه این پژوهش برنا و همکاران (۱۳۸۹)، در مقیاس محلی استان خوزستان به مقایسه شاخص‌های PNI<sup>۴</sup>، RAI<sup>۵</sup> و SPI<sup>۶</sup> اقدام کرده‌اند که البته نتایج متفاوتی را در شدت و تدام خشکسالی‌های منطقه از خود نشان داده‌اند. پژوهش حاضر یکی از پژوهش‌های اقلیمی در کشور است که با تکیه بر تعداد بیشتری از شاخص‌های اقلیمی به پهنه‌بندی خشکسالی در کل کشور می‌پردازد. در مقاله حاضر هدف اصلی، استفاده از چهار شاخص SPI، RAI، PNI و SPI<sup>۷</sup> برای تعیین شدت خشکسالی در سال ۲۰۰۱ است که خشکسالی فراگیر در سطح ایستگاه‌های سینوپتیک ایران به وقوع پیوسته است. سپس با استفاده از دو روش تحلیل فضایی درون‌یابی و مدل ارتفاعی رقومی (DEM)<sup>۸</sup> به پهنه‌بندی این شاخص‌ها اقدام می‌شود تا در آخر با همپوشانی پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی، در ابتدا، شدت خشکسالی به وقوع پیوسته در طیفی از کم تا زیاد برای ایران نمایش داده شود و در ثانی، با مقایسه دو روش تحلیل فضایی، این شدت با الگوهای مکانی سنجیده شود. پژوهش حاضر این امتیاز را دارد که افزون بر پهنه‌بندی به روش معمول درون‌یابی این مدل را نیز در پهنه‌بندی خشکسالی ایران استفاده می‌کند تا آن را ارزیابی کند. هرچند در روش‌های Kriging و CoKriging هم قابلیت دخالت داده‌های ارتفاعی در مکانیسم زمین آماری آن وجود دارد اما در این مقاله تلاش می‌شود تا دخالت مستقیم داده‌های DEM در پهنه‌بندی فیزیکی مورد توجه قرار گیرد.

1. Inverse Distance Weighting
2. Global Polynomial Interpolation
3. Radial Basis Functions
4. Percentage of Normal Precipitation Index
5. Rainfall Anomaly Index
6. Standard Index of Annual Precipitation
7. Standardized Precipitation Index
8. Digital Elevation Model

## مواد و روش‌ها

## محدوده مطالعاتی

برای پهنه‌بندی خشکسالی و ارزیابی مناطق براساس شدت خشکسالی‌های به‌وقوع پیوسته در قلمرو ایران، داده‌های بارش ۴۸ ایستگاه سینوپتیک کشور برای یک دوره آماری سی‌ساله (۲۰۰۵-۱۹۷۶)، از سایت سازمان هواشناسی ایران دریافت شد. در شکل شماره (۱)، پراکنش این ایستگاه‌ها بر مبنای وضعیت توپوگرافیک آنها در سطح ایران برای موقعیت  $44^{\circ} 00'$  تا  $64^{\circ} 00'$  عرض شمالی و  $24^{\circ} 00'$  تا  $40^{\circ} 00'$  طول شرقی در شبکه WGS\_84 نشان داده شده است.



شکل ۱. پراکنش و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی در سطح ایران

## روش‌شناسی

روش‌شناسی پژوهش حاضر در چند مرحله پیگیری شد. در گام اول تحلیل آماری بارش برای همه ایستگاه‌ها براساس توزیع نرمال استاندارد (Z-Index) به انجام رسید تا بر این اساس سالی که در آن خشکسالی شدید و فراگیر برای ۴۸ ایستگاه سینوپتیک ایران به‌وقوع پیوسته، ثبت شود. شاخص توزیع نرمال استاندارد از رابطه ساده زیر محاسبه می‌شود:

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{\delta} \quad (1)$$

که در رابطه بالا،  $z$  شاخص توزیع نرمال استاندارد است؛  $x_i$ ، متغیر ماهانه یا سالانه است؛  $\bar{x}$ ، میانگین بلندمدت متغیر مطالعاتی است و  $\delta$  انحراف‌معیار متغیر در بلندمدت است. در گام دوم برای سال ۲۰۰۱ که خشکسالی فراگیر آن در ایستگاه‌های کشور ثبت شده بود، ارزیابی شدت خشکسالی سالانه با استفاده از شاخص‌های SPI، RAI، PNI و SIP انجام شد. این روش‌های کاربردی و در عین حال ساده با دخالت فاکتور اصلی بارش قابل‌محاسبه هستند؛ از این‌رو، پس از طبقه‌بندی سی‌ساله (۲۰۰۵-۱۹۷۶) داده‌های بارش برای هر ایستگاه سینوپتیک، برای محاسبه شاخص‌ها از نرم‌افزار (DIC)<sup>۱</sup> که حجازی‌زاده و جوی‌زاده در سال ۲۰۰۷ آن را تولید کرده‌اند، استفاده شد. گفتنی است، برای این منظور الگوی سالانه<sup>۲</sup> در این نرم‌افزار مورد توجه قرار گرفت. در گام سوم، برای پهنه‌بندی شاخص‌های ارزیابی‌شده از روش درون‌یابی و مدل ارتفاعی رقومی DEM در محیط ArcGIS استفاده شد. مبنای پهنه‌بندی در این مرحله شبکه مرجعی در مقیاس سلول‌های ۵×۵ کیلومتری و منطبق بر مختصات ۲.۵×۲.۵ دقیقه در شبکه WGS\_84 بود. در این مرحله نتایج پهنه‌بندی به این دو روش تحلیل فضایی شد و برای این منظور نقشه‌های تولیدشده به تفکیک شاخص‌های مورد استفاده خشکسالی با یکدیگر مقایسه شدند. در گام پایانی، برای تعیین ابعاد شدت خشکسالی روی داده در ایران برای سال ۲۰۰۱، نتایج پهنه‌بندی شاخص‌های مورد استفاده به تفکیک الگوی درون‌یابی یا مدل ارتفاعی رقومی با یکدیگر و با استفاده از عملگر جمع جبری در برنامه ArcGIS ترکیب شدند.

### شاخص درصد از نرمال بارش

شاخص درصد از نرمال بارش (PNPI)<sup>۳</sup> که به‌طور خلاصه شاخص درصد از نرمال (PNI) نیز نامیده می‌شود، ابتدا در سال ۱۹۹۸، ویلک و همکاران آن را توسعه داده‌اند (Willeke et al., 1998). این شاخص براساس اندازه‌گیری داده‌های بلندمدت بارش برای هر ایستگاه و سپس تغییرات درصدی آنها از نرمال بارش بلندمدت بر مبنای ماهانه یا سالانه استوار شده است. برای محاسبه این شاخص از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$PNI = \frac{P_i}{\bar{p}} \times 100 \quad (2)$$

که در رابطه بالا،  $PNI$ ، شاخص درصد از نرمال بارش سالانه برای هر ایستگاه است؛  $P_i$ ، بارش سالانه است و  $\bar{p}$  میانگین بارش در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۵ است. طبقه‌بندی شاخص PNI مطابق آنچه در این پژوهش استفاده شده به‌شرح جدول شماره (۱) است.

