

پهنه‌بندی و تعیین بهترین شاخص خشک‌سالی در استان خراسان رضوی

مهدی بروغنی، دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشکده‌ی منابع طبیعی نور - دانشگاه تربیت مدرس
حمیدرضا مرادی*، دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری دانشکده‌ی منابع طبیعی نور - دانشگاه تربیت مدرس
محمد علی زنگنه اسدی، دانشیار گروه اقلیم و ژئومورفولوژی - دانشگاه حکیم سبزواری

چکیده

خشک‌سالی یک پدیده خزنده محیطی است که اثرات مخرب زیادی بر اقتصاد، کشاورزی و جامعه دارد. این پدیده در بخش‌های شرقی، مرکزی و جنوبی ایران به علت آب و هوای خشک و نیمه خشک نمود بیشتری دارد. در این تحقیق از شاخص‌های SPI، PNI و ZSI به منظور پهنه‌بندی خشک‌سالی و تعیین بهترین شاخص در استان خراسان رضوی استفاده شد. داده‌های مربوط به بارش از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ به صورت سالانه میانگین گرفته شد. بعد از محاسبه SPI، PNI و ZSI با استفاده از نرم‌افزار DIP، این داده‌ها وارد نرم‌افزار ArcGIS شد و سپس با استفاده از روش کریجینگ، پهنه‌بندی خشک‌سالی برای دوره مطالعه‌ی ۱۱ ساله انتهایی (۲۰۰۰-۲۰۱۰) صورت گرفت. نتایج حاکی از آن بود که پهنه‌بندی خشک‌سالی در هیچ‌یک از شاخص‌ها از روند منظمی در طی دوره‌ی مورد مطالعه تبعیت نمی‌کرد. نتایج شاخص SPI نشان داد که شدت خشک‌سالی در سال ۲۰۰۸ نسبت به سال‌های دیگر بیشتر و از نظر ترسالی، سال ۲۰۰۳ شرایط بهتری نسبت به سال‌های دیگر دارد. نتایج پهنه‌بندی خشک‌سالی شاخص PNI حاکی از آن است که در سال ۲۰۱۰ شرایط خشک‌سالی بیشتر از سال‌های دیگر است و سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۹، در کل استان شرایط ترسالی وجود دارد. نتایج شاخص ZSI نشان داد که سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۳ به ترتیب خشک‌ترین و پر بارش‌ترین سال در دوره‌ی مورد مطالعه می‌باشد. هم‌چنین نتایج حکایت از آن داشت که شاخص خشک‌سالی SPI بهترین عملکرد را نسبت به شاخص‌های دیگر دارد.

کلمات کلیدی: پهنه‌بندی خشک‌سالی، شاخص SPI، شاخص PNI، شاخص ZSI، خراسان رضوی.

۱- مقدمه

خشک‌سالی یک پدیده محیطی است که همواره خسارت‌های فراوانی بر اقتصاد جوامع به دنبال داشته‌است (بروغنی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۰). خشک‌سالی به‌عنوان یکی از پرهزینه‌ترین بلاهای طبیعی به‌دلیل یک دوره‌ی خشک غیر عادی است که به اندازه‌ی کافی تداوم داشته، تا عدم تعادل در وضعیت هیدرولوژیکی منطقه ایجاد گردد (Celine et al, 2013:15; Moradi et al, 2011:11). خشک‌سالی وضعیتی از کمبود بارش و افزایش دماست که در هر وضعیت اقلیمی ممکن است رخ دهد. خشک‌سالی شامل کشاورزی، هیدرولوژی و هواشناسی است که خشک‌سالی هواشناسی بیش‌تر از کشاورزی و هیدرولوژیکی به وقوع می‌پیوندد (صالحوند و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۷). پراکندگی جغرافیایی درصد خشک‌سالی‌های به وقوع پیوسته در کشور، نشان می‌دهد که نواحی جنوبی و شرقی کشور از گستردگی زیادتری برخوردار است و هرچه از بخش‌های جنوبی و شرقی کشور فاصله گرفته شود، شدت و فراوانی خشک‌سالی‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر، تأثیر سامانه‌های پرفشار جنب حاره‌ای است که مقادیر بارندگی بخش‌های جنوبی و شرقی کشور را نسبت به بخش‌های شمالی و غربی به‌طور محسوسی کاهش داده و مانع از تأثیر سیستم‌های شمالی و غربی به این مناطق شده‌است (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۵). برای تعیین ویژگی‌های خشک‌سالی تا کنون نمایه‌های متعددی ارائه شده‌است. نمایه‌ی خشک‌سالی بر مبنای یک یا چند متغیر اقلیمی محاسبه می‌شود. نمایه‌ی خشک‌سالی PDSI^۱ (Palmer, 1965: 45)، CMI^۲ (Palmer, 1968, 5) و SWSI^۳ (Shafer and Dezman, 1982:11) بر مبنای متغیرهای مختلف اقلیمی و هیدرولوژیکی محاسبه می‌گردند. وزن بارندگی در این گونه نمایه‌ها بیش از بقیه متغیرها و بیش از ۸۰ درصد تغییرات این گونه نمایه‌ها را توصیف می‌کند (Keyantash and Dracup, 2004:13). برخی از نمایه‌ها تنها از متغیر بارندگی بهره می‌برند. این نمایه‌ها شامل نمایه‌ی SPI^۴، PNI^۵، ZSI^۶، EDI^۷ و DI^۸ می‌باشد (Hong and Hayes, 2001: 13). نمایه‌های مبتنی بر بارندگی به علت سادگی در محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی و قابلیت زیاد در مقایسه‌ی مکانی نتایج، نمایه‌های مناسبی برای تحلیل خشک‌سالی به‌ویژه تحلیل‌های مکانی شناخته می‌شود (Lloyd-Hughes and Saunders, 2002:21). برخی از مطالعاتی که در زمینه‌ی خشک‌سالی انجام شده‌است به شرح ذیل می‌باشد.

Loukas و همکاران (۲۰۰۳)، طی تحقیقی با استفاده از داده‌های ۲۸ ایستگاه با طول آماری ۴۰ سال، اقدام به محاسبه‌ی سه شاخص بارش استاندارد، ناهنجاری بارش و شاخص Z بارندگی پرداختند. نتایج نشان داد که هر سه شاخص مورد استفاده، کارایی یکسانی را در تعیین شدت و تداوم خشک‌سالی دارند. Vangelis و Tsakiris (۲۰۰۴)، با استفاده از روش عکس مجذور فاصله، نقشه‌ی بارندگی ماهانه و نقشه‌ی درصد نرمال متوسط بارندگی سالانه را ترسیم و سپس با این اطلاعات، نقشه‌ی توزیع مکانی شاخص SPI را برای دوره آماری یکساله ۶۵-۱۹۶۴ تهیه کردند. Seager و Herweijer (۲۰۰۸)، طی تحقیقی، خشک‌سالی‌های آمریکا را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که یک الگوی جهانی وجود دارد که خشک‌سالی‌های کل کره‌ی زمین به جز اروپا را تبیین می‌کند و هنگامی که در نواحی غیر گرمسیری خشک‌سالی رواج دارد، نواحی گرمسیری خشک‌سالی ندارد. Gholam و همکاران (۲۰۱۱)، در تحقیقی به ارزیابی روش‌های زمین آمار برای تحلیل مکانی شاخص بارش استاندارد شده و شاخص خشک‌سالی مؤثر پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ عادی، روشی مناسب برای تحلیل مکانی شاخص مؤثر خشک‌سالی می‌باشد.