1. Drought Indices Calculator
2. Annual
3. Percentage of Normal Precipitation Index

جدول ۱. طبقات شاخص خشکسالی PNI

شاخص (%)	طبقه خشکسالی
>90	Normal and Above
80 – 90	Near Normal
70 – 80	Slightly Drought
55 – 70	Moderately Drought
40 – 55	Severely Drought
<40	Extremely Drought

## شاخص ناهنجاری بارش

شاخص ناهنجاری بارش (RAI) را در سال ۱۹۶۵ «فنروی» توسعه داد (Van Rooy, 1965). اساس این شاخص، محاسبه‌ی انحراف از نرمال بارندگی بلندمدت است. برای محاسبه‌ی این شاخص ابتدا میانگین دراز-مدت بارش  $\bar{p}$  در ایستگاه‌های موردنظر به دست می‌آید. سپس ده مورد از بزرگ‌ترین بارش‌های اتفاق افتاده در دوره آماری به‌منزله‌ی  $\bar{m}$  و ده مورد از کمترین مقادیر بارش‌های دوره آماری به‌منزله‌ی  $\bar{x}$  مشخص می‌شود. آنگاه چنانچه متغیر بارش سالانه  $p$  بزرگ‌تر مساوی میانگین درازمدت بارش  $\bar{p}$  باشد و به‌گفته‌ای ناهنجاری مثبت باشد، از رابطه شماره (۳) و چنانچه این نسبت برعکس باشد و به‌گفته‌ای ناهنجاری منفی باشد، از رابطه شماره (۴) استفاده می‌شود.

$$RAI = +3 \times \left[ \frac{p - \bar{p}}{\bar{m} - \bar{p}} \right] \quad (۳)$$

$$RAI = -3 \times \left[ \frac{p - \bar{p}}{\bar{x} - \bar{p}} \right] \quad (۴)$$

طبقه‌بندی شاخص RAI مطابق آنچه در این پژوهش استفاده شده به شرح جدول شماره (۲) است.

جدول ۲. طبقات شاخص خشکسالی RAI

شاخص	طبقه خشکسالی
> 0.3	Normal and Above
0.3 – -0.3	Near Normal
-0.3 – -1.2	Slightly Drought
-1.2 – -2.1	Moderately Drought
-2.1 – -3.0	Severely Drought
≤ -3.0	Extremely Drought

## شاخص استاندارد بارش سالانه

شاخص استاندارد بارش سالانه (SIAP)<sup>۱</sup> که به‌طور خلاصه شاخص استاندارد بارش (SIP) نیز نامیده می‌شود، از نظر تئوریک همان شاخص نرمال استاندارد بارش یا Z-Index است که بر مبنای استانداردسازی داده‌های بلندمدت بارش هر ایستگاه قابل محاسبه است. برای محاسبه این شاخص از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$SIP = \frac{P_i - \bar{P}}{\delta} \quad (۵)$$

که در رابطه بالا، SIP شاخص استاندارد بارش سالانه برای هر ایستگاه است؛  $P_i$  بارش سالانه است؛  $\bar{P}$  میانگین بارش در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۶ است و  $\delta$  انحراف معیار بارش در بلندمدت سی ساله است. طبقه‌بندی شاخص SIP مطابق آنچه در این پژوهش استفاده شده به شرح جدول شماره (۳) است.

جدول ۳. طبقات شاخص خشکسالی SIP

شاخص	طبقه خشکسالی
> 0.5	Normal and Above
0.5 - -0.5	Near Normal
-0.5 - -1.0	Drought
-1.0 - -3.0	Severe Drought

## شاخص بارش استاندارد شده

«مک کی» شاخص بارش استاندارد شده (SPI)<sup>۲</sup> را ابتدا در سال ۱۹۹۳، برای طبقه‌بندی خشکسالی در منطقه منطقه کلرادو توسعه داد (McKee et al., 1993). این روش در همان زمان به‌طور گسترده‌تری در ایالات متحده آمریکا استفاده شد که از آن دسته می‌توان به کارهای ادوارد و مک کی (۱۹۹۷)، یامو و همکاران (۱۹۹۸) و هایس و همکاران (۱۹۹۹) اشاره کرد. همچنین مقادیر شاخص SPI برای محاسبه خشکسالی ترکیه (Komuscu, 1999) و برای پایش دوره‌های خشک سواحل غربی آفریقا نیز توسعه داده شده‌اند (Agnew and Chappell 1999). در سال‌های اخیر هم می‌توان از کارهای ادوسا و همکاران (۲۰۱۰) برای ایتویپی و واسیلیادس (۲۰۱۰) برای یونان نام برد. امروزه این شاخص از یک مقبولیت قابل قبول و به نسبت عمومی برخوردار است اما متأسفانه برخلاف کاربرد زیاد آن در فعالیت‌های داخل کشور، عده‌ای آن را فقط در رابطه توزیع نرمال استاندارد خلاصه می‌کنند و از تشکیل سری زمانی و برازش توزیع گاما غافل می‌شوند. کاربرد صحیح SPI را برای نمونه می‌توان در پژوهش‌های (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۷؛ منتظری و غیور، ۱۳۸۸؛ نگارش و همکاران، ۱۳۸۹) جست‌وجو کرد. این شاخص بر اساس میانگین متحرک زمانی از داده‌های بارش

1. Standard Index of Annual Precipitation

2. Standardized Precipitation Index

محاسبه می‌شود که در این پژوهش میانگین متحرک برای سه سال مورد توجه بود. به گفته‌ای، متغیر بارش هر سال میانگین بارش آن سال و دو سال قبل در نظر گرفته شد تا به این ترتیب سری زمانی بارش در بلندمدت ساخته شود. سپس برای محاسبه آن توزیعی احتمالاتی مبتنی بر سری‌های تجمعی بارش برازش داده می‌شود که معمولاً از توزیع گاما استفاده می‌شود. پس از محاسبه احتمال تجمعی گاما در سری زمانی، متغیر نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک برای بارش سالانه محاسبه می‌شود که همان شاخص SPI خواهد بود. طبقه‌بندی شاخص SPI مطابق آنچه در این پژوهش استفاده شده به شرح جدول شماره (۴) است.