1Palmer Drought Severity Index

2Crop Moisture Index

3 Surface Water Supply Index

4 Standardized Precipitation Index

5 Present of Normal Index

6 Z-score Index

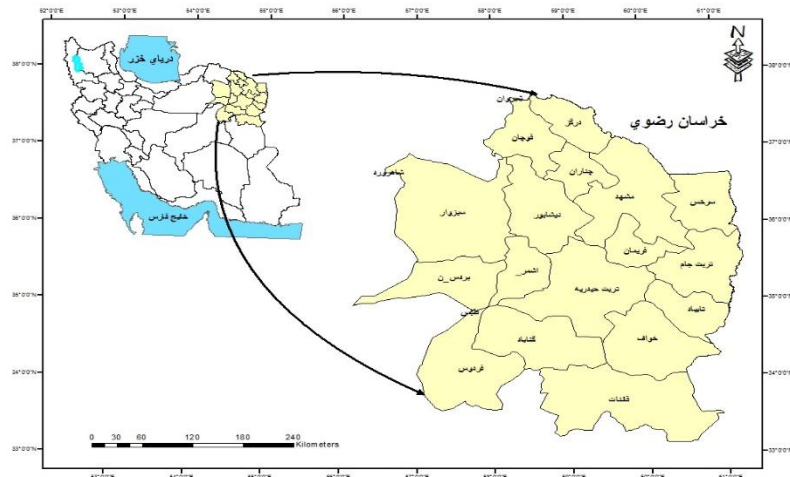
7 Effective Drought Index

8 Deciles Index

انصافی‌مقدم (۱۳۸۶)، طی تحقیقی به ارزیابی چند شاخص خشک‌سالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه‌ی دریاچه‌ی نمک پرداخت. نتایج نشان داد که شاخص SPI و دهک‌ها در جایگاه نخست، شاخص ZSI در جایگاه دوم و شاخص درصد نرمال در جایگاه سوم قرار می‌گیرد. حسینی‌صفا و مرید (۱۳۸۷)، به تحلیل احتمالاتی خصوصیات مکانی شدت خشک‌سالی در استان تهران با استفاده از نمایه SPI و منحنی شدت-مساحت-فراوانی (SAF) پرداختند. نتایج نشان داد که خشک‌سالی سال‌های ۱۳۴۹-۵۰، ۱۳۶۰-۶۱ و ۱۳۶۷-۶۸ دوره‌ی بازگشتی حدود ۲ تا ۵ سال، خشک‌سالی‌های ۱۳۶۷-۶۹، ۱۳۷۷-۷۸ و ۱۳۷۸-۷۹، دوره بازگشت ۱۰ تا ۲۰ سال و خشک‌سالی سال ۱۳۷۵-۷۶ شدیدترین سال خشک با دوره بازگشت ۱۰۰ سال را دارد. ناصرزاده و احمدی (۱۳۹۱) به بررسی عملکرد شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در ارزیابی خشک‌سالی و پهنه‌بندی آن در استان قزوین پرداختند. نتایج حاکی از آن است که شاخص Z و شاخص بارندگی استاندارد شده در نشان‌دادن خشک‌سالی شدید، دارای اندکی مبالغه در نمایش خشک‌سالی دهک‌ها با توجه به عملکرد مناسب در مشخص کردن خشک‌سالی شدید، دارای اندکی مبالغه در نمایش خشک‌سالی شدید می‌باشد. صالحوند و همکاران (۱۳۹۲)، به پهنه‌بندی خشک‌سالی با شاخص‌های (SPI، PNI، DI، CZI و ZSI) در استان خوزستان پرداختند. نتایج نشان داد که ضرایب همبستگی ایستگاه‌های این استان، مقادیر نسبتاً بالایی دارند و سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ خشک‌ترین سال‌ها بودند. بهشتی‌راد و بهشتی‌راد (۱۳۹۲)، به بررسی کارایی روش‌های پهنه‌بندی شدت خشک‌سالی در استان کرمان پرداختند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ از سه روش کریجینگ، کوکریجینگ و معکوس فاصله، از عملکرد مناسب‌تری برخوردار است. هم‌چنین شدیدترین خشک‌سالی‌ها در سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۷۲، ۱۳۷۹، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۴ اتفاق افتاده است. بروغنی و همکاران (۱۳۹۲) به تحلیل ارتباط خشک‌سالی‌های هیدروژئولوژیکی و اقلیمی دشت سبزواری با استفاده از شاخص‌های SPI و SWI پرداختند. نتایج حاکی از آن است که خشک‌سالی اقلیمی و هیدروژئولوژیکی از نظم خاصی تبعیت نمی‌کند و بیش‌ترین شدت و فراوانی خشک‌سالی در غرب دشت سبزواری بوده است. شرق دشت از شرایط نرمال و ترسالی برخوردار بوده و خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی با یک سال تأخیر نسبت به خشک‌سالی اقلیمی اتفاق می‌افتد. هدف از این تحقیق بررسی پهنه‌بندی مکانی خشک‌سالی استان خراسان رضوی با استفاده از شاخص‌های SPI، ZSI و PNI طی ۱۰ سال (۲۰۰۰-۲۰۱۰) می‌باشد. در این پژوهش با توجه به اهمیت خشک‌سالی و مطالعه‌ی آن، عملکرد پهنه‌بندی مکانی خشک‌سالی شاخص‌های SPI، ZSI و PNI، در استان خراسان رضوی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد و مناسب‌ترین شاخص که نسبت به تغییرات بارش بیش‌ترین مطابقت را دارد، بررسی می‌گردد.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی استان خراسان رضوی است که با مساحت ۱۴۳۸۶۴/۱۱۸ کیلومترمربع، چهارمین استان کشور از نظر وسعت می‌باشد. این استان با جمعیت ۵/۹۹۹/۵۲۹ نفر در عرض جغرافیایی ۵۲° تا ۴۲° شمالی و طول جغرافیایی ۱۹° ۵۶' تا ۱۶° ۶۱' شرقی قرار گرفته است. این استان دارای اقلیم خشک و نیمه-خشک می‌باشد (شکل ۱). بلندترین نقطه‌ی استان در ارتفاعات بینالود در شمال نیشابور با ارتفاع ۳۲۱۱ متر از سطح دریا و پست‌ترین نقطه‌ی استان، دشت سرخس با ارتفاع ۳۰۰ متر از سطح دریا و در حاشیه‌ی مرز ایران و ترکمنستان قرار دارد. میانگین بارش سالیانه‌ی مناطق مختلف استان خراسان رضوی بین ۷۵ تا ۳۹۰ میلی‌متر متغیر است (موسوی‌بایگی و اشرف، ۱۳۹۰: ۱۷).



شکل ۱: موقعیت استان خراسان رضوی در کشور

در این تحقیق ابتدا داده‌های مربوط به بارندگی استان خراسان رضوی از سازمان مدیریت منابع آب کشور تهیه گردید. داده‌های بارش وارد نرم افزار Excel شد و ایستگاه‌هایی که از نظر آماری ناقص بودند کنار گذاشته شدند. بعد از حذف ایستگاه‌های ناقص، دوره‌ی آماری مشترک از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ به صورت سالانه میانگین گرفته شد.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- شاخص خشک‌سالی SPI

شاخص SPI برای هر منطقه بر اساس ثبت بارندگی‌های طولانی آن محاسبه می‌شود. در ابتدا توزیع آماری مناسب، بر آمار بلند مدت بارندگی‌ها برآزش داده می‌شود، سپس تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی، به توزیع نرمال تبدیل می‌گردد. به‌طوری که استاندارد شده و متوسط آن برای هر منطقه و دوره‌ی مورد نظر صفر شود (Edwards and Mckee, 1997: 5). مقادیر مثبت SPI نشان‌دهنده‌ی بارندگی بیش از بارش متوسط و مقادیر منفی آن، معنای عکس را دارد. طبق این روش، دوره خشک‌سالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار -۱ یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که SPI مثبت می‌گردد. برای محاسبه‌ی این شاخص از رابطه‌ی ذیل استفاده می‌شود.

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{\delta} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن SPI شاخص خشک‌سالی، P_i میانگین بارندگی هر سال، \bar{P} میانگین بارندگی کل سال‌ها، δ انحراف معیار کل سال‌ها می‌باشد.

طبقه‌بندی مقادیر SPI در جدول شماره ۱، ارائه شده‌است (انصافی‌مقدم، ۱۳۸۶: ۱۷).

جدول ۱: طبقه‌بندی مقادیر شاخص خشک‌سالی SPI

SPI	وضعیت
بزرگتر یا مساوی با ۲	فرا مرطوب
۱,۵ تا ۱,۹۹	بسیار مرطوب
۱ تا ۱,۴۹	نسبتاً مرطوب
۰,۹۹- تا ۰,۹۹	نزدیک نرمال
-۱ تا -۱,۴۹	نسبتاً خشک
-۱,۵ تا -۱,۹۹	بسیار خشک
کوچک یا مساوی -۲	فراخشک

۳-۲- شاخص خشک‌سالی ZSI

مبنای محاسبه‌ی این شاخص، انحراف از میانگین نسبت به انحراف استاندارد داده‌های آماری است. اصولاً میزان شاخص ZSI، وضعیت بارش نسبت به میانگین را تعیین می‌کند. اگر نمره‌های انحراف از میانگین را بر انحراف استاندارد تقسیم کنیم، نمره‌ی استاندارد به دست می‌آید. شاخص ZSI بر خلاف شاخص SPI نیاز به تبدیل داده‌ها و برازش توزیع مانند گاما و یا پیرسون نوع سه ندارد. برای تبدیل داده‌های بارش به شاخص ZSI از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$ZSI = \frac{Pi - \bar{P}}{SD}$$

رابطه ۲

در این رابطه Pi ، \bar{P} و SD به ترتیب بارش سال مورد نظر، بارش میانگین و انحراف استاندارد از میانگین است. طبقه‌بندی مقادیر ZSI در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: طبقه‌بندی مقادیر شاخص خشک‌سالی ZSI

ZSI	وضعیت
بزرگتر یا مساوی با ۱/۲۸	ترسالی بسیار شدید
۰/۸۴-۱/۲۸	ترسالی شدید
۰/۵۲-۰/۸۴	ترسالی متوسط
-۰/۲۵ - ۰/۲۵	نرمال
-۰/۲۵ - -۰/۵۲	خشک‌سالی ضعیف
-۰/۵۲ - -۰/۸۴	خشک‌سالی متوسط
-۰/۸۴ - -۱/۲۸	خشک‌سالی شدید
کوچکتر از -۱/۲۸	خشک‌سالی بسیار شدید

۳-۳- شاخص خشک‌سالی PNI

این شاخص در سال ۱۹۹۴ توسط ویلکی و همکارانش ارائه شد و مفهوم اساسی آن، نسبت بارندگی واقعی به مقدار نرمال آن در یک دوره زمانی مشخص می‌باشد که به صورت درصد بیان می‌شود و در مقیاس مختلف (هفتگی، ماهانه، فصلی و سالیانه) قابل محاسبه است. تجزیه و تحلیل این شاخص به هنگام استفاده از آن‌ها برای بررسی شدت خشک‌سالی یا ترسالی در یک مکان یا فصل معین، بسیار مؤثر است. مقدار این شاخص برای دوره‌ی آماری، از طریق فرمول زیر تعیین می‌شود.

$$PNI = \frac{P_i}{P} \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این رابطه PNI، P_i و P به ترتیب شاخص درصد از نرمال، بارش سال مورد نظر و میانگین بارش درازمدت است (Nikbakht et al, 2013: 8).

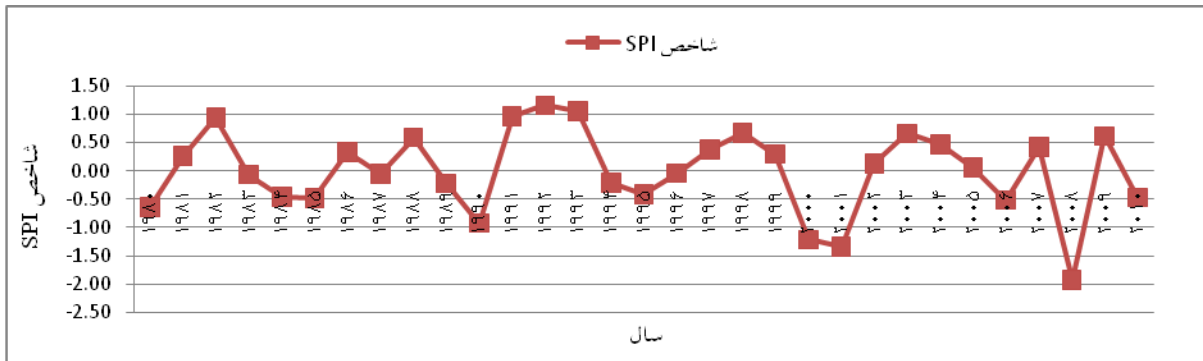
جدول ۳: طبقه‌بندی مقادیر شاخص خشک‌سالی PNI

PNI	وضعیت
بزرگتر یا مساوی ۸۰	نرمال
۷۰ تا ۸۰	خشک‌سالی ضعیف
۵۵ تا ۷۰	خشک‌سالی متوسط
۴۰ تا ۵۵	خشک‌سالی شدید
کوچکتر از ۴۰	خشک‌سالی خیلی شدید

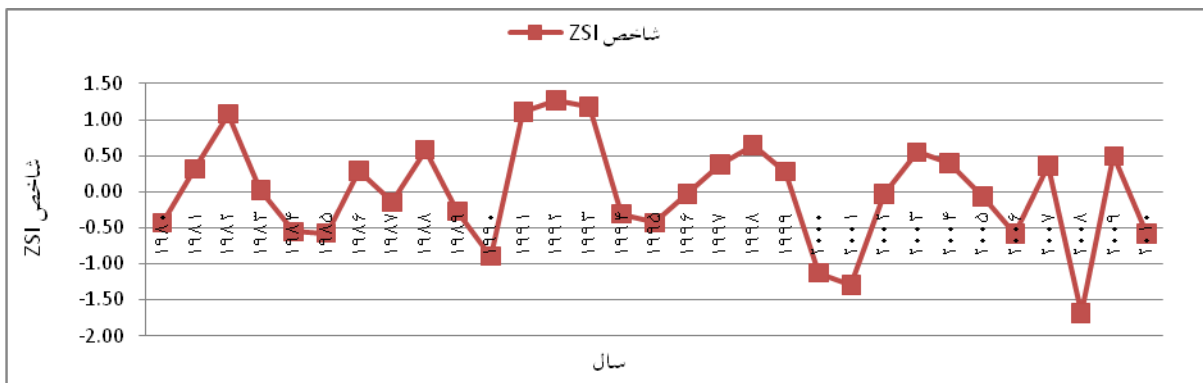
برای محاسبه‌ی شاخص‌های SPI، PNI و ZSI، ابتدا داده‌های مربوط به بارش از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ به صورت سالانه میانگین گرفته شد. سپس این داده‌ها به صورت فایل نوت پد تهیه، و با استفاده از نرم‌افزار DIP، شاخص‌های SPI، PNI و ZSI برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه شد. بعد از محاسبه‌ی این شاخص‌ها برای هر سال، این داده‌ها وارد نرم افزار ArcGIS شد و سپس با استفاده از روش کریجینگ معمولی و احتساب ۴۶ ایستگاه، پهنه‌بندی خشک‌سالی برای ۱۱ سال انتهایی (۲۰۰۰-۲۰۱۰) برای شاخص‌های SPI، PNI و ZSI انجام گرفت. در نهایت به تعیین بهترین شاخص برای پهنه‌بندی خشک‌سالی در استان خراسان رضوی با استفاده از بارش کمینه در دوره‌ی مورد مطالعه پرداخته شد (ناصر زاده و احمدی، ۱۳۹۱: ۲۱). در این فرض ابتدا کمینه مقدار بارندگی در دوره مشترک آماری استخراج و توسط شاخص‌های خشک‌سالی ارزیابی می‌شود و شاخصی که شرایط خشک‌سالی را بهتر تشخیص دهد به عنوان شاخص برتر انتخاب می‌شود (خلیلی و بذرافشان، ۱۳۸۲: ۱۴).