جدول ۴. طبقات شاخص خشکسالی SPI

شاخص	طبقه خشکسالی
$> 1.0$	Normal and Above
$1.0 - -1.0$	Near Normal
$-1.0 - -1.5$	Moderately Drought
$-1.5 - -2.0$	Severely Drought
$\leq -2.0$	Extremely Drought

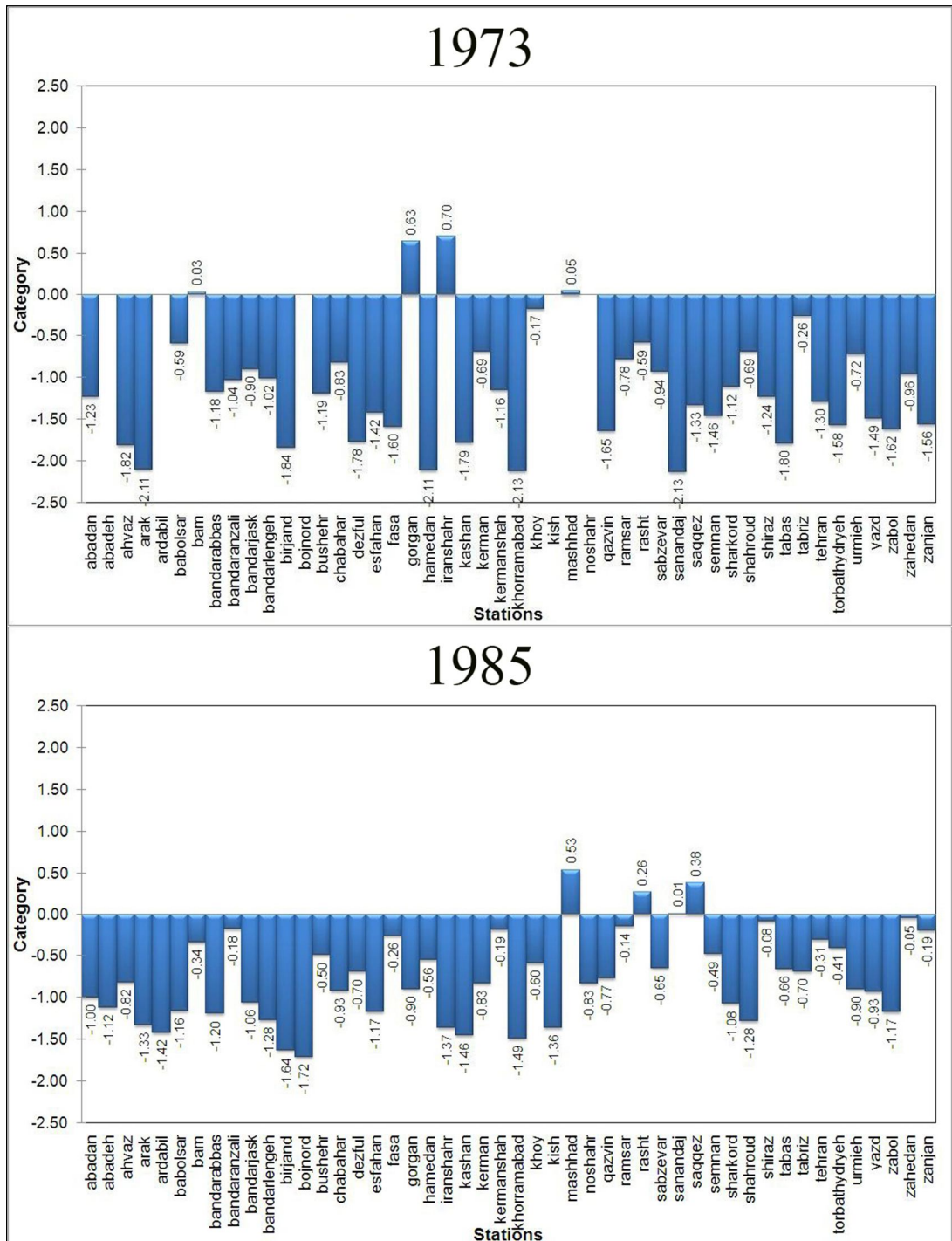
## یافته‌های پژوهش

### تحلیل آماری برای تعیین خشکسالی‌های فراگیر طی سی سال (۲۰۰۵-۱۹۷۶)

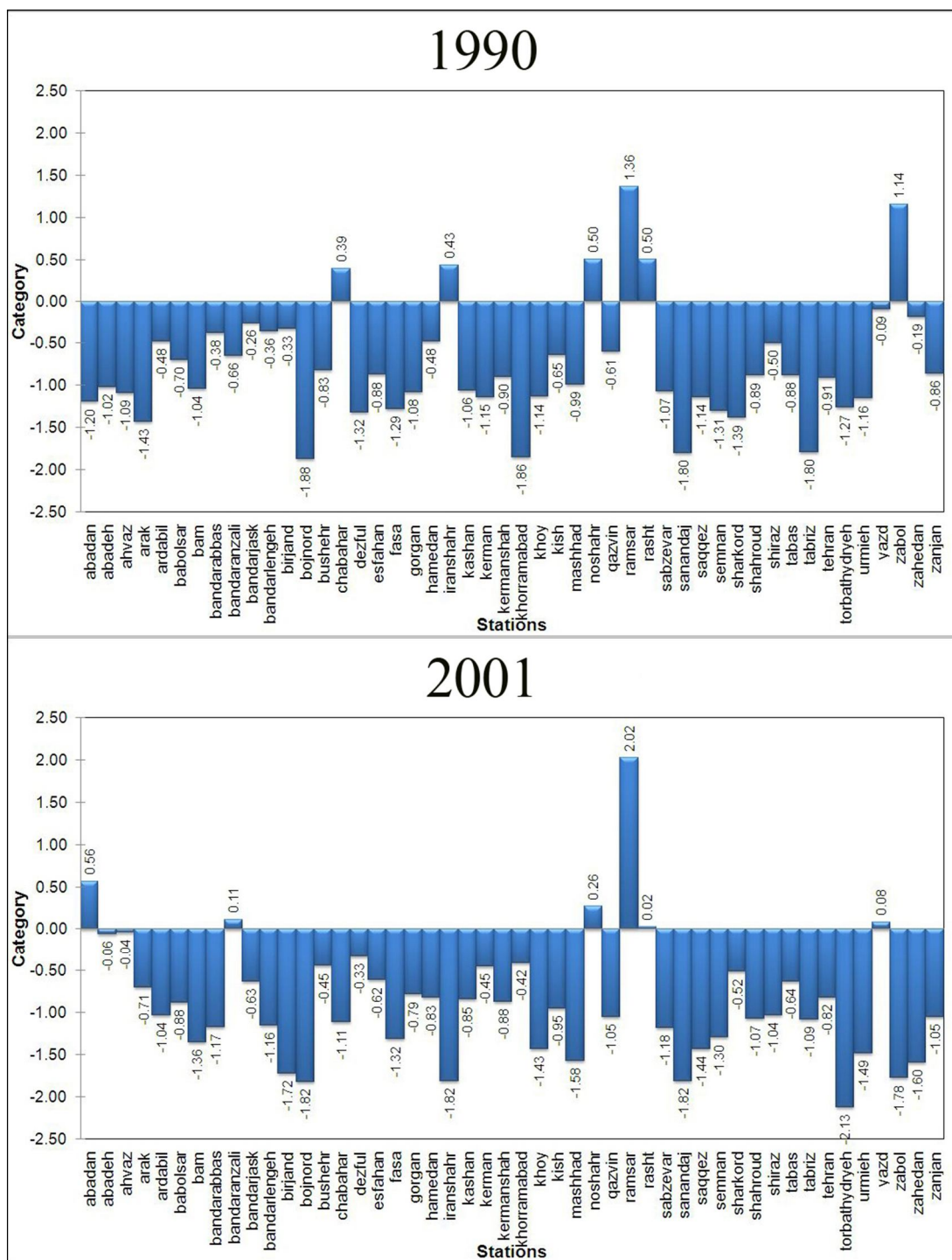
استفاده از شاخص نرمال استاندارد (Z-Index) که در این پژوهش به‌منزله‌ی یک شاخص اولیه، تنها برای تعیین سال‌های فراگیری خشکسالی استفاده می‌شود، خود به‌منزله‌ی روش اصلی پژوهش در برخی کارها استفاده می‌شود (اربابی سبزواری، ۱۳۸۹). همان‌طور که پیش از این گفته شد، در گام اول تحلیل آماری بارش برای همه ایستگاه‌ها براساس توزیع نرمال استاندارد (Z-Index) به انجام رسید تا بر این اساس سال‌هایی که در آنها خشکسالی فراگیر برای ۴۸ ایستگاه ایران به‌وقوع پیوسته ثبت شوند. بنابراین ماتریسی از شاخص‌های استاندارد شده بارش برای هر ایستگاه به‌طور مجزا و در طول سی سال محاسبه شد. نتایج نشان داد، در طول سه‌دهه (۲۰۰۵-۱۹۷۶)، خشکسالی‌های فراگیر حداقل در چهار سال ۱۹۷۳، ۱۹۸۵، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۱، به‌وقوع پیوسته است. تحلیل هیستوگرام آماری شاخص توزیع نرمال استاندارد برای این چهار سال در شکل شماره (۲) نشان داد، فراگیرترین خشکسالی و در عین حال شدیدترین آنها در سال‌های ۱۹۷۳ و ۲۰۰۱، به‌وقوع پیوسته، در زمانی که ایستگاه‌های مطالعاتی دارای مقادیر منفی شاخص نرمال استاندارد بارش نزدیک به (-۲) هستند. از سویی، طبق گزارش‌های فائو بدترین خشکسالی‌ها در چهل سال گذشته در سطح جهان مربوط به سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ است (پیرمردیان و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۲)؛ از این‌رو می‌توان گفت، خشکسالی ۲۰۰۱، افزون‌بر فراگیری در سطح ایران، در مقیاس جهانی نیز اهمیت ویژه‌ای داشته است. بنابراین در این



پژوهش ارزیابی شدت خشکسالی با استفاده از شاخص‌های منتخب برای سال ۲۰۰۱، مورد توجه قرار خواهد گرفت.



شکل ۲. نمودار هیستوگرام آماری شاخص توزیع نرمال استاندارد برای سال‌های ۱۹۷۳، ۱۹۸۵، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۱



ادامه شکل ۲. نمودار هیستوگرام آماری شاخص توزیع نرمال استاندارد برای سال‌های ۱۹۷۳، ۱۹۸۵، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۱

ارزیابی شدت خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI و SIP, RAI, PNI

در این مرحله برای ارزیابی خشکسالی، چهار شاخص SPI و SIP, RAI, PNI براساس آمار سی‌ساله (۲۰۰۵-۱۹۷۶) بارش و به تفکیک ۴۸ ایستگاه سینوپتیک برای سال ۲۰۰۱، در نرم‌افزار DIC محاسبه شدند که

مقادیر مربوطه در جدول شماره (۵) منعکس شده است. این مقادیر سپس برای هر ایستگاه به تفکیک هر شاخص در نرم‌افزار ArcGIS وارد شدند تا در مرحله بعدی امکان تحلیل فضایی آنها فراهم شود.

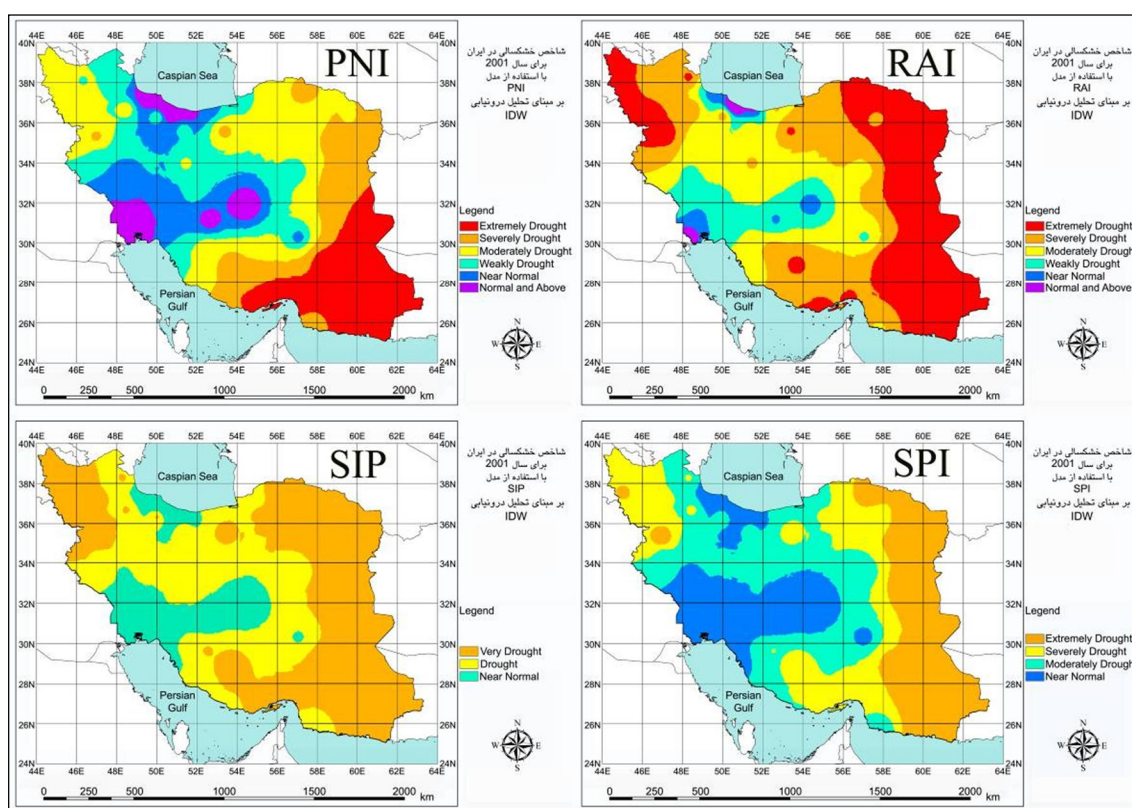
جدول ۵. مقادیر شاخص‌های خشکسالی SPI، RAI، PNI و برای ۴۸ ایستگاه سینوپتیک در سال ۲۰۰۱