۴- بحث و نتایج

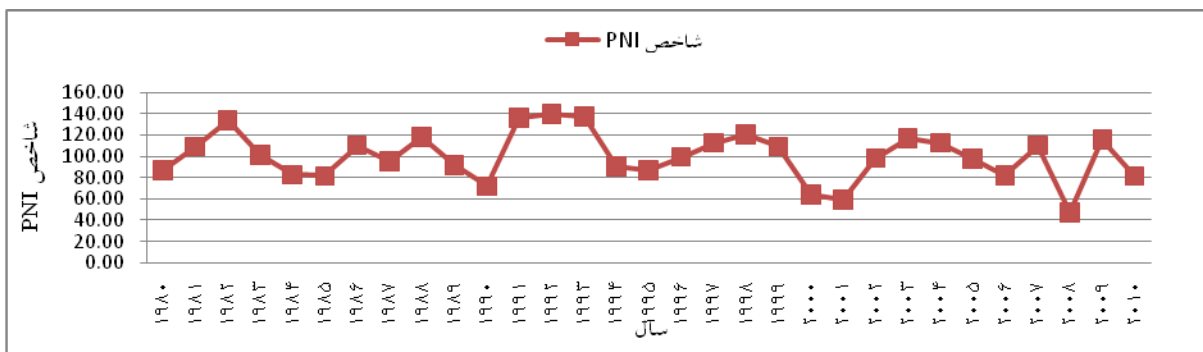
بررسی خشک‌سالی شاخص‌های SPI، ZSI و PNI در دوره‌ی مورد مطالعه (۱۹۸۰-۲۰۱۰) در شکل‌های (۲، ۳ و ۴) ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که تغییرات ترسالی و خشک‌سالی در دوره‌ی مورد مطالعه، از روند منظمی تبعیت نمی‌کند؛ اما تغییرات در شاخص‌ها، با هم مشابه است. نتایج هم‌چنین نشان دهنده‌ی آن است که سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۰۸ به ترتیب پر باران‌ترین و خشک‌ترین سال در دوره‌ی مورد مطالعه در هر سه شاخص می‌باشد.



شکل ۲: تغییرات شاخص خشک‌سالی SPI در دوره‌ی مورد مطالعه



شکل ۳: تغییرات شاخص خشک‌سالی ZSI در دوره‌ی مورد مطالعه

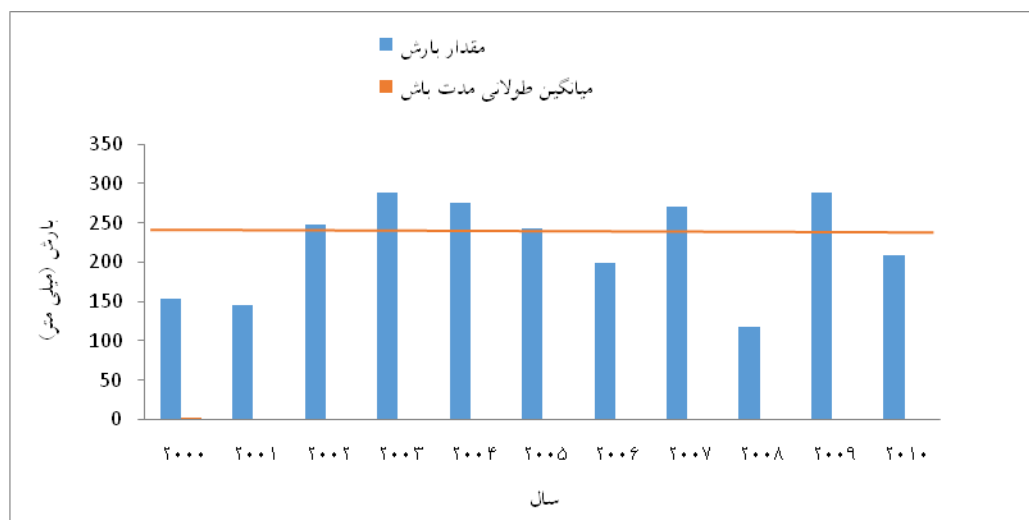


شکل ۴: تغییرات شاخص خشک‌سالی PNI در دوره‌ی مورد مطالعه

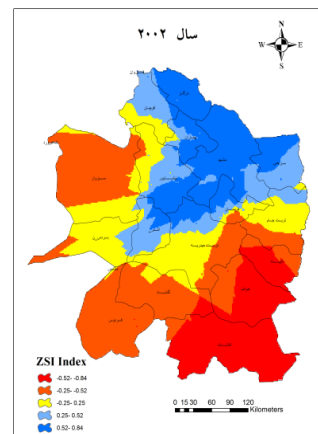
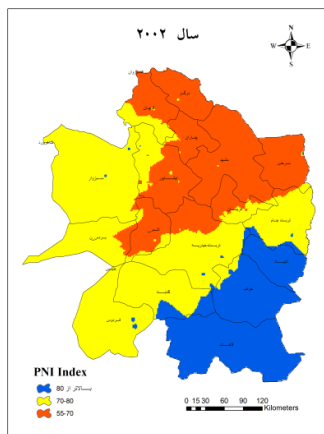
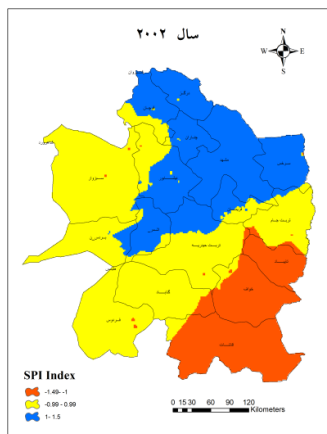
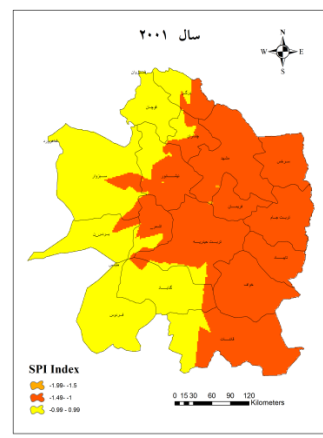
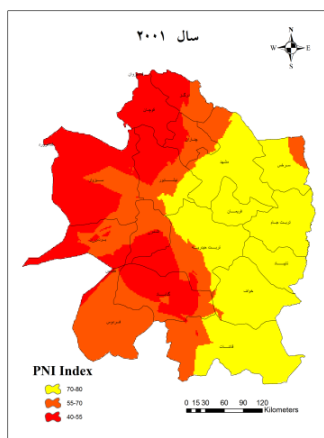
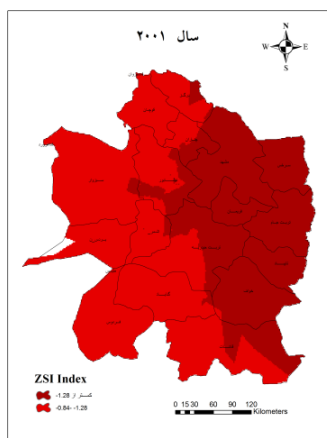
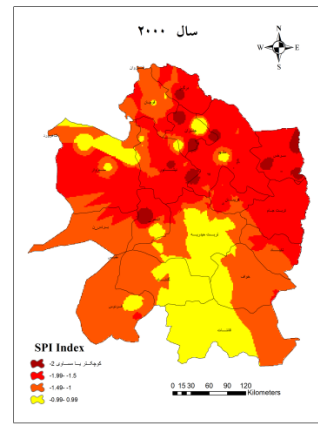
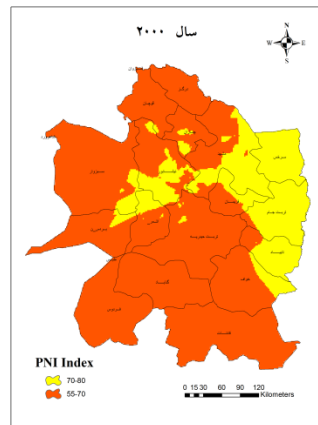
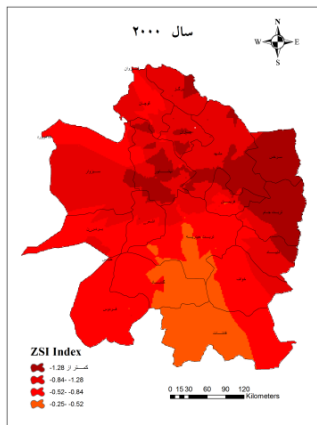
۱-۴ - بررسی پهنه‌بندی شاخص‌های خشک‌سالی