Station	PNI	RAI	SIP	SPI	Station	PNI	RAI	SIP	SPI
Tehran	۷۴.۷۱	-۱.۸۱	-۰.۸۲	-۱.۲۱	Shiraz	۶۰.۶۸	-۲.۵۱	-۱.۰۴	-۱.۵۱
Yazd	۱۰۰.۰۰	۰.۱۳	۰.۰۸	-۰.۲۶	Iranshahr	۵.۷۳	-۴.۴۴	-۱.۸۲	-۲.۳۴
Tabas	۷۴.۱۵	-۱.۷۷	-۰.۶۴	-۱.۰۳	Chabahar	۰.۶۳	-۴.۲۶	-۱.۱۱	-۲.۴۹
Hamedan	۷۸.۴۱	-۱.۶۹	-۰.۸۳	-۱.۱۸	Zahedan	۲۰.۱۲	-۴.۰۲	-۱.۶۰	-۲.۶۲
Kish	۴۳.۵۸	-۳.۰۳	-۰.۹۵	-۱.۴۶	Zabol	۱۱.۷۵	-۴.۱۶	-۱.۷۸	-۲.۹۰
Bandar Jask	۵۰.۳۶	-۱.۹۷	-۰.۶۳	-۰.۹۸	Shahrud	۵۹.۰۴	-۲.۷۴	-۱.۰۷	-۱.۵۸
Bandar Lengeh	۲۲.۱۵	-۳.۲۲	-۱.۱۶	-۱.۸۶	Semnan	۴۹.۴۳	-۳.۱۳	-۱.۳۰	-۱.۸۵
Bandar Abbas	۲۶.۲۴	-۳.۰۴	-۱.۱۷	-۱.۶۷	Zanjan	۶۲.۶۱	-۲.۸۵	-۱.۰۵	-۱.۶۰
Arak	۷۸.۹۳	-۱.۵۸	-۰.۷۱	-۱.۰۹	Dezful	۸۹.۲۰	-۰.۷۷	-۰.۳۳	-۰.۷۱
Ramsar	۱۰۰.۰۰	۳.۰۲	۲.۰۲	۱.۱۳	Ahvaz	۹۸.۴۲	-۰.۱۰	-۰.۰۴	-۰.۴۰
Babolsar	۸۴.۳۰	-۲.۱۷	-۰.۸۸	-۱.۳۳	Abadan	۱۰۰.۰۰	۰.۸۴	۰.۵۶	۰.۱۴
Noshahr	۱۰۰.۰۰	۰.۴۳	۰.۲۶	-۰.۱۹	Birjand	۴۱.۹۸	-۴.۰۳	-۱.۷۲	-۲.۴۸
Rasht	۱۰۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۲	-۰.۴۱	Bojnord	۵۰.۶۱	-۴.۸۹	-۱.۸۲	-۲.۳۵
Bandar Anzali	۱۰۰.۰۰	۰.۱۵	۰.۱۱	-۰.۳۱	Kashan	۶۷.۹۷	-۲.۲۴	-۰.۸۵	-۱.۲۶
Khorram Abad	۸۹.۵۷	-۰.۹۰	-۰.۴۲	-۰.۸۲	Bushehr	۷۳.۶۲	-۱.۳۸	-۰.۴۵	-۰.۸۹
Bam	۳۳.۶۹	-۳.۶۲	-۱.۳۶	-۲.۱۴	Ardabil	۷۱.۷۶	-۳.۱۵	-۱.۰۴	-۱.۵۳
Kerman	۸۲.۷۵	-۱.۱۰	-۰.۴۵	-۰.۸۴	Urmiyeh	۵۶.۹۹	-۳.۵۱	-۱.۴۹	-۲.۰۷
Gorgan	۷۴.۹۳	-۲.۱۹	-۰.۷۹	-۱.۲۴	Esfahan	۷۳.۸۱	-۱.۴۹	-۰.۶۲	-۱.۰۲
Kermanshah	۷۳.۶۷	-۲.۲۱	-۰.۸۸	-۱.۳۲	Khoy	۵۸.۳۹	-۳.۲۸	-۱.۴۳	-۱.۹۶
Qazvin	۷۰.۹۷	-۲.۵۱	-۱.۰۵	-۱.۵۰	Tabriz	۷۰.۵۲	-۲.۶۷	-۱.۰۹	-۱.۵۷
Sanandaj	۵۱.۸۱	-۴.۳۸	-۱.۸۲	-۲.۴۳	Shahrkord	۸۵.۵۲	-۱.۲۲	-۰.۵۲	-۰.۹۲
Saqqez	۶۲.۵۵	-۳.۵۲	-۱.۴۴	-۱.۹۸	Torbat Heydarieh	۴۲.۱۴	-۴.۸۹	-۲.۱۳	-۲.۹۳
Abadeh	۹۶.۹۴	-۰.۱۹	-۰.۰۶	-۰.۴۰	Mashhad	۵۶.۲۹	-۳.۵۸	-۱.۵۸	-۲.۱۶
Fasa	۴۶.۰۸	-۳.۲۹	-۱.۳۲	-۱.۸۵	Sabzevar	۶۲.۶۸	-۲.۸۲	-۱.۱۸	-۱.۶۶

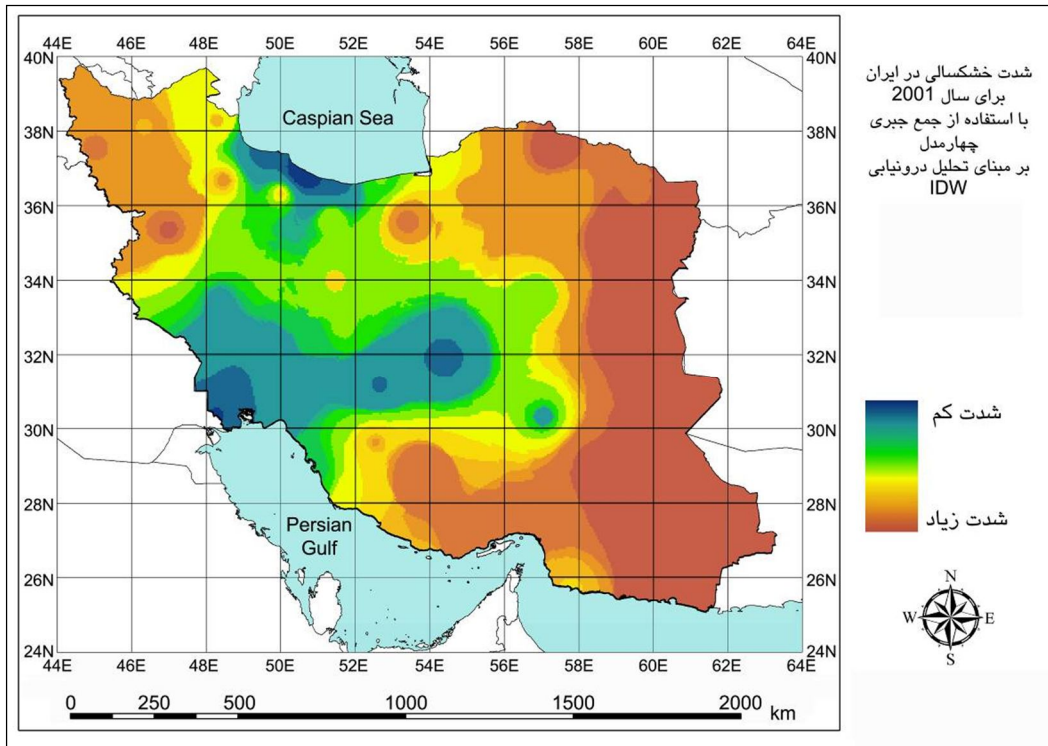
### تولید پهنه‌بندی شدت خشکسالی ایران به روش درون‌یابی و مدل ارتفاعی رقومی DEM

برای تولید پهنه‌بندی شدت خشکسالی ایران به روش درون‌یابی برای این در مقیاس شبکه مرجع با سلول‌های ۵×۵ کیلومتری و منطبق بر مختصات شبکه‌ای ۲.۵×۲.۵ دقیقه در شبکه WGS\_84 داده‌های

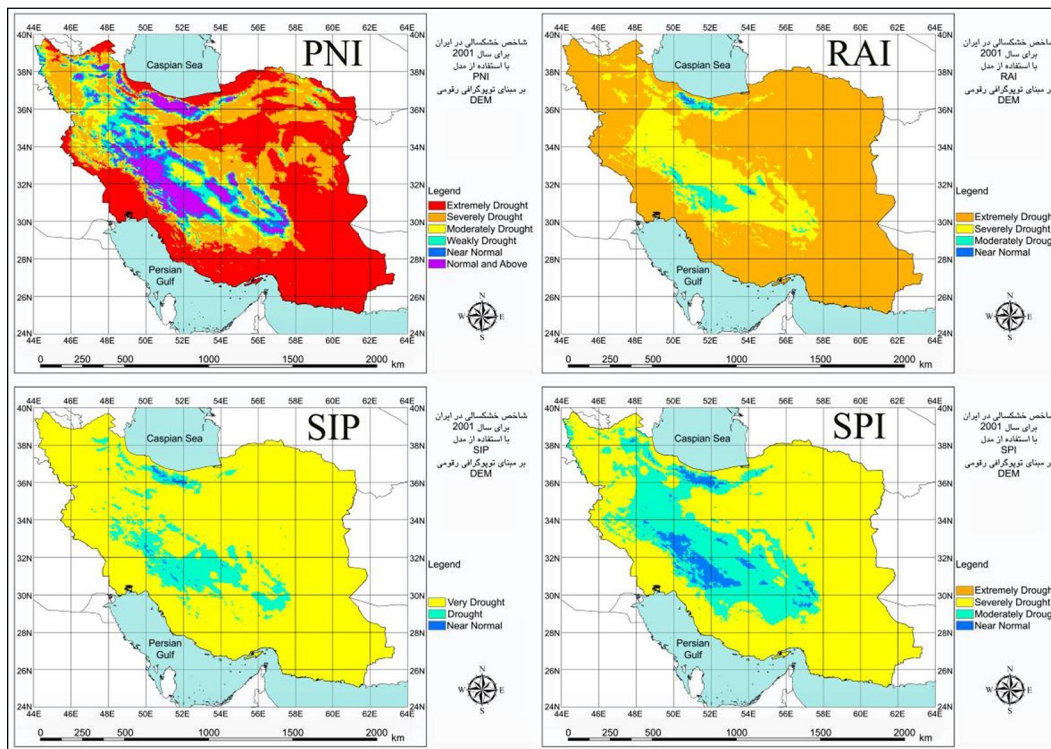
چهار شاخص برای هر ایستگاه وارد شده سپس هر کدام به طور مجزا با استفاده از روش درون‌یابی IDW در ArcGIS تحلیل فضایی شدند (شکل شماره ۳). این نقشه‌ها در نهایت بر مبنای شبکه مرجع، با استفاده از عملگر جمع جبری در ArcGIS ترکیب شدند و نقشه واحد شدت خشکسالی ایران بر مبنای روش درون‌یابی به دست آمد (شکل شماره ۴). همچنین برای تولید پهنه‌بندی شدت خشکسالی ایران بر مبنای مدل ارتفاعی رقومی DEM داده‌های ۵×۵ کیلومتری و منطبق بر شبکه ۲.۵×۲.۵ دقیقه‌ای، پایه میان‌یابی داده‌های ایستگاه مبنای در ArcGIS قرار گرفت. به این معنا که برای کاهش میزان خطای پردازش فضایی انجام شده در روش درون‌یابی و دخالت دادن موانع فضایی و توپوگرافیک، داده‌های درون‌یابی شده چهار شاخص خشکسالی به منزله‌ی پهنه‌بندی‌های اولیه با لحاظ کردن مختصات طول و عرض جغرافیایی و مبنای ارتفاعی توپوگرافی رقومی DEM برای هر سلول شبکه ۲.۵×۲.۵ دقیقه‌ای به طور مجزا محاسبه و پهنه‌بندی‌های ثانویه در ArcGIS تولید شدند (شکل شماره ۵). این نقشه‌ها در پایان بر مبنای شبکه مرجع، با استفاده از عملگر جمع جبری در ArcGIS ترکیب شدند و نقشه واحد شدت خشکسالی ایران بر مبنای مدل ارتفاعی رقومی DEM به دست آمد (شکل شماره ۶).



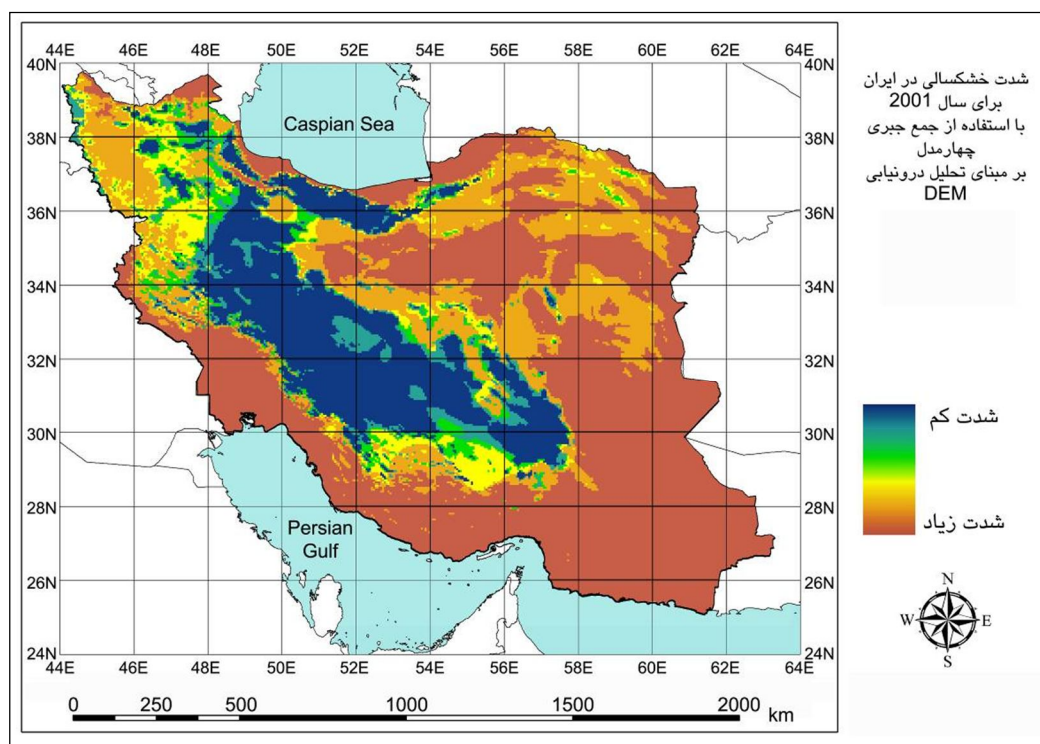
شکل ۳. پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی ایران در سال ۲۰۰۱، به روش درون‌یابی IDW