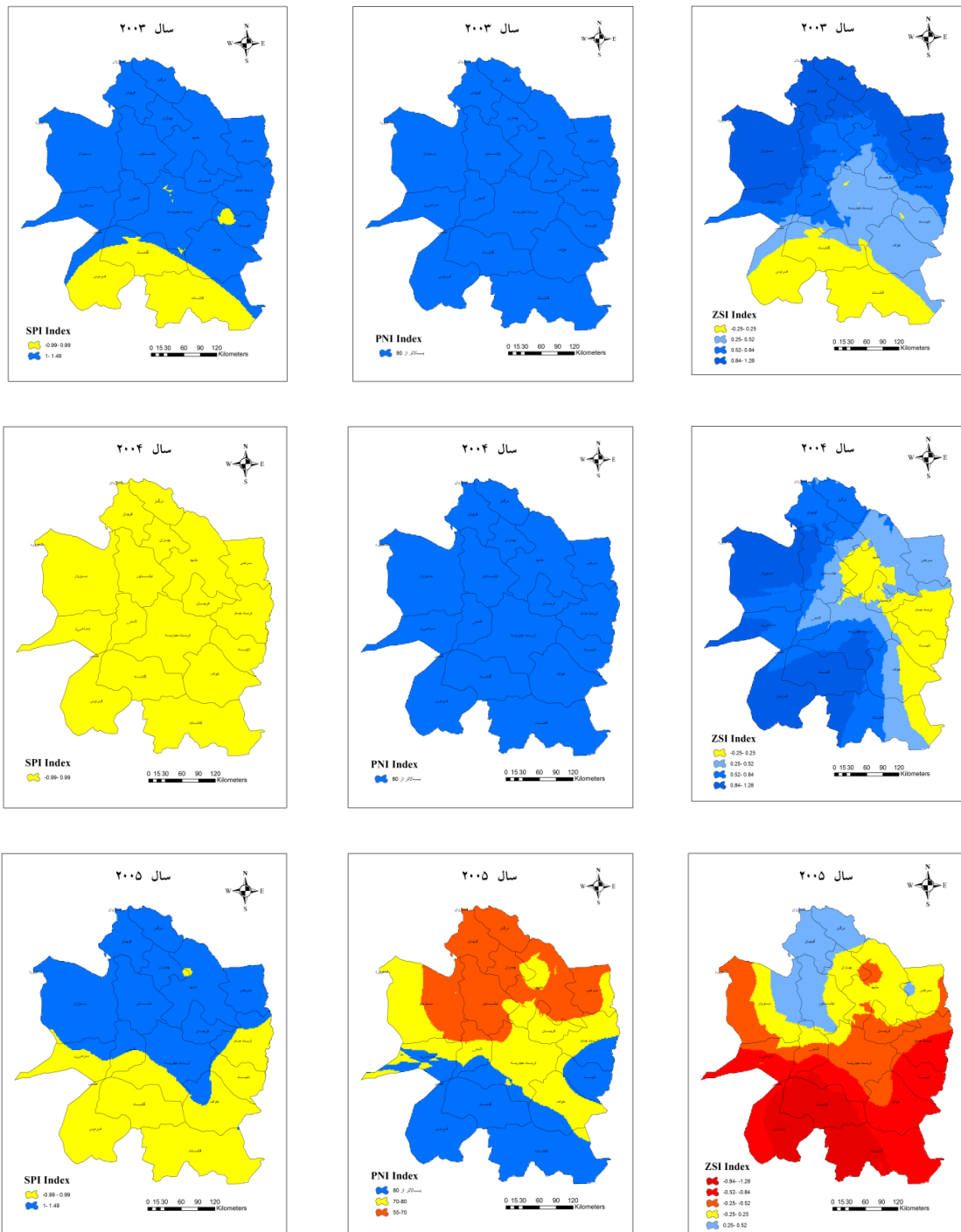
نتایج پهنه‌بندی شاخص‌های خشک‌سالی SPI، ZSI و PNI در دوره‌ی مورد مطالعه حاکی از آن است که تغییرات در سال‌های مختلف و در بخش‌های مختلف استان، از روند منظمی تبعیت نمی‌کند (شکل ۶). هم‌چنین روند تغییرات در شاخص‌ها با هم مشابه نمی‌باشد. نتایج پهنه‌بندی شاخص SPI حاکی از آن است که در سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۰ شرایط خشک‌سالی در کل استان حاکم است. سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ شرایط به سمت نرمال و ترسالی حرکت می‌کند به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۰۳، تقریباً بیشتر نقاط استان به جز بخش کمی در جنوب که شرایط نرمال دارد، شرایط ترسالی حاکم است. هم‌چنین سال ۲۰۰۴ در کل استان شرایط نرمال وجود دارد. در سال ۲۰۰۶ در بخش‌های جنوبی استان، شرایط خشک‌سالی و در بخش‌های شمالی استان، شرایط نرمال حاکم است (شکل ۶).