شکل ۴. پهنه‌بندی شدت خشکسالی ایران در سال ۲۰۰۱، به روش درونیابی IDW



شکل ۵. پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی ایران در سال ۲۰۰۱، بر مبنای مدل ارتفاعی رقومی DEM



شکل ۶. پهنه‌بندی شدت خشکسالی ایران در سال ۲۰۰۱، بر مبنای مدل ارتفاعی رقومی DEM

### تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی شدت خشکسالی ایران

بررسی شکل شماره (۳) نشان می‌دهد، هر چهار شاخص پژوهش دارای هماهنگی تقریبی در تحلیل فضایی شدت خشکسالی ایران هستند؛ به طوری که بیشترین شدت خشکسالی سال ۲۰۰۱ را در نیمه شرقی ایران ثبت کرده‌اند. اما از آنجاکه شاخص‌های RAI و PNI، طبقات بیشتری (شش طبقه) را از خود نشان داده‌اند، جزئیات بیشتری را به نمایش گذاشته، از دقت بیشتری برای برآورد شدت خشکسالی برخوردارند. شاخص SIP از این نظر در رتبه آخر قرار می‌گیرد. از نظر پهنه‌بندی هم روش درون‌یابی IDW، به گونه مطلوبی تسری این خشکسالی را در شرق و جنوب شرقی کشور نمایش داده است. البته در شمال غربی ایران نیز با شدت کمتری توزیع مکانی این خشکسالی مشاهده می‌شود. برای هر چهار شاخص، ایستگاه‌های نواحی مرکزی ایران، جنوب خزر و شمال خلیج فارس کمترین شدت خشکسالی را از خود نشان داده‌اند. این موضوع به‌ویژه در شکل شماره (۴) که ترکیبی از چهار شاخص یادشده به روش درون‌یابی است به خوبی مشاهده می‌شود. با این حال به نظر می‌رسد، به دلیل محدودیت‌های روش درون‌یابی و عدم دخالت موانع فضایی و توپوگرافیکی در آن، توزیع مکانی مناسبی برای خشکسالی در مرکز ایران دیده نمی‌شود؛ زیرا انتظار وجود پهنه‌هایی با شدت بالای خشکسالی در این محدوده‌ها وجود داشت. پس در شکل شماره (۵) با انطباق داده‌های درون‌یابی شده خشکسالی بر مدل ارتفاعی رقومی DEM تلاش شده تا توزیع مکانی دیگری برای خشکسالی ایران در سال

۲۰۰۱ تولید شود. نتایج پهنه‌بندی شاخص‌ها بر مبنای مدل ارتفاعی رقومی نیز نشان داد، اساساً خشکسالی به‌وقوع پیوسته کمترین شدت را در مرکز ایران و به‌ویژه در ارتفاعات زاگرس مرکزی و جنوبی داشته است. الگوی ترکیبی این شاخص‌ها بر مبنای مدل ارتفاعی رقومی هم افزون بر تأیید این نتیجه نشان داد که از شدت خشکسالی همزمان با افزایش ارتفاع در کوهستان‌های داخلی ایران کاسته می‌شود. پیش از این هم وجود رابطه معکوس بین وقوع خشکسالی و ارتفاع از سطح دریا به اثبات رسیده بود (خسروی و اکبری، ۱۳۸۸). با این عدم توزیع مکانی شاخص‌های خشکسالی برای ایستگاه‌های جنوب خزر و شمال خلیج فارس که در ارتفاع بسیار پایینی قرار دارند، در این روش پهنه‌بندی چندان مطلوب به‌نظر نرسید. با توجه به این‌که خشکسالی به‌منزله‌ی پدیده‌ای اقلیمی از جریان‌ها و فرآیندهای گردش اتمسفری تبعیت می‌کند؛ از این‌رو به‌نظر می‌رسد که دوره‌های خشک نمی‌توانند تنها تابعی از پارامترهای وابسته به زمین مانند ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی باشند. همان‌طور که گفته شد، در توزیع فضایی خشکسالی‌ها برای هر چهار شاخص این پژوهش به‌ویژه با استفاده از روش پهنه‌بندی درون‌یابی IDW، شاهد شدت بالای خشکسالی در کمربند شرقی ایران (استان‌های خراسان و سیستان و بلوچستان) در سال ۲۰۰۱ بودیم. این موضوع به‌گونه‌ای در بررسی همبستگی خشکسالی‌های سیستان و بلوچستان با الگوهای چرخش اتمسفری کلان مقیاس نیمکره شمالی به‌ویژه در سال ۲۰۰۰ نیز استنتاج شده است؛ به‌طوری‌که الگوی چندمتغیره انسو، الگوی قطبی-اوراسیا و الگوی نوسان شمالی از تأثیرگذارترین الگوها بر این توزیع مکانی خشکسالی یاد شده است (خسروی، ۱۳۸۳). این الگوهای چرخش اتمسفری توجیه‌کننده روند خشکسالی ۲۰۰۱ ایران نیز می‌تواند باشد، در جایی که بر شدت خشکسالی از غرب به شرق افزوده شده و در آن کمربند شرقی کشور به‌طور معناداری در معرض تهاجم خشکسالی قرار گرفته است.

### بحث و نتیجه‌گیری

مقایسه چهار شاخص SPI، RAI، PNI و SIP، نزدیکی نتایج به‌دست آمده را در تحلیل فضایی خشکسالی ایران نشان داد. اما شاخص‌های RAI و PNI، به‌دلیل برخورداری از طبقات بیشتر، از حساسیت بالاتری برخوردار بوده، توزیع مکانی شدت خشکسالی را با دقت و جزئیات بیشتری به نمایش گذاشته‌اند. شاخص‌های SPI و SIP، از نظر کارایی برای برآورد شدت خشکسالی به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی شدت خشکسالی ایران بر مبنای دو روش درون‌یابی IDW و مدل ارتفاعی رقومی DEM، مشخص کرد که روش درون‌یابی بدون دخالت مدل ارتفاعی رقومی (DEM) به‌گونه مطلوبی در هر مکان قابلیت استفاده دارد؛ زیرا عوامل زمینی مانند ارتفاع تأثیر چندانی در وقوع پدیده خشکسالی ندارند. زیرا برخلاف خشکی که تابعی از موقعیت مکانی مانند طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع و دوری و نزدیکی به منابع