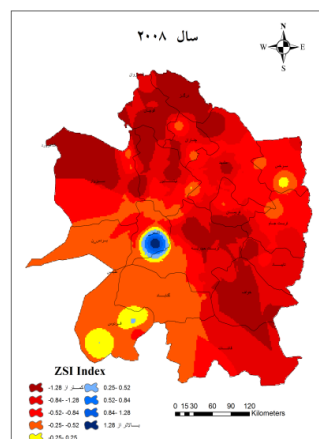
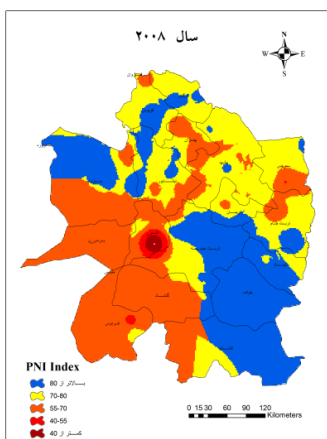
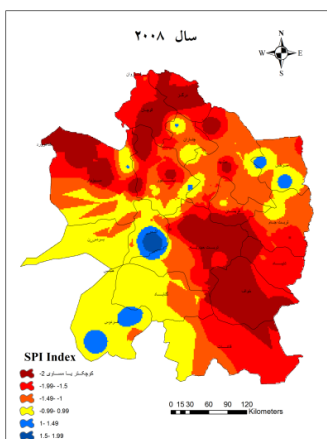
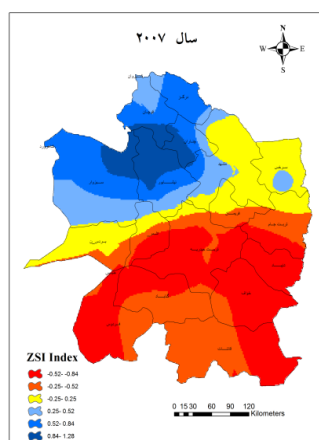
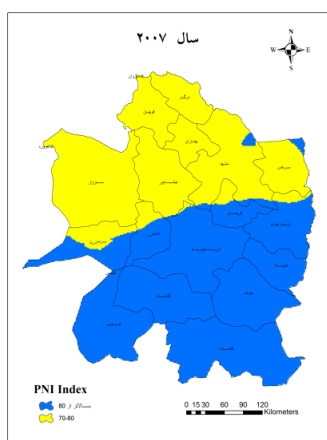
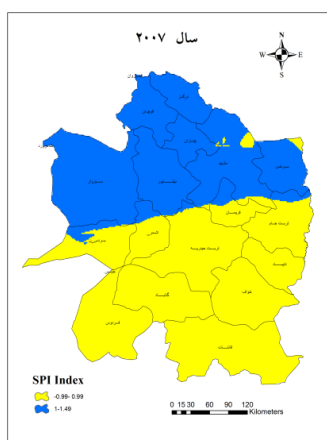
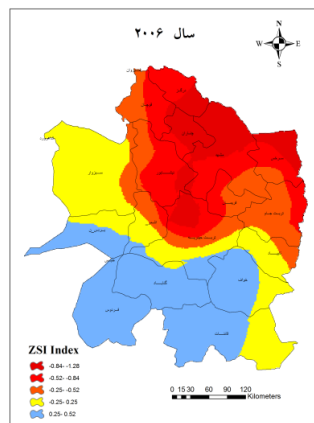
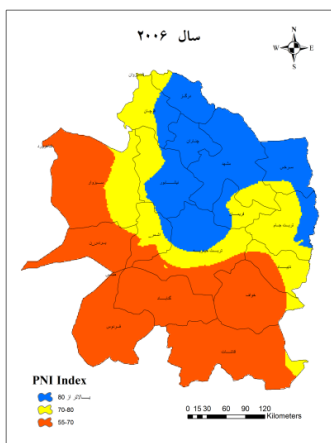
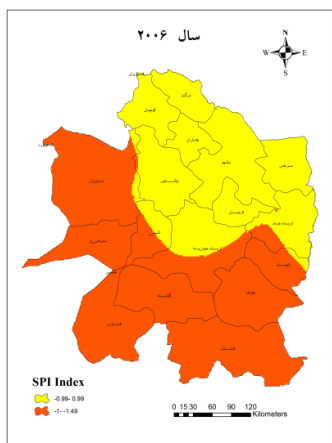
۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ شرایط ترسالی و نرمال در استان حاکم است و سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ شرایط خشک‌سالی در سطح استان را داریم. نتایج پهنه‌بندی شاخص خشک‌سالی PNI، بیان‌کننده‌ی آن است که از سال ۲۰۰۰ هر چه به سمت سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ حرکت می‌کنیم از شدت خشک‌سالی کاسته شده و به سمت ترسالی حرکت می‌کند به‌گونه‌ای که در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ کل استان شرایط ترسالی دارد. سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ نسبت به سال‌های قبل شرایط خشک‌تری در سطح استان داریم و در بخش‌های از استان شرایط خشک‌سالی حاکم است. سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹، شرایط ترسالی در سطح استان حاکم است و در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ شرایط خشک‌سالی در سطح استان وجود دارد. نتایج پهنه‌بندی شاخص خشک‌سالی ZSI، حاکی از آن است که هر چه از سال ۲۰۰۰ به سمت ۲۰۰۴ حرکت می‌کنیم، از شدت خشک‌سالی کاسته شده به‌گونه‌ای که از خشک‌سالی شدید در کل استان به شرایط ترسالی در سال ۲۰۰۴ می‌رسیم. در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷، شرایط تقریباً مشابه است و به جز بخش‌های کمی از استان که شرایط ترسالی دارد، بر بقیه‌ی استان شرایط خشک‌سالی حاکم است. در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ شرایط خشک‌سالی‌ای را در سطح استان شاهد هستیم که در سال ۲۰۰۸ شدت آن بیشتر است. در سال ۲۰۰۹، به جز بخش کمی از جنوب استان که شرایط نرمال دارد، بر بقیه‌ی استان شرایط ترسالی حاکم است. در مجموع، نتایج پهنه‌بندی شاخص‌های خشک‌سالی در استان خراسان رضوی حاکی از آن است که شاخص خشک‌سالی PNI، شرایط را مرطوب-تر و شاخص خشک‌سالی ZSI، شرایط را خشک‌تر نشان می‌دهد. هم‌چنین نتایج بیان‌کننده آن است که شاخص خشک‌سالی SPI و ZSI، هم‌خوانی بیشتری نسبت به شاخص خشک‌سالی PNI دارند (شکل ۶). نتایج شاخص‌های خشک‌سالی SPI، ZSI و PNI نشان می‌دهد که به ترتیب سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۰ را به‌عنوان خشک‌ترین سال، پهنه‌بندی کرده‌اند. شاخص‌های خشک‌سالی SPI و ZSI، سال ۲۰۰۳ را به‌عنوان مرطوب‌ترین سال پهنه‌بندی کردند و شاخص خشک‌سالی PNI علاوه بر ۲۰۰۳ سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۹ را به‌عنوان مرطوب‌ترین سال پهنه‌بندی کرده‌اند (شکل ۵).

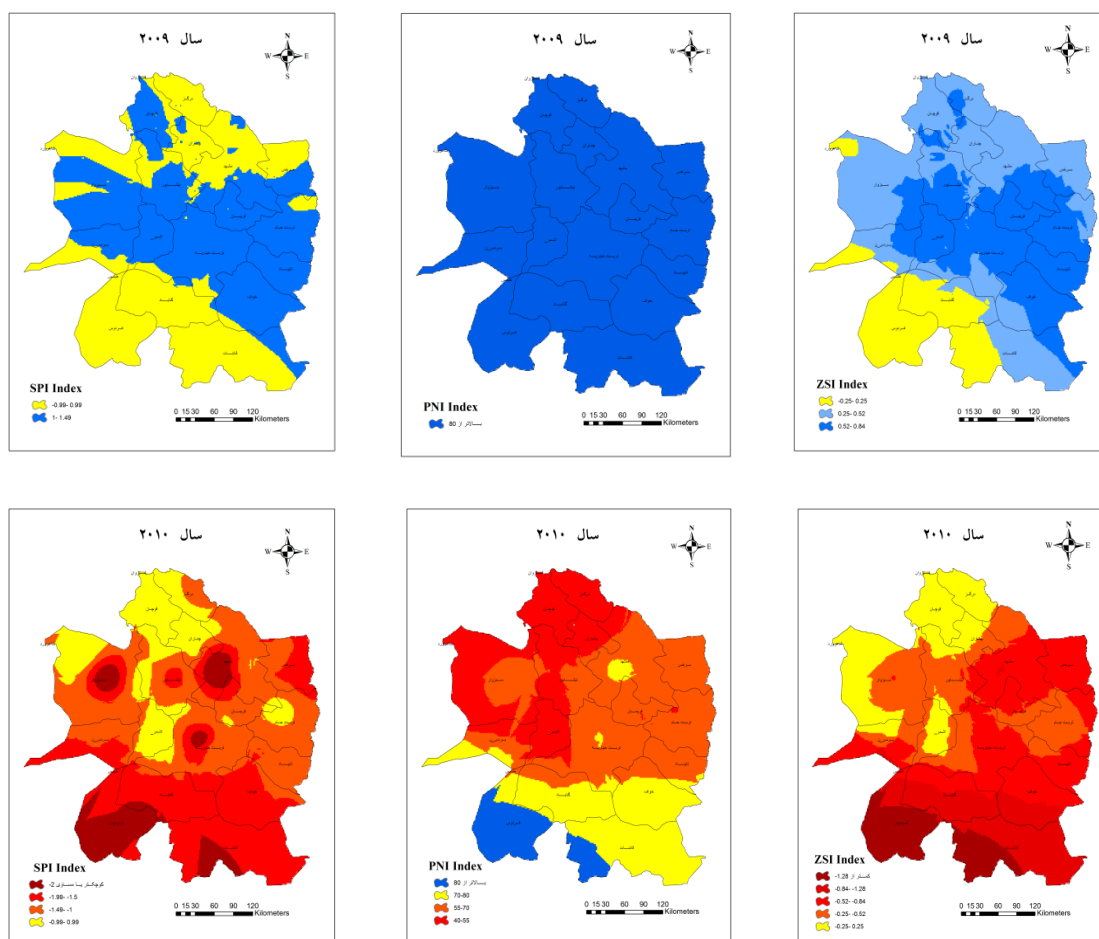


شکل ۵: تغییرات مقدار و میانگین طولانی مدت بارش در دوره‌ی مورد مطالعه









شکل ۶: نقشه‌های پهنه‌بندی خشک‌سالی شاخص‌های SPI، PNI و ZSI طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۰

نتایج بهترین عملکرد شاخص خشک‌سالی در استان خراسان رضوی در جدول ۴ آورده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌کنید شاخص خشک‌سالی SPI مقادیر کمینه‌ی بارش را در ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال‌های وقوع فرا خشک محاسبه کرده‌است که نسبت به دو شاخص دیگر دارای دقت بیشتری می‌باشد. نتایج هم‌چنین بیان‌کننده‌ی آن است که شاخص‌های PNI و ZSI، دارای دقت یکسانی هستند. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت، شاخص خشک‌سالی SPI برای پهنه‌بندی خشک‌سالی در استان خراسان رضوی، دارای دقت بالاتری می‌باشد و برای مطالعات خشک‌سالی این شاخص توصیه می‌شود.

جدول ۴: مقادیر کمینه بارندگی و پایش وضعیت جوی با استفاده از شاخص‌های منتخب

ایستگاه	کمینه بارش	سال وقوع	SPI	ZSI	PNI
مشهد	۴۴/۹	۲۰۱۰	فرا خشک	خشکی بسیار شدید	بی‌نهایت خشک
سبزوار	۵۸	۲۰۰۸	فرا خشک	خشکی بسیار شدید	بی‌نهایت خشک
قوچان	۹۷/۱	۲۰۰۸	فرا خشک	خشکی بسیار شدید	بی‌نهایت خشک
گناباد	۷۲	۲۰۰۸	فرا خشک	خشک‌سالی شدید	خشک‌سالی

شدید					
کاشمر	۶۱/۵	۲۰۰۸	فرا خشک	خشک‌سالی بسیار شدید	بی‌نهایت خشک
تربت جام	۵۲	۲۰۰۸	فرا خشک	خشک‌سالی بسیار شدید	بی‌نهایت خشک
سرخس	۷۰/۶	۲۰۰۸	فرا خشک	خشک‌سالی بسیار شدید	بی‌نهایت خشک

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی خشک‌سالی استان خراسان رضوی در دوره‌ی مورد مطالعه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) با استفاده از سه شاخص خشک‌سالی (SPI، PNI و ZSI) پرداخته شد و سپس برای دوره ۱۱ ساله‌ی انتهایی (۲۰۱۰-۲۰۰۰) به پهنه‌بندی خشک‌سالی در سطح استان پرداخته شد و در نهایت بهترین شاخص در ارزیابی خشک‌سالی در استان خراسان رضوی تعیین شد. بررسی تغییرات خشک‌سالی ۳۰ ساله‌ی شاخص‌های خشک‌سالی نشان می‌دهد که هر سه شاخص تغییرات یکسانی را نسبت به تغییرات بارش در دوره‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهند. دلیل این روند یکسان، وابستگی این شاخص‌ها به پارامتر بارش می‌باشد در واقع به علت این که این شاخص‌ها فقط تحت تأثیر بارش می‌باشد؛ لذا تغییرات بارش بر این شاخص‌ها تأثیر می‌گذارد و در این میان فقط شدت آن متفاوت می‌باشد. هم‌چنین تغییرات زمانی و مکانی شاخص‌های خشک‌سالی در دوره‌ی مورد مطالعه، از الگوی منظمی تبعیت نمی‌کند. این نتایج با نتایج رضیئی و همکاران (۱۳۸۶)، صالحوند و همکاران (۱۳۹۲) و بروغنی و همکاران (۱۳۹۱) که نشان می‌دهد شدت خشک‌سالی در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متغیر است، هم‌خوانی دارد. نتایج هم‌چنین نشان داد که شاخص خشک‌سالی SPI نسبت به شاخص‌های PNI و ZSI عملکرد و دقت بالاتری دارد. هم‌چنین شاخص‌های خشک‌سالی PNI و ZSI دقت یکسانی در تعیین خشک‌سالی دارند؛ لذا برای مطالعات خشک‌سالی در استان خراسان رضوی، شاخص SPI به دلیل دقت بالاتر توصیه می‌شود. در این زمینه با تحقیقات ناصرزاده و احمدی (۱۳۹۱)، انصافی مقدم (۱۳۸۶)، کریمی و همکاران (۱۳۹۰)، پیری و همکاران (۱۳۹۲) و خرم‌بخت و همکاران (۱۳۹۳) که در مطالعات خود، شاخص SPI را به‌عنوان بهترین شاخص تعیین کرده‌اند، تطابق دارد. هم‌چنین با نتایج شکوهی (۱۳۹۱) که شاخص SPI را به‌عنوان بهترین شاخص تعیین نکرده‌است هم‌خوانی ندارد.