رطوبتی است، پدیده خشکسالی وابستگی شدیدی به سیستم‌های جوی و ارتباط از دور اتمسفری دارد که در اصطلاح از آن به (Tele Connection) یاد می‌شود. از این‌رو، بارها شاهد وقوع خشکسالی در مناطقی بودیم که از نظر موقعیت مکانی در ناحیه معتدل و مرطوب واقع شده‌اند؛ زیرا در آن برهه زمانی تحت تأثیر فرآیند گردش اتمسفری با کمبود بارش روبرو شده، در نتیجه با شرایط خشکسالی مواجه شده‌اند که برای مثال می‌توان خشکسالی شدیدی که در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰، استان‌های ساحلی دریای خزر را تحت تأثیر قرار داد اشاره کرد که در تقویم‌های خشکسالی کشور ثبت شده است. البته گفتنی است، استفاده از روش درون‌یابی نیز منوط به استفاده از ایستگاه‌های کافی و با فاصله کم است تا پهنه‌بندی از دقت و اعتبار علمی لازم برخوردار باشد. با این حال روش درون‌یابی IDW نسبت به مدل ارتفاعی رقومی DEM، برای ارزیابی شدت خشکسالی ایران از دقت و اعتبار بالاتری برخوردار است و در صورت استفاده از داده‌های معتبر و کافی می‌تواند به خوبی گویای میزان شدت خشکسالی در یک منطقه کوچک‌تر هم باشد.

## منابع

- اربابی سبزواری الف. ۱۳۸۹، تحلیل اثر خشکسالی با روش درون‌یابی شاخص Z نرمال بارندگی در سامانه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در منطقه کاشان، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال ۳، شماره ۷، صص. ۱۲۴-۱۰۵.
- انصاری ح. و داوری ک. ۱۳۸۶، پهنه‌بندی دوره خشک با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد شده در محیط GIS، مطالعه موردی: استان خراسان، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۰، ۱۰۸-۹۷.
- برنا ر. عظیمی ف. سعیدی دهکی ن. ۱۳۸۹، مقایسه شاخص‌های SIAP، PN و RAI در بررسی خشکسالی‌های استان خوزستان با تأکید بر ایستگاه‌های آبادان و دزفول، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال ۳، شماره ۹، صص. ۷۷-۸۸.
- پیرمردیان، ن. شمس‌نیا الف. شاهرخ‌نیا م. ۱۳۸۷، پایش و تحلیل پراکنندگی مکانی شدت خشکسالی سال زراعی ۱۳۷۹-۸۰ استان فارس با استفاده از شاخص معیار شده بارش (SPI) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مجله مهندسی آب، سال ۱، شماره ۲، صص. ۷۰-۶۱.
- حجازی‌زاده ز. جوی‌زاده س. ۲۰۰۷. نرم‌افزار Drought Indices Calculator (DIC), Ver. 1.0 Beta
- خسروی م. ۱۳۸۳، بررسی روابط بین الگوهای چرخش جوی کلان مقیاس نیمکره شمالی با خشکسالی‌های سالانه سیستان و بلوچستان، مجله جغرافیا و توسعه، سال ۲، شماره ۳، صص. ۱۸۸-۱۶۷.
- خسروی م، اکبری م. ۱۳۸۸، بررسی ویژگی خشکسالی‌های استان خراسان جنوب، مجله جغرافیا و توسعه، سال ۷، شماره ۱۴، صص. ۶۸-۵۱.
- شاهیان ر. جامع ع. آریانفر ر. حقیقت م. دهقان ح. ۱۳۸۸، پهنه‌بندی آستانه بحران خشکسالی استان فارس با



- کاربرد شاخص معیار بارش SPI و GIS، مجله مهندسی منابع آب، سال ۲، شماره ۴، صص. ۳۳-۴۲.
- علیزاده الف. انصاری ح. ارشادی س. آشگر طوسی ش. ۱۳۸۷، پایش و پیش‌بینی خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، سال ۶، شماره ۱۱، صص. ۱-۱۷.
- عیوضی م. مساعدی الف. ۱۳۹۰، پایش و تحلیل مکانی خشکسالی هواشناسی در سطح استان گلستان با استفاده از روش‌های زمین آماری. نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۴، شماره ۱، صص. ۶۵-۷۸.
- کاوپانی م. ۱۳۸۰، بررسی اقلیمی شاخص‌های خشکی و خشکسالی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۱۶، شماره ۱ (پیاپی ۶۰)، صص. ۷۱-۸۹.
- محمدیان الف. کوهی م. آدینه‌بیگی الف. رسولی ج. بذرافشان ب. ۱۳۸۹، مقایسه پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI، DI و PNI و پهنه‌بندی آنها (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۷، شماره ۱، صص. ۱۷۷-۱۸۴.
- مساعدی الف. مرعشی م. کواکبی غ. ۱۳۸۸، بررسی مقایسه‌ای خشک سالی در مناطق پرباران و کم باران (مطالعه موردی: استان گلستان)، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۶، شماره ۱، ویژه‌نامه ۱-الف، صص. ۲۷۷-۲۹۰.
- منتظری م. غیور ح. ۱۳۸۸، تحلیل مقایسه‌ای روند بارش و خشکسالی حوضه خزر، مجله جغرافیا و توسعه، سال ۷، شماره ۱۶، صص. ۷۱-۹۲.
- نگارش ح. خسروی م. شاه‌حسینی م. محمودی پ. ۱۳۸۹، مطالعه خشکسالی‌های کوتاه‌مدت شهرستان زاهدان، مجله جغرافیا و توسعه، سال ۸، شماره ۱۸، صص. ۱۰۹-۱۳۴.
- Agnew C.T. Chappell A. 1999, **Drought in the Sahel**. GeoJournal, Vol. 48, No. 4, PP. 299–311.
- Edossa F, Kassahun T, Endashaw B. 2010, **A comparative study of morphological and molecular diversity in Ethiopian lentil landraces**. African Journal of Plant Science, Vol. 4, No. 7, PP. 241–254.
- Edwards D.C. McKee T.B. 1997, **Characteristics of 20th Century drought in the United States at multiple time scales**. Climatology Report Number 97–2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Hayes M.J. Svoboda M.D. White D.A. Vanyarhko O.V. 1999, **Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index**. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 80, No. 3, PP. 429–438.
- Komuscu A.U. 1999, **Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in Turkey**. Drought Network News, Vol. 11, No. 1, PP. 7–13.

- McKee T.B. Doesken N.J. Kleist J. 1993, **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. In: Proc. 8th Conference on Applied Climatology, 17–22 January, Anaheim, California, PP. 179–184.
- Van Rooy M.P. 1965, **A Rainfall anomaly index (RAI) independent of time and space**. Notos, No. 14, PP. 43 –48.
- Vasiliades L. Loukas A. and Liberis N. 2010, **A water balance derived drought index for Pinios River Basin, Greece**. Water Resources Management, Vol. 25, No. 4, PP. 1087–1101.
- Willeke K. Lin X.J. Grinshpun S.A. 1998. **Improved aerosol collection by combined impaction and centrifugal motion**. Aerosol Science and Technology, Vol. 28, No. 5, PP. 439–456.
- Yamoah C.F. Varvel G.E. Francis C.A. Waltman W.J. 1998. **Weather and management impact on crop yield variability in rotations**, Journal of production agriculture, Vol. 11, No. 2, PP. 219-225.