۵- منابع

- ۱- انصافی‌مقدم، طاهره، ۱۳۸۶، ارزیابی چند شاخص خشک‌سالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک، مجله‌ی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۲، شماره ۱۴، ۲۷۱-۲۸۸.
- ۲- بروغنی، مهدی، طایی، مجید و سیدخلیق میرنیا، پ ۱۳۹۲، تحلیل ارتباط خشک‌سالی‌های هیدروژئولوژیکی و اقلیمی دشت سبزوار با استفاده از شاخص‌های SWI و SPI، فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۴، شماره ۲۰، ۷۴۴-۷۳۳.
- ۳- بهشتی‌راد، مسعود و محبوبه بهشتی راد، ۱۳۹۲، بررسی کارایی روش‌های پهنه‌بندی شدت خشک‌سالی در استان کرمان، فصلنامه‌ی برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره ۱، شماره ۹، ۱۰۱-۸۹.
- ۴- پیری، حلیمه، عباس‌زاده، محبوبه، راهداری، وحید و سعیده ملکی، ۱۳۹۲، ارزیابی تطبیقی ۴ نمایه خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای (مطالعه موردی استان سیستان و بلوچستان)، مجله‌ی مهندسی منابع آب، دوره ۲، شماره ۶، ۳۶-۲۵.
- ۵- حسینی‌صفا، حمیده و سعید مرید، ۱۳۸۷، تحلیل احتمالاتی خصوصیات مکانی شدت خشک‌سالی در استان تهران، مجله‌ی علوم کشاورزی و منابع، دوره ۵، شماره ۱۱، ۲۱۲-۲۰۳.
- ۶- خرم‌بخت، احمدعلی، مشیری، سیدرحیم و مسعود مهدوی، ۱۳۹۳، ارزیابی مشخصه‌های خشک‌سالی اقلیمی در منطقه لارستان، فصلنامه‌ی برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره ۱، شماره ۱۳، ۱۲۰-۱۰۳.
- ۷- خلیلی، علی و جواد بذرافشان، ۱۳۸۲، ارزیابی کارایی چند نمایه خشک‌سالی هواشناسی در نمونه‌های اقلیمی مختلف ایران، نشریه‌ی نیوار، دوره ۱، شماره ۴۸، ۹۳-۷۹.
- ۸- رضیعی، طیب، دانش‌کارآراسته، پیمان، اختری، روح‌انگیز و بهرام ثقفیان، ۱۳۸۶، بررسی خشک‌سالی‌های هواشناسی (اقلیمی) در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکف، مجله‌ی تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱، شماره ۳، ۳۵-۲۵.
- ۹- شکوهی، علیرضا، ۱۳۹۱، مقایسه شاخص‌های RDI و SPI برای تحلیل خشک‌سالی در مقیاس ایستگاهی با تکیه بر خشک‌سالی کشاورزی (مطالعه موردی: قزوین و تاکستان)، فصلنامه‌ی مهندسی آبیاری و آب، دوره ۳، شماره ۹، ۱۲۲-۱۱۱.
- ۱۰- صالحوند، ایران، منتظری، مجید و مهدی مومنی، ۱۳۹۲، پهنه‌بندی خشک‌سالی با شاخص‌های (PNI, DI, CZI, ZSI) و SPI و دنباله‌ها در شهرهای استان خوزستان در محیط GIS، فصلنامه‌ی جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری چشم‌انداز زاگرس، دوره ۳، شماره ۱۷، ۵۲-۳۵.
- ۱۱- کریمی، ولی‌الله، حبیب‌نژاد، محمود، آبکار، علیجان، ۱۳۹۰، بررسی شاخص خشک‌سالی هواشناسی در ایستگاه‌های سینوپتیک مازندران، فصلنامه‌ی مهندسی آبیاری و آب، دوره ۳، شماره ۵، ۲۵-۱۵.
- ۱۲- موسوی بایگی، محمد و بتول اشرف، ۱۳۹۰، مطالعه‌ی الگوهای سینوپتیکی منجر به خشک‌سالی‌های پاییزه و زمستانه در استان خراسان رضوی، مجله‌ی پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ۴، شماره ۱۸، ۱۶۷-۱۸۴.
- ۱۳- میرزایی، علی اصغر و غلامعلی سبغه، ۱۳۹۰، نرم افزارهای تخصصی مهندسی آب، انتشارات کیان رایانه‌ی سبز، چاپ اول.
- ۱۴- ناصرزاده، محمدحسین و اسماعیل احمدی، ۱۳۹۱، بررسی عملکرد شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در ارزیابی خشک‌سالی و پهنه بندی آن در استان قزوین، نشریه‌ی تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۲، شماره ۲۷، ۱۶۲-۱۴۱.
- ۱۵- یزدانی، وحید، داوری، کامران، قهرمان، بیژن و حمید زارع ابیانه، ۱۳۹۲، اعتبارسنجی چهار نمایه‌ی خشک‌سالی هواشناسی بر اساس حلقه‌های رشد درختان غیرمثمر (مطالعه‌ی موردی مشهد)، مجله‌ی مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۱۸، ۳۷-۲۳.
- 16- Edwards, D.C., McKee, T.B., 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple timescales, Colorado State University: Fort Collins. Climatology Report No.pp 97-102.
- 17- Gholam Ali, M., Younes, K.H., Esmail, A., Fatemeh, T., 2011. Assessment of Geostatistical Methods for Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices, World Applied Sciences Journal, 15 (4):pp474-482.
- 18- Goovaerts, p., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, Journal of Hydrology, 228: pp 113-129.

- 19- Herweijer, C., Seager, R., Cook, K., Geay, E., 2013. North American Droughts of the Last Millennium from a Gridded Network of Tree-Ring Dat, Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, New York, *Drying Technology: An International Journal*, Volume 31, Issue 15.
- 20- Herweijer, C., Seager, R., 2008. The global footprint of persistent extra-tropical drought in the instrumental era, *International Journal of Climatology*, 28(13):pp1761-1774
- 21- Hong, W and Hayes, J., 2001. An Evaluation of the standardized precipitation Index, The China- Z Index and the statistical Z-Score, *Journal of Climatol*, 21:pp745-758.
- 22- Hong, W., Hayes, M.J., Welss, A., Hu, Q., 2001. An evaluation the standardized precipitation index, the china-z index and the statistical z-score, *International Journal of Climatology*, 21:pp745-758.
- 23- Keyantash, J.A and Dracup, J.A., 2004. An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuation in the hydrologic cycle and surface water storage, *water resources research*, 40: pp 1-13.
- 24- Lloyd-Hughes, B., Saunders. M.A., 2002. A drought climatology for Europe, *International Journal of Climatology* 22: pp 1571-1592.
- 25- Loukas, A., Vasiliades, L.N.R., Dalezios, N.R., 2003. Intercom parison of meteorological drought indices for drought assessment and monitoring in Greece. *Proceeding of the 8 international conferences on environmental science and Technology. Lemons Island and Greece* pp8-10 September 2003.
- 26- Moradi, H.R., Rajabi, M., Faragzadeh, M., 2011. Investigation of meteorological drought characteristics in Fars province, Iran, *Catena*, 84(2) pp: 35-46.
- 27- Nikbakht, J., Tabari, H., Talae, P., 2013. Stream flow drought severity analysis by percent of normal index (PNI) in northwest Iran, *Theoretical and Applied Climatology*. 112: pp 565-573.
- 28- Palmer, W.C., 1965. *Meteorological Drought*, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C. Research Paper No.p 45.
- 29- Palmer, W.C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index, *Weatherwise*, 21: pp 156-161.
- 30- Shafer, B.A., Dezman, L.E., 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWST) to assess the severity of drought conditions in snow pack runs off areas, *In Proceedings of the (50th) Annual Western Snow Conference*, pp 164-175.
- 31- Tsakiris, G., Vangelis, H., 2004. Towards a drought watch system based on spatial SPI, *Water Resources Management*, 18: pp 1-12.